

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF

**Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à
compressão e módulo de elasticidade do concreto geopolimérico**

ÉRICA FERREIRA PEÇANHA

CAMPOS DOS GOYTACAZES

NOVEMBRO/2012

ÉRICA FERREIRA PEÇANHA

**Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e
módulo de elasticidade do concreto geopolimérico**

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

CAMPOS DOS GOYTACAZES

NOVEMBRO/2012

ÉRICA FERREIRA PEÇANHA

Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto geopolimérico

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 30 de novembro de 2012.

Prof. Dylmar Penteado Dias, UENF
(Orientador)

Prof. Jonas Alexandre, UENF

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira, UENF

Pesquisador João Cassim Jordy, INPI

CAMPOS DOS GOYTACAZES

NOVEMBRO/2012

“É graça divina começar bem. Graça maior persistir na caminhada certa. Mas graça das graças é não desistir nunca.”

Dom Helder Câmara

Dedico este trabalho, primeiro a Deus, meu suporte, e a toda minha família, pelo apoio incondicional, fundamental à formação de minha estrutura pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu forças, abriu portas, guiou meus caminhos para que este trabalho fosse concluído. Sem Ele, nada teria acontecido ou dado certo.

Ao meu orientador, Dylmar Penteado Dias, sempre solícito, pela paciência, ética, sinceridade e prontidão.

Aos meus pais, Erenita e Evenilton, que me deram todo suporte que precisei para que eu pudesse me dedicar aos estudos e, sempre preocupados com o andamento deste trabalho.

Ao meu amor e esposo, Érico, pelo apoio, pelas palavras de ânimo e de tranquilidade, pelos momentos felizes que tornaram tudo mais fácil.

Aos meus irmãos, Emílio e Elielton, e à minha cunhada, Isabel, pela amizade e torcida. Pelos momentos de descontração, onde pude renovar as energias.

À amiga Janaína, pelo conselho e ânimo num momento difícil.

Ao Laboratório de Concreto de FURNAS, pelos materiais doados, cessão dos equipamentos e espaço, apoio antes, durante e depois dos ensaios.

À UENF, Instituição que me acolheu e me ajudou chegar até aqui.

Ao Coordenador do Curso de Pós-Graduação da UENF, Fernando Saboya de Albuquerque Jr., pelos pedidos atendidos.

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Concreto de alto desempenho
CCG	Concreto de cimento geopolimérico
CCP	Concreto de cimento portland
CG	Cimento geopolimérico
CH	Hidróxido de cálcio ou portlandita
CP	Cimento portland
CPIIE-32	Cimento portland composto com escória de alto forno, classe 32 MPa
CV	Cinza volante
CCA	Cinza de casca de arroz
DRX	Difração de raios X
MA	Módulo alcalino
MC	Metacaulim
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
a/agl	Relação água / aglomerante
CP-ARI	Cimento portland de alta resistência inicial
CAR	Concreto de alta resistência
CPs	Corpos-de-prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Ec	Módulo de elasticidade
Ecs	Módulo de elasticidade secante
fc	Resistência média à compressão do concreto
fck	Resistência característica à compressão do concreto
kg	Quilograma
m ³	Metro cúbico
MPa	Mega pascal
SP	Superplastificante

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB	Comitê Euro-Internationale du Betón
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analisys Center
FIP	Federation Internationale de la Precontrainte
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
NBR	Norma Brasileira
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação esquemática do arranjo espacial da estrutura do geopolímero.....	19
Figura 2	Modelo conceitual de geopolimerização	26
Figura 3	Processo de fabricação do metacaulim	30
Figura 4	Possíveis aplicações para geopolímeros na indústria	32
Figura 5	Curvas tensão média de aderência do CCP e do CCG em função do deslizamento relativo para barras lisas de aço	37
Figura 6	Imagens obtidas no MEV por elétrons retroespalhados da interface aço-pasta: a) cimento Portland; b) cimento geopolimérico	38
Figura 7	Varredura em linha de interface aço-pasta de CP	38
Figura 8	Varredura em linha de interface aço-pasta de CG	39
Figura 9	Curvas carga <i>versus</i> deslocamento das vigas (curvas com maior potencial), ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos	42
Figura 10	Detalhe de curvas carga <i>versus</i> deslocamento das vigas, ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos para carga mínima de 10,8 kN (90% da carga máxima de ruptura da viga monolítica).	43
Figura 11	Micrografias de MEV (elétrons secundários) da superfície de fratura dos compósitos: (a) de cimento Portland e (b) de cimento geopolimérico (500x)	45
Figura 12	Resistência à compressão (MPa) do CCG após exposição à solução de ácido sulfúrico	47
Figura 13	Variação da retração autógena em função da idade	49
Figura 14	Retração autógena de cinco traços	50
Figura 15	Retração por secagem de argamassa de cimento Portland e de argamassas geopoliméricas	52
Figura 16	Imagem do concreto geopolimérico aos 720 dias de idade e $a/c=0,384$	54
Figura 17	Fenômenos de transporte de massa no concreto	56
Figura 18	Variação da resistência à compressão da argamassa Normal, em função do tempo, do cimento Na,K,Ca-PSS, CPIIE-32 e CPV ARI	59
Figura 19	Variação do módulo de elasticidade secante em função da resistência à compressão - brita do tipo gnaisse	61
Figura 20	Módulo de Elasticidade (E) em função da resistência à compressão (f_c) para os concretos de cimento geopolimérico e portland, contendo agregado de gnaisse britado (THOMAZ, 2000).	62
Figura 21	Micrografia (MEV) da pasta de Na,K,Ca-PSS - 1400X	62
Figura 22	Micrografia (MEV) da pasta de CPIIE-32 aos 28 dias, relação $a/c=0,30$ - 1400X	63
Figura 23	Corpo de prova moldados	70
Figura 24	Abatimento do tronco de cone	70

Figura 25	Adensamento do concreto	71
Figura 26	Medição da temperatura do concreto.	71
Figura 27	Formas instrumentadas das para ensaios de retração	72
Figura 28	Ensaio de resistência à compressão NBR 5739/2007	73
Figura 29	Realização do ensaio de módulo de elasticidade utilizando extensômetro elétrico Carlson	73
Figura 30	Ensaio de absorção total de água: a) saturação dos corpos-de-prova; b) imersão em água gradativamente levada à ebulição	76
Figura 31	Estocagem dos corpos de prova dentro de caixa plástica com água	78
Figura 32	Ensaio de retração autógena: a) corpos de prova envoltos por filme plástico; b) realização das leituras de deformação. (Laboratório de Concreto de Furnas)	79
Figura 33	Variação da retração autógena em função da idade	80
Figura 34	Variação da retração hidráulica em função da idade	85
Figura 35	Medição do ar incorporado no concreto geopolimérico	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Aplicações dos materiais geopoliméricos baseado na relação Si:Al	31
Tabela 2	Estudos acerca do cimento geopolimérico no Brasil	33
Tabela 3	Estudos acerca do cimento geopolimérico no mundo	34
Tabela 4	Tipos de ruptura. Ensaio AFNOR NF P18-851:1992	44
Tabela 6	Composição química e características físicas do cimento Portland	65
Tabela 7	Análise química e física do silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio	66
Tabela 8	Composição química e características físicas do metacaulim	67
Tabela 9	Caracterização do agregado miúdo	68
Tabela 10	Caracterização do agregado graúdo	69
Tabela 11	Equações utilizadas no cálculo da absorção, índice de vazios e massa específica	74
Tabela 12	Retração autógena do concreto geopolimérico	81
Tabela 13	Comparação dos resultados de retração autógena do CCG ensaiado com CCP's ensaiados por outros pesquisadores	83
Tabela 14	Resultados do ensaio de retração Hidráulica	84
Tabela 15	Comparação dos resultados de retração autógena do CCG ensaiado com outras pesquisas	85
Tabela 16	Resultados do ensaio de permeabilidade à água	86
Tabela 17	Comparação dos resultados de permeabilidade do CCG ensaiado com outras pesquisas	87
Tabela 18	Comparação dos resultados de porosidade do CCG ensaiado com outras pesquisas	88
Tabela 19	Determinação da resistência à compressão	91
Tabela 20	Comparação dos resultados de resistência à compressão do CCG ensaiado com outras pesquisas	92
Tabela 21	Comparação dos resultados de módulo de elasticidade do CCG ensaiado com outras pesquisas	94
Tabela 22	Resumo dos resultados obtidos	95

RESUMO

Estima-se que o consumo atual de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas ano. Há informações de que seja o segundo material mais utilizado pela humanidade, perdendo a primeira posição apenas para água. No entanto, ao longo dos anos tem-se percebido as limitações do cimento Portland, utilizado na fabricação do concreto convencional, relacionadas à durabilidade, resistência a altas temperaturas e resistência em face de ambientes agressivos. Existe ainda a preocupação com a questão ambiental, visto que a queima do clínquer resulta em alta emissão de CO₂ na atmosfera, e a disponibilidade de matéria prima para sua fabricação no futuro. Desta forma, o alvo de muitas pesquisas sobre novos materiais têm sido encontrar aglomerantes alternativos, que tenham desempenho físico, químico e mecânico superior, além de reduzir o impacto ambiental causado pela fabricação do cimento Portland. Um grupo de pesquisadores liderados pelo químico francês, Dr. J. Davidovits, vem estudando o concreto de cimento geopolimérico (CCG), patenteado em 1982, à base de pozolana artificial álcali-ativada, de ultra alta resistência inicial e curável a temperatura ambiente. No Brasil esse material vem sendo estudado em diversas instituições. Os resultados conseguidos até o momento revelam que o CCG é mais resistente à carbonatação e ao ataque por ácidos do que o concreto de cimento portland (CCP), possui aderência compatível ao CCP e ao aço, podendo ser utilizado para reparos e reforços de estruturas. Os experimentos desta pesquisa buscaram complementar o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do CCG, ainda pouco estudadas. Para tal, foram realizados ensaios de compressão, módulo de elasticidade, permeabilidade, absorção e retração (autógena e hidráulica). Os resultados mostraram que o CCG é menos permeável, mais rígido e retrai menos que o CCP, além de elevada resistência mecânica inicial, sugerindo ser o CCG uma excelente alternativa para realização de reparo e reforço estrutural.

Palavras-chave: cimento, concreto geopolimérico, módulo de elasticidade, permeabilidade, retração, recuperação, reparo.

ABSTRACT

It is estimated that the current consumption of concrete in the world is on the order of 11 billion tons year. There are reports that it is the second most common material used by mankind, losing the top spot only to water. However, over the years has been perceived limitations of Portland cement used in conventional concrete manufacture related to durability, resistance to high temperatures and resistance in the face of aggressive environments. There is also concern about the environmental issue, since the clinker burning results in high emission of CO₂ into the atmosphere, and the availability of raw materials for its manufacture in the future. Thus, the target of much research on new materials have been finding alternative binders, who deliver physical, chemical and mechanical upper and reduce the environmental impact caused by the manufacture of Portland cement. A group of researchers led by the French chemist, Dr. J. Davidovits, has been studying the geopolymer cement concrete (GCC), patented in 1982, based on artificial pozzolan alkali-enabled, ultra high initial resistance and curable at room temperature. In Brazil this material has been studied in several institutions . The results achieved so far show that the GCC is more resistant to attack by carbonation and acid than portland cement concrete (PCC), has supported the CCP and adhesion to steel and can be used for repair and reinforcement of structures. The experiments of this study sought to complement the knowledge of the physical and mechanical properties of the GCC, yet poorly studied. To this end, tests were performed compression modulus of elasticity, permeability, absorption and shrinkage (autogenous and hydraulic). The results showed that the GCC is less permeable, more rigid and less than the PCCs retract, and high initial mechanical resistance, suggesting that the GCC an excellent alternative to performing repair and reinforcement.

Keywords: Geopolymer concrete, modulus of elasticity, permeability, porosity, shrinkage.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I -INTRODUÇÃO.....	16
1.1 – BREVE HISTÓRICO: CIMENTO PORTLAND <i>versus</i> CIMENTO GEOPOLIMÉRICO.....	16
1.2 – CIMENSTOS GEOPOLIMÉRICOS	20
1.3 – OBJETIVOS	2020
1.4 – JUSTIFICATIVA	21
CAPÍTULO II - REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O CG E O CCG	193
2.2 – MECANISMOS DE GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	24
2.3 - MATÉRIAS PRIMAS	28
2.4 – APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS	31
2.5 – ESTUDOS SOBRE GEOPOLÍMEROS	33
2.5.1 – ADERÊNCIA DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO AO AÇO.355	
2.5.2 – ADERÊNCIA DO CONCRETO DE CIMENTO GEOPOLIMÉRICO AO DE CIMENTO PORTLAND.	40
2.5.3 – DURABILIDADE	44
2.5.4 – RETRAÇÃO AUTÓGENA.....	48
2.5.5 – RETRAÇÃO HIDRÁULICA	51
2.5.6 – PERMEABILIDADE	44
2.5.7 – POROSIDADE	55
2.5.8 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ALTA RESISTÊNCIA INICIAL).....	4457
2.5.9 – MÓDULO DE ELASTICIDADE	60
2.6 – CONSTATAÇÕES A PARTIR DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	64

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	65
3.1 - MATERIAIS.....	65
3.3 - MÉTODOS.....	68
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1 - RETRAÇÃO AUTÓGENA	80
4.2 - RETRAÇÃO HIDRÁULICA.....	84
4.3 – PERMEABILIDADE	86
4.4 - POROSIDADE	88
4.5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	90
4.6 – MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	93
4.7 – RESUMO DOS RESULTADOS.....	95
CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1 – CONCLUSÕES	96
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS.....	98

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 – BREVE HISTÓRICO: CIMENTO PORTLAND *VERSUS* CIMENTO GEOPOLIMÉRICO

Pode-se definir cimento como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que enrijece sob a ação de água. (www.abcp.org.br)

A origem da palavra **cimento** é oriunda do latim **caementu**, cujo significado está ligado a um tipo de pedra natural de rochedos encontrada na velha Roma. (www.abcp.org.br)

A descoberta do cimento remonta há pelo menos 4.500 anos, veja-se os imponentes monumentos egípcios que já empregavam de forma útil uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. O fato das Pirâmides do Egito resistirem ao tempo há séculos impressiona a pesquisadores e a curiosos (www.abcp.org.br).

O Panteão e o Coliseu, obras de grandes dimensões grega e romana, respectivamente, foram construídas utilizando-se solo de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou próximas à cidade italiana de Pozzuli, que apresentavam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

Foi em 1756 que se deu o importante passo no desenvolvimento do cimento. O inglês John Smeaton conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. O francês Vicat, em 1818, obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, através da mistura de componentes argilosos e calcários, é considerado o inventor do cimento artificial.

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin, ao queimar conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, observou que o resultado dessa mistura, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções e não se dissolvia em água. O produto foi patenteado pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento portland, por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (www.abcp.org.br)

Para BATTAGIN e SCANDIUZZI (1990) é provável que as pesquisas para a fabricação do cimento portland no Brasil tenham ocorrido em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocaba-SP. Várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas nessa época.

Atualmente, o cimento portland é um produto rigorosamente definido, e sua fabricação segue princípios bem estabelecidos. É um produto de grande versatilidade, porém, ao longo dos anos, com sua utilização em larga escala, observou-se algumas características que terminam por comprometer a sua durabilidade.

As limitações do concreto de cimento portland manifestam-se não só quanto aos problemas de carácter ambiental, considerando o alto nível de emissão CO₂ para sua fabricação, mas também do ponto de vista do seu comportamento mecânico e desempenho em ambientes agressivos. Os concretos de cimento portland são susceptíveis à carbonatação, com redução do pH que resulta em despassivação das armaduras, reação álcali-agregado, ataques por ácidos e sulfatos e apresentam ainda um desempenho muito limitado a altas temperaturas, pois a perdem a água de constituição quando exposto a temperaturas a partir de 400°C (www.geopolymer.com.br). Há também a preocupação com a disponibilidade no futuro das matérias primas que constituem o concreto.

Por esses motivos, torna-se evidente o interesse de promover pesquisas para o desenvolvimento de aglomerantes alternativos que, cumprindo os mesmos objetivos de desempenho, contribuam para a sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

Neste contexto, pesquisadores de várias partes do mundo buscaram entender a razão da impressionante durabilidade de antigas estruturas ainda existentes, tais como as pirâmides do Egito, obras do período do império romano e outras encontradas na Grécia, Chipre e Itália, algumas próximas dos 9000 anos de idade. Esperava-se que entendendo o processo de fabricação das argamassas utilizadas nestas obras, poderia-se chegar a melhorias do cimento portland ou

mesmo a um novo material que superasse as suas limitações. A durabilidade destas antigas estruturas está provavelmente relacionada à existência nos mesmos de um material amorfo composto por silicatos e aluminossilicatos complexos e um material criptocristalino, constatando-se que tais construções foram feitas de cimento geopolimérico. O termo “geopolímero” foi usado pela primeira vez por Davidovits com a finalidade de descrever uma família de aglomerantes minerais semelhantes às zeólitas artificiais, ou seja, consistem em um polímero Si-O-Al semelhante ao polímeros encontradas nas zeólitas (DAVIDOVITS, 1979).

Leciona DIAS (2001) que:

[...] “Os chamados geopolímeros ou polissialatos, terminologia adotada para abreviar poli-silico-aluminatos, foram apresentados pela primeira vez em patentes em 1981, onde foram apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que exibem o seu enorme potencial de aplicação como aglomerante em substituição ao cimento Portland” [...].

Nesse sentido pontua SILVA (2000):

[...] “Os geopolímeros, às vezes, são chamados aglomerantes aluminossilicatos álcali-ativados. Estes materiais diferem substancialmente de cimentos pozolânicos convencionais, porque os geopolímeros usam um caminho de reação totalmente diferente para atingir a integridade estrutural. Considerando que cimentos pozolânicos geralmente dependem da presença de cálcio, geopolímeros não apresentam a formação de hidratos, tais como C-S-H, para formação da matriz e obtenção da resistência. Na verdade, os geopolímeros utilizam a policondensação de sílica, precursores de alumina e certa quantia de álcali para atingir resistência mecânica” [...].

A ativação alcalina de aglomerantes hidráulicos à base de cimento portland e escórias de alto-forno vêm sendo realizada com sucesso desde a década de 40 em vários países do mundo.

Segundo DAVIDOVITS (1979), trata-se de uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos cauliníticos ou lateríticos com cal $[Ca(OH)_2]$, feita pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de peças estruturais, com

excelentes características mecânicas, superando as deficiências encontradas no cimento Portland.

1.2 – CIMENTOS GEOPOLIMÉRICOS

Os geopolímeros são formados por cadeias ou anéis com Si^{4+} e Al^{3+} em número de coordenação IV com o oxigênio (Figura 1), apresentando composição química similar às zeólitas, mas com estrutura variando de amorfa à semicristalina, PEREIRA *et al.* (2005)

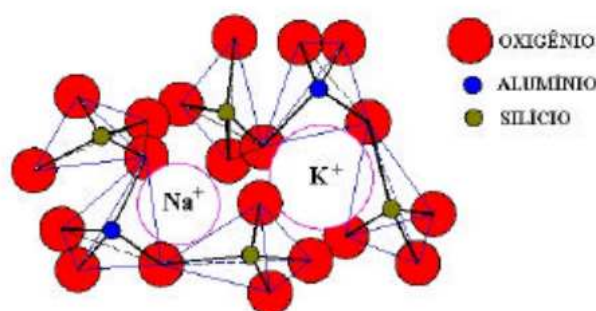


Figura 1 Representação esquemática do arranjo espacial da estrutura do geopolímero (PEREIRA *et al.*, 2005)

De acordo com PEREIRA *et al.* (2005):

[...] “As diferentes formas de síntese dos geopolímeros são baseadas nas composições molares entre os compostos reagentes, que influenciam diretamente nas propriedades do produto final. As principais matérias primas utilizadas são: o metacaulim, como fonte de silício e alumínio e a escória granulada de alto-forno, como fonte de cálcio, além de uma fonte de álcalis (KOH).

O metacaulim é obtido pelo processo de calcinação do caulim, cujo principal componente mineral é a caulinita. A caulinita é um argilomineral que apresenta a fórmula química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, encontrado facilmente na natureza e funciona como fonte de silício e alumínio para os cimentos geopoliméricos.”[...]

O processo de obtenção do concreto geopolimérico consiste na polimerização hidrotérmica em ambiente altamente alcalino. O produto formado pode ser considerado uma rocha sintética, cujas propriedades físicas e mecânicas são bem similares àquelas apresentadas pelos concretos de alto desempenho (PEREIRA *et al.*, 2005).

Leciona ARAÚJO (2000):

[...] “A qualidade do geopolímero depende essencialmente da natureza do material de origem. Caso sejam produtos obtidos por calcinação como, por exemplo, metacaulim (caulim calcinado), o geopolímero possuirá boas características de resistência quando comparados com outros produtos de origem não-calcinada. O ativador (substância alcalina) pode ser simples ou composto. A diferença reside no fato de se utilizar um ativador constituído por uma única substância ou por duas ou mais substâncias.” [...]

Esclarece MAURI *et al.* (2009) que:

[...] “Em comparação com os sistemas de cimento convencional, os geopolímeros são materiais que necessitam ainda de uma história longa de serviço para que permita a predição e o controle de sua verdadeira durabilidade estrutural. Desempenhos requeridos, formas e meios para a deterioração, caracterização dessas mudanças e, finalmente, resultados que mapeiem esse novo material em todas suas características são ainda necessários.” [...]

1.3 – OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar determinadas propriedades do concreto de cimento geopolimérico no estado endurecido a fim de contribuir para o conhecimento deste material, visando sua aplicação na construção civil. Tem-se em conta que as informações obtidas por outros pesquisadores, juntamente com as deste trabalho, possam contribuir para o fornecimento de maiores informações sobre CCG.

O presente trabalho tem, ainda, como objetivos específicos estudar e analisar propriedades físicas e mecânicas específicas do CCG, entre as quais:

- a. retração (autógena e hidráulica);
- b. porosidade;
- c. permeabilidade;
- d. resistência à compressão;
- e. módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal.

Ao mesmo tempo, de posse de resultados dos estudos e análises, efetuar comparações entre o CCG e CCP..

Importa salientar que, nesta dissertação, existem limitações relativas aos ensaios a serem realizados por terem caráter qualitativo, buscando-se pela análise comparativa dos resultados obter indicações e conclusões preliminares sobre o potencial do CCG.

1.4 – JUSTIFICATIVA

Assinala TAKEUTI (1999) que se observa um período de inovação na Construção Civil, momento em que se enfatiza a qualidade em geral e, particularmente, a durabilidade das estruturas em concreto armado, quer seja no âmbito nacional, quer seja no internacional. Apesar da contínua busca pela qualidade, pode-se constatar que, determinadas patologias ainda persistem e que os métodos disponíveis para a sua prevenção e correção necessitam de aperfeiçoamentos. Para ele, são vários os agentes causadores dos problemas patológicos. Pode-se enumerar alguns, tais como: variação da umidade, corrosão das armaduras, variações térmicas intrínsecas ao concreto, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos *etc.*

Para cumprir essa função de correção surgiu o concreto de cimento geopolimérico, o qual é um material relativamente novo e que possui vantagens na utilização, pois, além de ter elevado desempenho estrutural, permite o aproveitamento de materiais residuais.

DAVIDOVITS (1994) *apud* SOARES (2006) declara que:

[...] “Os estudos realizados até o momento sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento geopolimérico revelaram excelentes resultados. Os materiais poliméricos apresentam inúmeras qualidades em vários ramos de atividades, sendo cada vez mais utilizados nas indústrias automobilística, aeronáutica, metalúrgica, de fundição de materiais não-ferrosos e de plásticos, bem como na construção civil.” [...]

No entanto, apesar da grande contribuição destes estudos, pouca informação se tem sobre a permeabilidade, retração, porosidade e módulo de elasticidade do CCG. Este trabalho visa complementar as pesquisas até então

realizadas, tendo em vista a importância destas propriedades para a durabilidade dos materiais cimentícios.

As conhecidas limitações do cimento portland parecem ser, em grande parte, ultrapassadas com o concreto geopolimérico. Conforme constante nos referenciais teóricos (vide Capítulo 2), os materiais obtidos por ativação alcalina (ou geopolimerização, assim também chamados) são em geral mais resistentes do ponto de vista mecânico, apresentam maior durabilidade e estabilidade e atingem estes graus de comportamento muito mais rapidamente que os materiais fabricados com cimento portland, o que justifica o presente estudo.

CAPÍTULO II - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O CG E O CCG

O processo de polimerização do CG envolve a reação química sob uma condição altamente alcalina dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al-O. Considera-se o produto então constituído uma rocha sintética onde sua estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio (www.geopolymer.com.br).

Uma das principais propriedades do concreto de cimento geopolimérico, que excede os concretos tradicionais, está relacionada à resistência às altas temperaturas, ao choque térmico, à corrosão química e à abrasão.

Apesar de serem à base de água, os produtos de reação não são hidratos cálcicos como nos cimentos convencionais; portanto, há formação de uma matriz amorfa estável quimicamente. Como resultado, observa-se uma excelente durabilidade, não sofrendo os processos intensos de degradação que são observados nas estruturas realizadas com cimento portland.

O CG é um cimento que sob a ação das chamas não “explode”, com elevada resistência ao calor, não emitindo vapores, apresentando resistência à flexão e também à tração superior aos cimentos portland, além de ser imune às reações álcali-agregado (www.geopolymer.com.br).

O fato de o CG apresentar alta resistência inicial pode ser a solução para trabalhos que exigem rápida liberação para o uso, tais como obras em pistas de aeroportos, vias de tráfego intenso e paradas rápidas para manutenção industrial.

A resistência à abrasão dos concretos de cimento geopolimérico, feitos com agregados densos, é o dobro daquela apresentada pelos concretos de cimento portland. Esta superior resistência à abrasão se iguala a dos granitos de melhor qualidade. A principal razão da sua alta resistência à abrasão, com o uso deste tipo de agregado, é que, além do alto grau de dureza, este agregado desenvolve afinidade química durante a geopolimerização do cimento, promovendo ligação química entre a pasta e o agregado. A qualidade desta ligação (interface pasta-agregado) é muito superior às observadas nas microestruturas dos diversos tipos de concreto de cimento portland, cuja interface

é formada por uma zona de transição porosa e rica em hidróxido de cálcio, que é um material frágil e de baixa resistência (www.geopolymer.com.br).

TORGAL (2007) *apud* MAZZA (2010) afirma que o concreto produzido em seu estudo com o cimento geopolimérico apresentou maior vida útil que os concretos produzidos com cimento portland. Essa característica mostra que o cimento geopolimérico é capaz de encapsular metais pesados, tóxicos e radioativos, podendo ser utilizado no desenvolvimento de materiais leves para construção civil.

O CG é considerado de baixo impacto ambiental, o que vem contribuir, sobremaneira, para o desenvolvimento ecológico. Os materiais geopoliméricos são favoráveis ao meio ambiente e necessitam somente de energia moderada para serem produzidos. Na sua produção pode-se utilizar subprodutos disponíveis na indústria como matéria prima (www.geopolymer.com.br).

Este cimento traz características especiais, pois seu desenvolvimento ocorre através de tecnologia inovadora, que emprega, principalmente, argilominerais naturais e sintéticos de forma distinta da indústria cimenteira tradicional, cuja principal fonte é a matéria calcária para gerar o clínquer. A contribuição para o meio ambiente é de caráter primordial, tendo em vista a ocorrência de cerca de 80% de redução de emissão de gás carbônico para a atmosfera (www.geopolymer.com.br).

2.2 – MECANISMOS DE GEOPOLIMERIZAÇÃO

Antes de tudo, faz-se necessário enfatizar que, na síntese do geopolímero, é desconhecido o mecanismo exato responsável pelas reações de dissolução e formação de gel dos sistemas geopoliméricos em decorrência dos inúmeros fatores que regem as reações. O conhecimento da composição química do material de partida não se faz suficiente para poder se estimar ou compreender de que forma as propriedades do geopolímero sintetizado sofrem influências. Dentro desse contexto, ao se promover uma análise da formação do geopolímero, percebeu-se ser ela parecida com a zeólita, cuja formação se dá essencialmente em três etapas: a) acontece uma dissolução com formação de precursores móveis; b) ocorre a orientação desses precursores e reestruturação

interna parcial dos polissilicatos alcalinos; c) reprecipitação/solidificação que dá forma a uma estrutura inorgânica polimérica.

Normalmente se estuda a reatividade do precursor, que está sujeita à sua estrutura e mineralogia e, depois, se avalia como as diferentes reatividades influenciam o produto, que pode levar a um maior entendimento da reação geopolimérica, tornando possível prever sua influência sobre a estrutura e as propriedades do produto final.

Os estudos de XU (2002); XU *et al.* (2002a), SILVA (2010), PEREIRA (2006) e OLIVEIRA (2005) *apud* MELO (2011) relatam que os geopolímeros são considerados nanocompósitos formados a partir de uma matriz gel aluminossilicato amorfo, com nanopartículas residuais parcialmente dissolvidas da fonte cristalina e agregados:

Fonte de Al-Si + $n\text{MOH}_{\text{aq}}$ + M_2SiO_3 (s ou l) + agregados \Rightarrow \downarrow temperatura; tempo de cura \Rightarrow gel geopolimérico + Al-Si partículas não dissolvidas + agregados \Rightarrow geopolímero ou produto geopolimérico

Ainda segundo os autores:

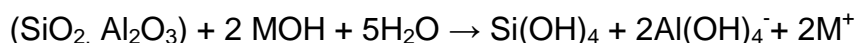
*[...] “A fase gel como ligante, as partículas não dissolvidas, os agregados como carga, e a razão entre fase gel e carga são responsáveis pela resistência mecânica destes materiais. O crescimento do número de matérias primas utilizadas na geopolimerização tem tornado o significado de geopolímero mais amplo, indicando uma mistura composta de gel geopolimérico e materiais provindos de uma fonte sólida. O produto geopolimérico é obtido quando outros metais ou matérias estão incorporados no sistema, como agregado ou reforço do tipo areia, carbetto de silício e fibras de aço, polipropileno ou carbono (XU, 2002; XU *et al.*, 2002a; SILVA, 2010; PEREIRA, 2006; OLIVEIRA, 2005).”*
[...]

Xu (2002) e Xu *et al.* (2002a) *apud* MELO (2011) relatam que a geopolimerização consiste nas etapas de lixiviação, difusão, condensação e endurecimento. Esclarecem:

[...] “Quando os materiais da fonte Al-Si (aluminossilicato) entram em contato com a solução alcalina, ocorre lixiviação (processo de extração de uma substância sólida através de sua dissolução em um líquido) de ambas as espécies Al e Si da superfície das partículas, liberando-as em solução. Em

seguida, as espécies aluminato e silicato começam a difundir para a fase aquosa, que pode conter silicato na solução de ativação, e formam espécies aquosas através da ação dos íons hidróxidos, completando o processo de dissolução. A extensão com que essa etapa ocorre depende de alguns fatores como a concentração da solução alcalina, cátion metálico alcalino usado na solução alcalina, velocidade de mistura, tempo de lixiviação e na estrutura, tamanho das partículas, área específica superficial e composição das fontes de Al-Si (aluminossilicato).” [...]

A dissolução de Si e Al das matérias primas pode ser descrita pela equação química:



onde M denota Na^+ ou K^+ (GIANNOPOULOU, 2007 *apud* MELO 2011). Quanto maior o tempo de lixiviação e mais intensa for a mistura, maior será a dissolução dos complexos de Al e Si da superfície das partículas Al-Si (aluminossilicato). A barreira de energia entre a superfície da partícula Al-Si e a fase gel é rompida, acelerando a difusão dos complexos. A Figura 2 mostra o mecanismo de polimerização.

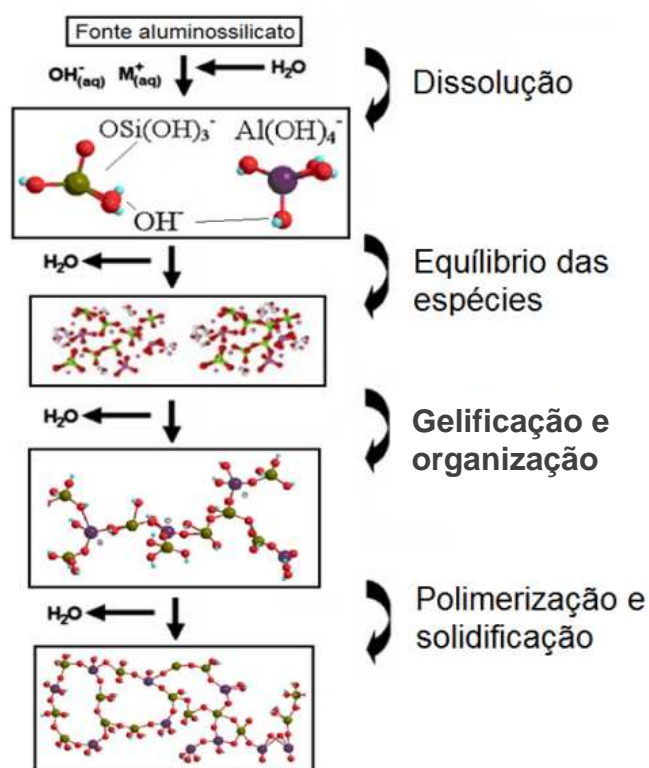


Figura 2 Modelo conceitual de geopolimerização (DUXSON *et al.*, 2007 e YAO, 2009 *apud* MELO, 2001).

A composição química do geopolímero tem grande influência nas propriedades e, conseqüentemente, nas aplicações do geopolímero. Insta aqui evidenciar que variações mínimas nas concentrações de Si e Al exercem drástica influência nas propriedades (SILVA, 2007 *apud* MELO, 2011).

Baixas razões molares Si/Al geram materiais com estrutura tridimensional rígida com aplicações voltadas para produção de tijolos e cerâmicas. Razões molares altas geram materiais com características poliméricas ideais para resistência ao fogo e ao calor, chegando a resistir a temperaturas de até 1200°C (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1994; BARBOSA, 2003 *apud* MELO, 2011).

Informa MELO (2011) que:

[...] “Acredita-se que os três maiores fatores que afetam a síntese das zeólitas, temperatura, pH e cátions, também afetam a geopolimerização. Maiores temperaturas, pH e tamanho atômico do cátion metálico alcalino estimulam a etapa de condensação, promovendo assim a geopolimerização ao estágio final. A solidificação do geopolímero difere das etapas de secagem e de endurecimento da zeólita, em que não ocorre reação química, apenas evaporação de água. Por outro lado, no geopolímero, ainda pode ocorrer lixiviação e difusão entre as superfícies das partículas e a fase gel (DUXSON et al., 2005b).” [...]

MARINHO (2004) *apud* VAN JAARSVELD e VAN DEVENTER (2004) afirma que o resultado da transformação, fase gel, a estrutura final ocorre por outra dissolução e outro processo de cristalização, ou por um mecanismo do estado sólido, como proposto por SCRIVENER para cimentos de escória ativados por álcalis.

Estes pesquisadores esclarecem que:

[...] “A fase gel é altamente reativa e, provavelmente, produzida principalmente pela copolimerização de espécies de alumina e sílica individuais, dissolvidas pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina. Desta forma, pode-se supor que a concentração de álcali, bem como o tamanho de partícula e a estrutura cristalina das fontes de sílica e alumina terão uma maior influência na eventual formação de gel via espécies dissolvidas. No entanto, o mecanismo químico responsável pela dissolução e formação do gel não é completamente entendido. Mas, em muitos casos, a dissolução de materiais de partida não é completa, até que a estrutura final endurecida seja formada. Pequenas quantidades de sílica e alumina presentes na

superfície das partículas precisam tomar parte da reação para que a mistura total solidifique.

O que se depreende dos ensinamentos expostos é que a escolha do tipo de álcali deve ser feita com base na aplicação do geopolímero, pois tem grande influência nas propriedades finais do CG ou do CCG.

2.3 - MATÉRIAS PRIMAS

Em meio aos subprodutos industriais, a cinza volante e a escória de alto forno são matérias primas de grande potencial para os geopolímeros.

Com relação ao grande potencial dos subprodutos industriais descreve SKAF (2008) de forma concisa:

- [...] “Cheng e Chiu (2003) relataram o estudo de produção de geopolímero resistente ao fogo, utilizando escória de alto forno combinada com metacaulinita. A combinação de hidróxido de potássio e silicato de sódio foi utilizada como ativador alcalino.
- Van Jaarsveld et al. (1997; 1999) identificaram o uso potencial de materiais residuais tais como cinza volante e resíduos de construções para imobilizar materiais tóxicos.
- Palomo et al. (1999) estudaram geopolímeros à base de cinza volante utilizando combinações de hidróxido de sódio com silicato de sódio e hidróxido de potássio com silicato de potássio como ativadores alcalinos. Encontraram que o tipo de ativador alcalino é um fator significativo que afeta a resistência mecânica e que a combinação de silicato de sódio com hidróxido de sódio proporcionou a mais alta resistência à compressão.
- Gorley (2003) afirmou que a presença de cálcio na cinza volante em significantes quantidades poderia interferir na taxa de polimerização e alterar a microestrutura do geopolímero. Logo, o uso da cinza volante com baixo teor de cálcio é preferível como matéria prima para a produção do geopolímero (WALLAH e RANGAN, 2006).” [...]

Seguindo a linha desse conjunto de pesquisas, de acordo com MAJIDI (2009), o foco está direcionado quanto à fonte de aluminossilicato (Al-Si) que pode ser utilizada na produção das zeólitas, geopolímeros e cimento Portland, e consiste em identificar materiais baratos e facilmente disponíveis, como a escória metalúrgica e resíduos de mineração.

Conforme entendimento de DUXON et al. (2007b) apud MELO (2011), apesar das características macroscópicas similares entre geopolímeros

preparados com diferentes fontes de aluminossilicato, é muito grande a variação da microestrutura e das propriedades (física, mecânica, química e térmica).

De acordo com MELO (2011):

[...] “Muitos materiais naturais e resíduos industriais têm sido utilizados na produção de geopolímeros, zeólitas e cimento Portland, como a metacaulinita, cinza volante, escória de alto forno, feldspatos alcalinos, cal, cinza de casca de arroz, casca de ovo calcinada entre outros, (XU, 2002; XU et al., 2003, ZAHARAKI, 2007; DAVIDOVITS (1991); YIP, 2003; SKAF, 2008; BIGNO, 2007; SOUZA, 2005).”[...]

Teoricamente, consoante XU (2002) e XU et al. (2002a), seja qual for o material que contenha alumínio e silício em sua composição, pode vir a ser a fonte sólida de aluminossilicato para a geopolimerização. Os minerais aluminossilicatos, que são formados por Al, Si e O, além de compor mais de 75% da crosta terrestre, são os mais abundantes, quiçá a maior fonte existente no mundo.

Outra importante matéria prima para a geopolimerização é o metacaulim, que é o caulim calcinado. SOARES (2006) relata que:

[...] “Desde 1972, DAVIDOVITS (1988) tem trabalhado com o caulim e com os álcalis (NaOH, KOH) para produzir geopolímeros. A tecnologia para fazer os geopolímeros foi publicada em várias patentes emitidas nas aplicações do “SILIFACEProcess”. Mais tarde, DAVIDOVITS (1998) introduziu também em seus estudos um caulim puro calcinado chamado KANDOXI (KAolinite, Nacrite, Dickite OXide) o qual era calcinado a 750°C durante 6 horas. Este material calcinado, tanto quanto outros materiais calcinados, apresentou melhor desempenho na produção dos geopolímeros quando comparados aos recursos em seu estado natural.”[...]

Explana PINTO (2007):

[...] “O caulim resulta da ação do intemperismo ou da ação hidrotérmica sobre as rochas feldspáticas, sendo classificados em primários e secundários. Os primários ou residuais apesar de serem produtos de decomposição de rochas e conter grandes quantidades de restos de rocha matriz, tais como quartzo, mica e feldspato, são os que se encontram no lugar em que estava a rocha original. Os caulins secundários ou transportados são os que são transportados para outro lugar. Os argilominerais presentes

nos caulins primários são caulinita e/ou haloista isolados ou de mistura de diversas proporções; nos caulins secundários, o argilomineral presente é geralmente caulinita.” [...]

Recorda MARINHO (2004) *apud* PINTO (2007) que a maioria dos caulins, quer sejam primários ou secundários, consistem em matérias suficientemente puras para uso industrial no estado bruto; sua grande maioria deve ser refinada ou purificada por lavagem ou por outros processos de beneficiamento.

Ensinam SOUZA e DAL MOLIN (2002) *apud* PINTO (2007):

[...] “Para que a argila caulínica possa desenvolver a atividade pozolânica existe a necessidade que a mesma sofra um processo de calcinação em temperaturas entre 500°C e 800°C, e posteriormente a moagem, visando diminuição da sua granulometria. Quando o processo de moagem reduz o tamanho das partículas a valores inferiores a 5 µm, constata-se uma excelente atividade pozolânica, sendo denominado por alguns autores por metacaulim de alta reatividade. Esta capacidade pozolânica faz com que este material possa substituir parte do cimento no concreto com o objetivo de aumentar a sua durabilidade e a sua resistência.” [...]

O processo de calcinação e formação do metacaulim estão descritos na Figura 3.

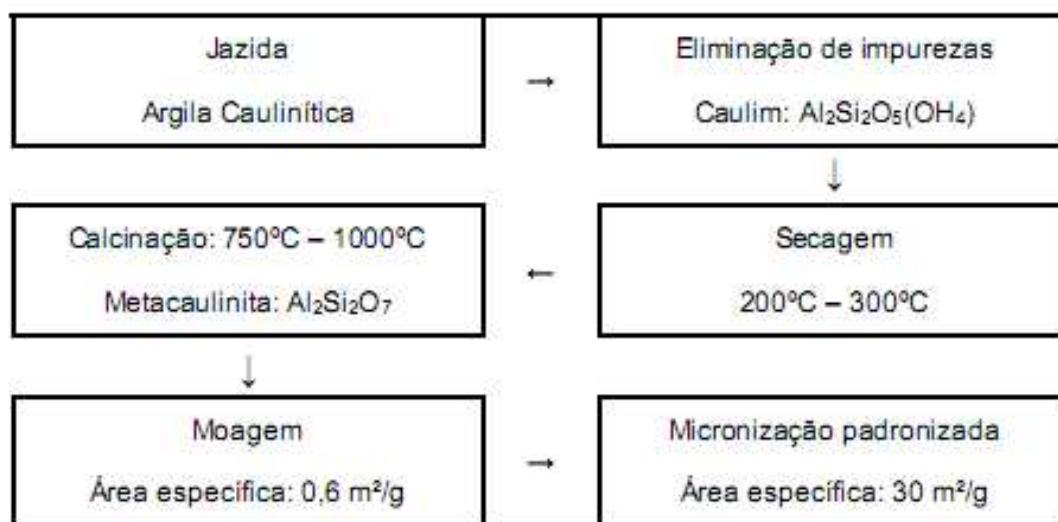


Figura 3 Processo de fabricação do metacaulim (Metacaulim, 2006)

No que tange aos ativadores, os mais utilizados, a fim de se alcançar os ligantes geopoliméricos, são os hidróxidos de sódio ou de potássio, o carbonato de sódio, os silicatos de sódio ou de potássio e, principalmente, misturas estruturadas destes compostos. O tipo de dosagem e concentração do ativador tem de ser estudado em função do material de partida, pois a composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativação (CORREIA, 2011).

Os ativadores, de um modo básico, são constituídos por dois tipos: os simples e os compostos. Os simples trazem em sua constituição uma base alcalina (hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio), enquanto que os segundos são formados pela associação de uma base alcalina com um silicato de sódio ou de potássio. Não está esclarecido de uma maneira definitiva qual o papel específico de cada componente de um ativador composto; atribui-se ao silicato de sódio (ou de potássio, por extensão do conceito) o papel de um ligante, enquanto o hidróxido de sódio atua mais no processo de dissolução de matérias primas. (CHENG, 2003 *apud* CORREIA, 2011).

2.4 – APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS

De acordo com DAVIDOVITS (1999) *apud* SOARES (2006) os tipos de aplicação dos geopolímeros podem ser classificados segundo a relação Si:Al (Tabela 1).

Tabela 1 Aplicações dos materiais geopoliméricos baseado na relação Si:Al (DAVIDOVITS, 1999 *apud* SOARES, 2006)

Relação Si:Al	Aplicações
1	Tijolos Cerâmica Proteção contra o fogo
2	Cimentos e concretos com baixo CO ₂ Retenção de resíduos tóxicos
3	Compósitos resistentes ao aquecimento (200°C a 1000 °C) Equipamentos de fundição
> 3	Aditivos (colas) para a indústria (200°C a 600°C) Equipamentos para indústria aeronáutica
20 - 35	Fibras e compósitos resistentes ao fogo

DAVIDOVITS (2002) *apud* PINTO (2007) garante que os ligantes geopoliméricos podem ser aplicados em praticamente todos os domínios da indústria. Isso é possível pois estes ligantes apresentam altas resistências mecânicas, resistência ao gelo-degelo, elevada inércia química e excelente resistência ao fogo, sendo considerados como materiais refratários. Podem ser também utilizados em imobilização de resíduos tóxicos, pois possuem estrutura similar às zeólitas, com elevada capacidade de troca iônica. Essa capacidade permite a imobilização de resíduos tóxicos, do tipo metais pesados e inclusive do tipo radioativos, dentro da matriz do próprio geopolímero (Kunze *et al.*, 1999 *apud* PINTO, 2007)

A Figura 4 apresenta as aplicações possíveis para produtos geopoliméricos na indústria da construção.

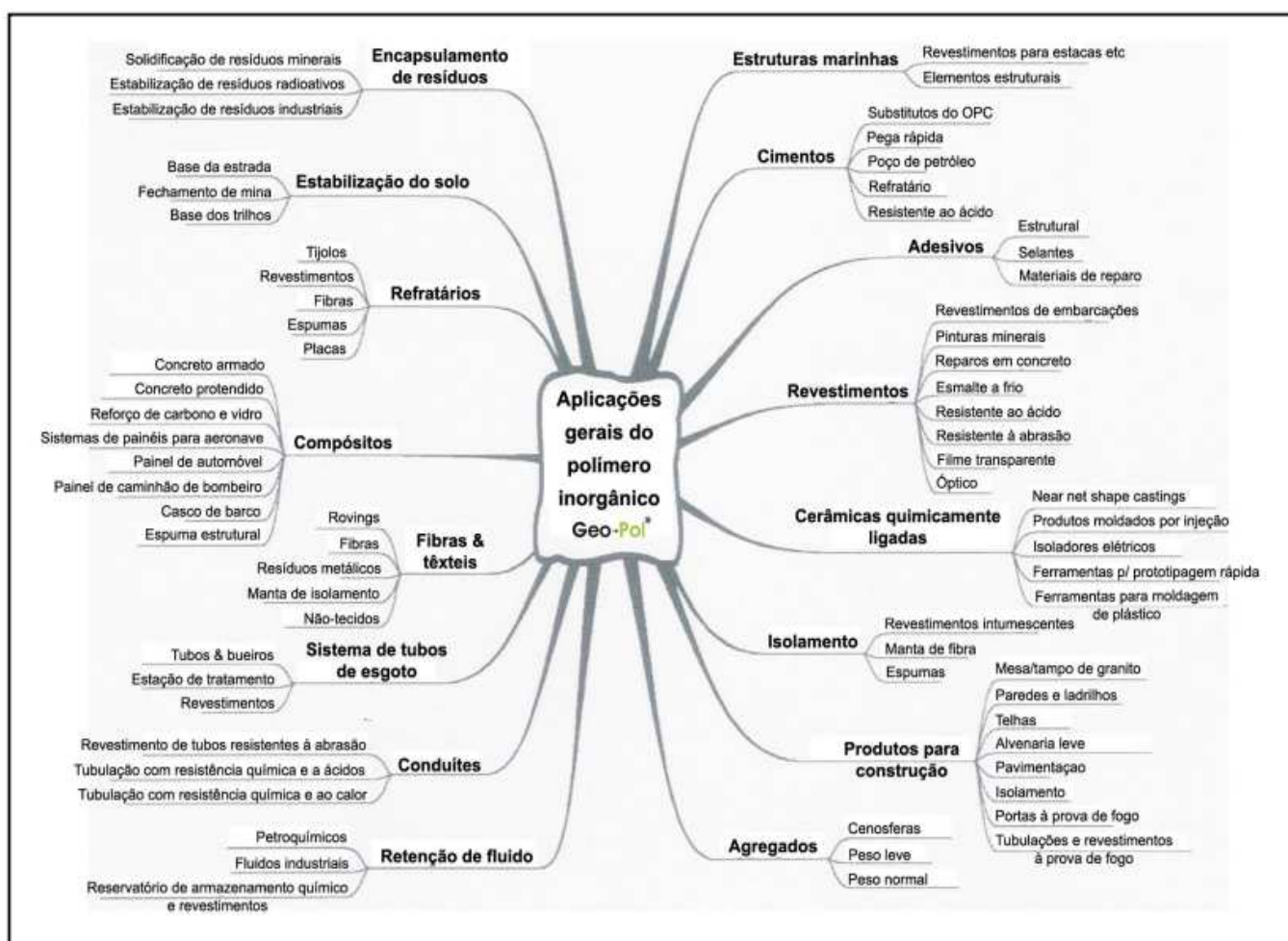


Figura 4 Possíveis aplicações para geopolímeros na indústria (www.geopolymer.com.br).

Uma aplicação do geopolímero que merece destaque é o reforço em estruturas de concreto armado. BALAGURU *et al.*, (1997) *apud* SOARES (2006) relatou em seus estudos os resultados da investigação do uso materiais de recuperação e reforço estrutural à base de CG em vigas de concreto armado. O geopolímero apresentou desempenho elevado quanto a características como adesão às superfícies do concreto e do aço e resistência ao fogo, resistência à degradação sob a ação de raios UV sendo, ainda quimicamente compatível com o concreto armado.

2.5 – ESTUDOS SOBRE GEOPOLÍMEROS

Um grande número de pesquisas tem sido realizado em todo mundo, na busca de novos materiais que contribuam para uma utilização racional dos recursos naturais, além de suprir as deficiências encontradas nos materiais convencionais. A construção civil está intimamente relacionada ao fomento dessas pesquisas, devido à necessidade de solucionar problemas ligados à durabilidade das estruturas, tais como rodovias, barragens, pontes, poços para extração de petróleo e obras civis em geral.

A Tabela 2 e 3 apresentam alguns estudos realizados no Brasil e no mundo, respectivamente, envolvendo o uso de geopolímero na construção civil.

Tabela 2 Estudos acerca do cimento geopolimérico no Brasil (modificado de MAZZA, 2010).

ANO	AUTOR	TÍTULO	INSTITUIÇÃO
1999	BARBOSA, V. F. F.	SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE POLISSIALATOS	IME
2000	SILVA, F. J.	REFORÇO E FRATURA EM COMPÓSITOS DE MATRIZ ÁLCALI-ATIVADA	IME
2000	THOMAZ, E.C.S.	CONCRETO GEOPOLIMÉRICO	IME
2001	DIAS, D. P.	CIMENTOS GEOPOLIMÉRICOS: ESTUDO DE AGENTES QUÍMICOS AGRESSIVOS, ADERÊNCIA E TENACIDADE À FRATURA	IME
2002	CUIABANO, J. L. S. P	EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO	UFMT
2004	LIMA, F. T.	CARACTERIZAÇÃO MICRO E NANOESTRUTURAL DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS METACAULÍNÍDICOS	IME
2005	SOUZA, L. G.	GEOPOLÍMEROS À BASE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS	IME

2005	ROCHA, G. G. N	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METACAULIM DE ALTA REATIVIDADE	UFMG
2006	PEREIRA <i>et al.</i>	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO: UMA VISÃO COMPARATIVA	IME
2006	SOARES, J. C.	AÇO-CONCRETO GEOPOLIMÉRICO: CORRELAÇÃO ENTRE TENSÃO DE ADERÊNCIA E COMPRIMENTO DE ANCORAGEM	UENF
2007	PINTO, E. N. M. G.	ATIVAÇÃO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS COM TETRABORATO DE SÓDIO E LÁTEX NÃO IÔNICO PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO	UFRN
2008	BIGNO, I. C.	GEOPOLÍMEROS À BASE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS E AGROINDUSTRIAIS	IME
2008	SKAF, T. B.	INFLUÊNCIA DE MATÉRIAS PRIMAS NA MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS	IME
2010	MAZZA, S. C.	ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA ADERÊNCIA DO SISTEMA ARGAMASSA DE REPARO COM CIMENTO GEOPOLIMÉRICO/SUBSTRATO DE CONCRETO COM CIMENTO PORTLAND	UFBA
2010	BELTRÃO, F. C. M. e ZENAIDE, J. C.	A INFLUÊNCIA DO METACAULIM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	UNAMA
2011	CORREIA, E. A. S.	COMPÓSITOS DE MATRIZ GEOPOLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS DE ABACAXI E DE SISAL	UFPB
2011	MELO, L. G. A.	SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS CONTENDO FILITOS	IME

Tabela 3 Estudos acerca do cimento geopolimérico no mundo (www.geolymer.com.br).

PAÍS	TÍTULO
ÁFRICA DO SUL	<i>DURABILITY AND DIFFUSE BEHAVIOR EVALUATION OF GEOPOLYMERIC MATERIAL</i>
INGLATERRA	<i>A CONCEPTUAL MODEL OF GEOPOLYMERISATION</i>
	<i>COMPOSITIONAL EFFECTS AND MICROSTRUCTURE OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMERS</i>
	<i>DEVELOPMENT AND PERFORMANCE OF CLASS F FLY ASH BASED GEOPOLYMER CONCRETES AGAINST SULPHURIC ACID ATTACK</i>
	<i>INFLUENCE OF AGGREGATE ON THE MICROSTRUCTURE OF GEOPOLYMER</i>
ESPANHA	<i>ACTIVACION ALCALINA DE METACAOLIN: DESAROLLO DE NUEVOS MATERIALES CEMENTANTES</i>

ESPAÑA	<i>EMPLEO DE ADITIVOS ORGÁNICOS EM LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DE CEMENTOS Y MORTEROS DE ESCORIA ACTIVADA ALCALINAMENTE</i>
	<i>INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS PLASTIFICANTES SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE PASTAS DE CENIZA VOLANTE ACTIVADA ALCALINAMENTE</i>
ESTADOS UNIDOS	<i>A FIELD INVESTIGATION OF CONCRETE PATCHES CONTAINING PYRAMENT BLENDED CEMEN</i>
	<i>DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER-POLYMER COMPOSITES</i>
	<i>FLY ASH BASED INORGANIC POLYMERIC BUILDING MATERIAL</i>
	<i>HIGH TEMPERATURE EFFECT OF GEOPOLYMERIC COATINGS ON CONCRETES</i>
	<i>POTENTIAL APPLICATIONS OF ALKALI-ACTIVATED ALUMINO-SILICATE BINDERS IN MILITARY OPERATIONS</i>
FRANÇA	<i>LES MORTIERS DE POUZZOLANES ARTIFICIELLES CHEZ VITRUVÉ ET HISTORIQUE ARCHITECTURALE</i>
	<i>SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE GÉOPOLYMÈRES</i>
PORTUGAL	<i>ACTIVAÇÃO ALCALINA E INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS</i>
	<i>SISTEMAS LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO DO METACAULINO</i>

A seguir são apresentadas vantagens do CCG sobre o CCP considerando determinadas propriedades (aderência ao aço, aderência de reparos aos substratos de CCP e durabilidade), baseado no estudo de diversos autores. Além disto, serão abordadas as propriedades estudadas nesta dissertação (retração autógena e hidráulica, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade), levando em consideração algumas pesquisas realizadas com concretos à base de CP e CG.

2.5.1 – ADERÊNCIA DO CONCRETO GEOPOLIMÉRICO AO AÇO

SOARES (2006) destaca que o conhecimento do comportamento da aderência entre os dois principais elementos que compõem o CCP armado (concreto e aço) tem grande relevância para que se obtenha a capacidade de carga e de serviço das estruturas. A aderência entre as barras da armadura e o CCP que as envolve está intimamente relacionado com a fissuração.

HAMAD (1995) *apud* SOARES (2006) explica que na compressão e na tração antes da fissuração, a armadura e o CCP circunvizinho possuem deformações iguais; então, tem-se a chamada aderência rígida, pois não há deslizamentos. Entretanto, tão logo haja fissuração do concreto, essas

deformações, nas proximidades da fissura, passam a ser diferentes: a armadura alonga-se mais do que o CCP. A diferença de alongamentos entre ambos os materiais implica na existência de deslizamentos da armadura em relação ao CCP.

DIAS (2001) verificou a tensão de aderência em barras lisas de aço e concretos de cimentos geopoliméricos e descreveu que:

[...] “O concreto geopolimérico (CCG) utilizado apresentava resistência à compressão igual a 50,6 MPa. Concretos fabricados com cimento Portland (CCP) também foram usados como referência e apresentavam resistência à compressão igual a 32,5 MPa. As curvas de comportamento apresentaram uma forma esperada para ensaios de arrancamento clássico para barras lisas, ou seja, após o pico, as variações de deslizamento relativo apresentaram um patamar ligeiramente horizontal correspondente à resistência residual originada pelo atrito da barra com o concreto que a envolve (Figura N.º 5).

Outra característica observada foi que as variações do deslizamento relativo pós pico não apresentaram um ramo descendente, presentes em ensaios de arrancamento clássico para barras nervuradas. O início do deslizamento do CCG e do CCP foram iguais a 3,18 MPa e 0,51 MPa, respectivamente, ou seja 524% superior.

Já para $\tau_{b0,1}/f_c$, obteve-se um valor de 0,03 para o CCP e 0,12 para o CCG. Ambos os casos revelaram uma superioridade expressiva dos cimentos geopoliméricos quando da utilização de barras lisas de aço.” [...]

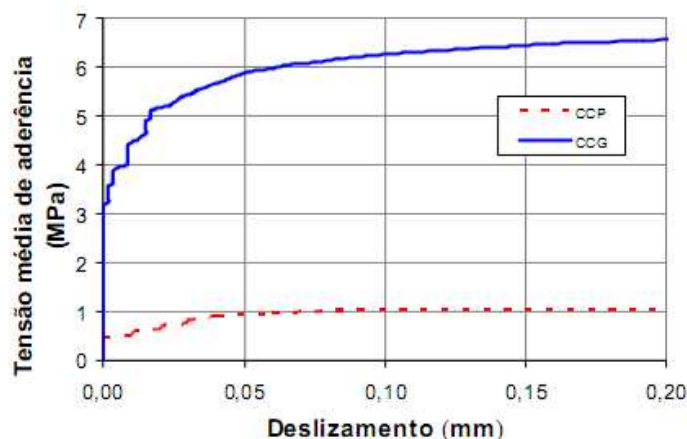


Figura 5 Curvas tensão média de aderência do CCP e do CCG em função do deslizamento relativo para barras lisas de aço (DIAS, 2001).

DIAS (2001) ainda relatou:

[...] “Sobre a qualidade da interface barra de aço-matriz, em pastas de cimento Portland (CP) e de cimento

geopolimérico (CG), imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados (Figura 6), mostraram que a zona de transição aço-matriz de CP é mais porosa que o restante da matriz e, conseqüentemente, a matriz de CP (Figura 6a) conseguiu apenas parcialmente aderir à superfície da barra de aço, reduzindo assim a capacidade de transferência da tensão (τ_b).

Com relação ao CG, as análises microestruturais realizadas revelaram que a interface aço-pasta não possui maior porosidade que o restante da matriz (Figura 6b). Isto remete à conclusão de que o CG desenvolve maior adesão ao aço do que o CP, por causa de sua maior área de contato. “[...]”

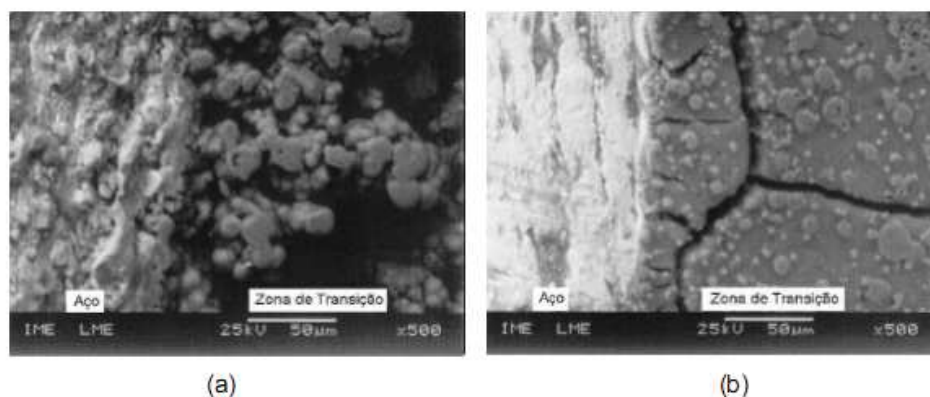


Figura 6 Imagens obtidas no MEV por elétrons retroespalhados da interface aço-pasta: a) cimento Portland; b) cimento geopolimérico (DIAS, 2001).

SOARES (2006) descreve que:

THOMAZ (2000) utilizou técnicas de microscopia eletrônica de varredura com imagem de elétrons retroespalhados, espectroscopia por dispersão de energia e mapeamento por raios X para observar a interface agregado-matriz de CG, concluindo que o CG possui propriedades físicas, bem como composição química, diferentes da interface agregado-matriz de CP.

Através da técnica de varredura em linha realizada na interface aço-pasta de CP (Figura 7) foram detectadas grandes quantidades de íons Ca^{2+} , o que vem revelar um indício de que maiores quantidades de cristais fracos de portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] foram formados nesta região, o que também corroboram a baixa tensão de aderência obtida nos ensaios de arrancamento (DIAS, 2001).

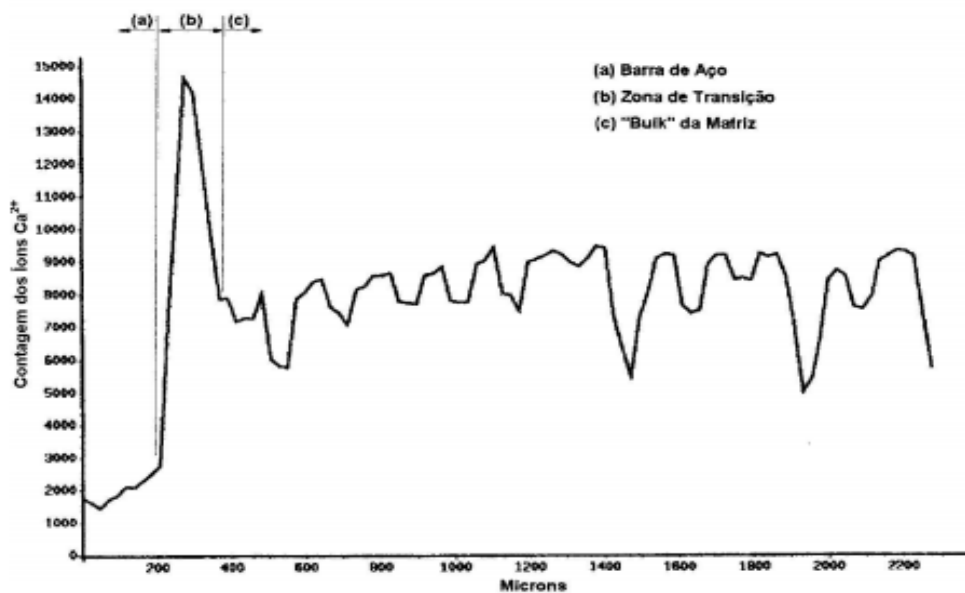


Figura 7 Varredura em linha de interface aço-pasta de CP (DIAS, 2001).

DIAS (2001) *apud* SOARES (2006) apresenta na Figura 8, onde:

[...] “Varredura em linha realizada na interface aço-pasta de CG, a qual também detectou uma maior quantidade de íons Ca^{2+} nesta região, porém o pico foi mais largo (largura = 400 mm) e menos intenso (contagem = 2800) que aquele obtido para a pasta de CP (largura = 200 mm e contagem = 14800). Entretanto, esta maior quantidade de íons Ca^{2+} na interface aço-pasta de CG em relação ao restante da matriz não significa propensão para a formação de cristais de portlandita, pois os CG não possuem estes tipos de cristais na sua composição.

Os resultados obtidos neste estudo relativos à tensão de aderência (τ_b) para o CCG comprovam seu melhor desempenho em relação ao CCP e ressaltam a importância das propriedades da interface aço-matriz. Portanto, promover a melhoria das características dessa região crítica (zona de transição) do concreto armado é essencial para que haja aderência necessária para uma transferência de tensão satisfatória entre o aço e o concreto.” [...]

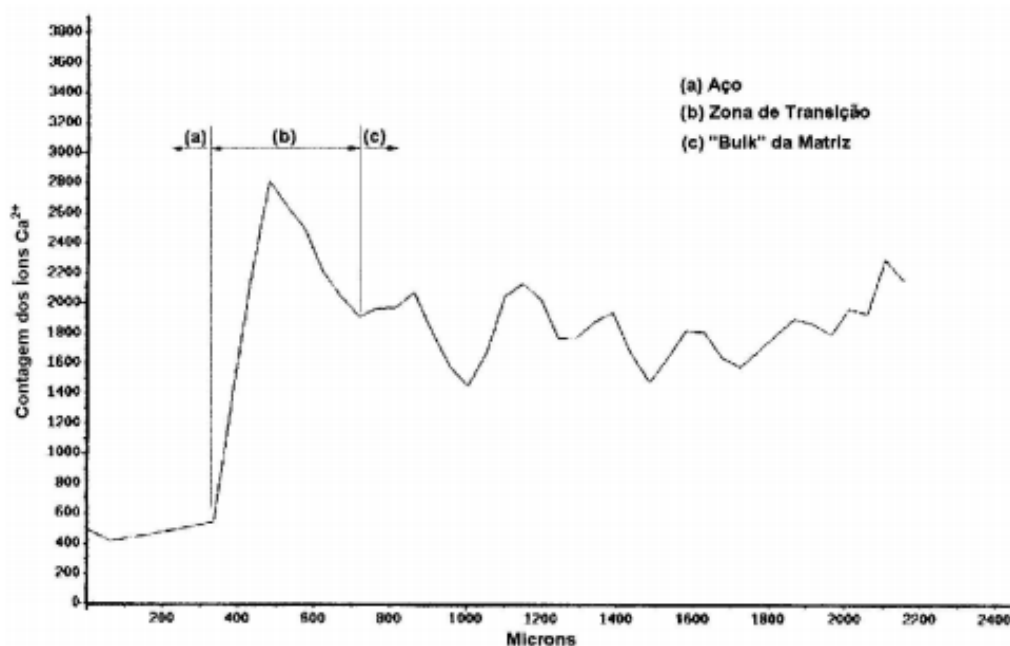


Figura 8 Varredura em linha de interface aço-pasta de CG (DIAS, 2001).

SKAF (2008) relata:

PEREIRA (2006) avaliou a tenacidade à fratura, as resistências à compressão, à tração na flexão e por compressão diametral do concreto geopolimérico obtido a partir da combinação de metacaulim (como fonte principal de alumínio e silício), de cimento Portland de alto-forno (como fonte de cálcio) e de uma solução alcalina composta por hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino reforçado com fibras de aço com baixo teor de carbono.

O concreto geopolimérico apresentou melhor resistência à tração na flexão (em função do teor de fibras) que o concreto de cimento Portland. Isto se deve ao fato do concreto geopolimérico apresentar interface aço-matriz com propriedades superiores de aderência e compacidade quando comparada ao do concreto Portland. As resistências à tração dos CCG foram 15,0%, 15,7%, 6,2%, 17,0% e 15,3% superiores àquelas apresentadas pelos CCP com teores de fibras iguais a 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, respectivamente.

As pesquisas aqui mencionadas comprovaram a boa aderência do concreto geopolimérico na interface aço-matriz, mostrando ser superior ao concreto convencional sob este aspecto.

2.5.2 – ADERÊNCIA DE REPAROS A SUBSTRATOS DE CCP

Visando o potencial do concreto de cimento geopolimérico como material de reparo de estruturas de concreto de cimento portland, será abordada neste tópico a propriedade de aderência entre os dois materiais.

MAZZA (2010) citando MEDEIROS e SELMO (2000) esclarece:

[...] “A aderência é a propriedade, no sistema de reparo, responsável pelas restrições às deformações, sendo o mecanismo que permite a transferência de tensões na interface, fazendo com que, no sistema reparo/substrato, a estrutura apresente deformações homogêneas e compatíveis.

Existem várias tecnologias de reparo de estruturas, cada uma com suas aplicações específicas, variando de acordo com o mecanismo que predomina na deterioração ou a depender de como a estrutura se encontra. Tais tecnologias podem ser relacionadas a intervenções que visam à proteção de elementos estruturais e seu reparo superficial, recompondo a seção transversal do elemento e sua estética, ou reforçando a estrutura para recomposição da capacidade de carga ou mesmo para seu reforço.” [...]

Ao estudar a compatibilidade de materiais de reparo em estruturas de CCP, MORGAN (1996) *apud* MAZZA (2010) desenvolve uma abordagem holística na seleção dos materiais de reparação para um determinado sistema. Assim feito, todos os parâmetros que influenciem na durabilidade do reparo devem ser levados em consideração na concepção e execução do reparo, por exemplo: compatibilidade dimensional, estrutural e mecânica (carga), química e eletroquímica, permeabilidade e aderência.

Leciona SANTANA (2004) *apud* MAZZA (2010) que a zona de transição não é particularidade apenas das superfícies dos agregados; está também presente em outras interfaces de compósitos à base de materiais cimentícios, por exemplo, a região da interface aço-concreto, concreto-concreto e argamassa-substrato.

Conforme ARAUJO e DEBS (2001) *apud* MAZZA (2010), o mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento pela superfície de contato é semelhante à transferência de esforços da barra de aço para o concreto, por aderência, condição indispensável a qualquer tipo de reparo bem sucedido, e pode ser dividido em três parcelas: adesão; atrito e ação mecânica.

De acordo com MAZZA (2010):

O uso dos concretos chamado de alto desempenho (a exemplo do concreto geopolimérico) está tornando obsoleto o uso de reparos feitos à base de resinas epóxi, pois, sobre a superfície do substrato limpo, rugoso e úmido, consegue-se uma aderência de até 100%. Nos reparos em estruturas de concreto, a adequada composição de materiais e o seu amplo conhecimento podem resultar na produção de concreto ou argamassa de elevado desempenho, a exemplo do que ocorre com a argamassa geopolimérica, apresentando não só uma expectativa muito otimista no que diz respeito à durabilidade do reparo frente a agentes agressivos, mas também, de acordo com as condições do substrato, apresentando uma condição de aderência satisfatória, para que se restaure o caráter monolítico da estrutura.

A análise da aderência do reparo em relação ao substrato de CCP foi realizada através de dois métodos por MAZZA (2010):

- no primeiro método analisou-se a aderência através do comportamento mecânico das vigas (ABNT NBR 12142:1994), com diferentes configurações de reparo, onde algumas de suas propriedades foram monitoradas: carga, deslocamento e deformações específicas;
- no segundo método analisou-se o comportamento da aderência, através do tipo de ruptura que ocorreu nas vigas ensaiadas à flexão (AFNOR NF P 18.851:1992).

Assim proposto, MAZZA (2010) relata:

[..] “As vigas que foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos até a ruptura (flexão pura), aos 56 dias de idade, sofreram carregamento crescente até a ruína da viga. As flechas no meio das vigas foram determinadas com emprego de LVDT (Transdutor). Todas as vigas foram ensaiadas com duas cargas aplicadas nos terços médios dos vãos.

Para representação do comportamento de cada sistema de reparo/substrato em concreto foi selecionada a curva de “maior potencial” para representação desses compósitos, sendo a curva “potencial” aquela que representa o comportamento do exemplar do grupo que demonstrou maior resistência de ruptura.

Na Figura 9 reúnem-se as curvas “potenciais” das vigas de concreto monolíticas e das vigas reparadas.” [...]

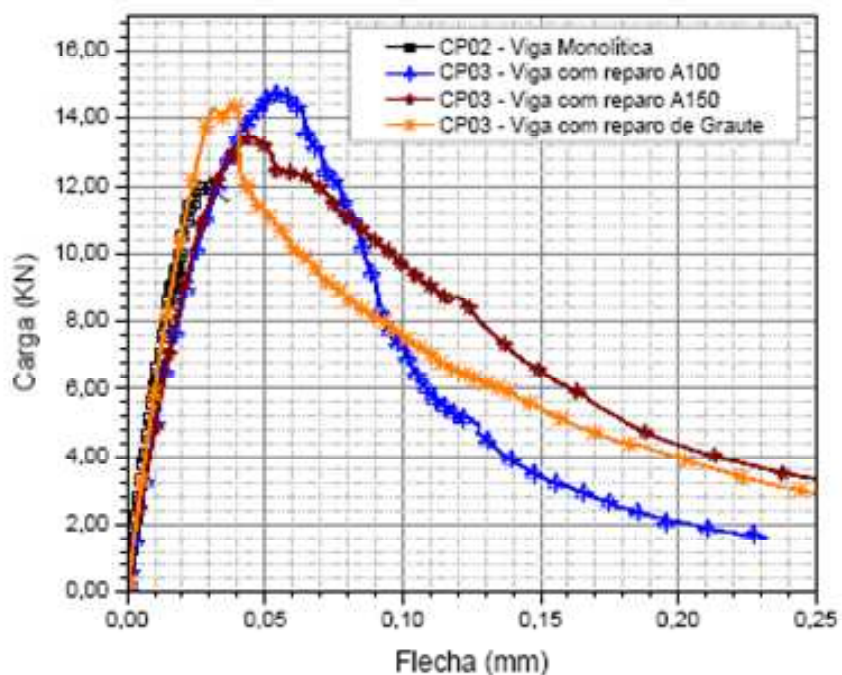


Figura 9 Curvas carga versus deslocamento das vigas (curvas com maior potencial), ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos (MAZZA, 2010).

E continua MAZZA (2010):

[...] “Observa-se que as deformações verticais lidas nas vigas no meio do vão apresentam curvas bem próximas. Tal fato indica perfeita aderência do reparo ao concreto, permitindo o trabalho solidário do sistema de substrato/reparo.

A viga com argamassa de reparo geopolimérico do Tipo A100 mostrou-se superior às demais em relação à capacidade de deformação antes de ruir. Essa viga superou a monolítica em 112%; já a viga reparada com o geopolímero A150 superou a monolítica em 80%.

Na Figura 10, para comparação entre os deslocamentos verticais (flechas), observa-se as curvas “potenciais” das vigas reparadas de concreto para um carregamento igual a 90% da carga de ruína da viga monolítica, ou seja, carga de aproximadamente 10,80 kN.” [...]

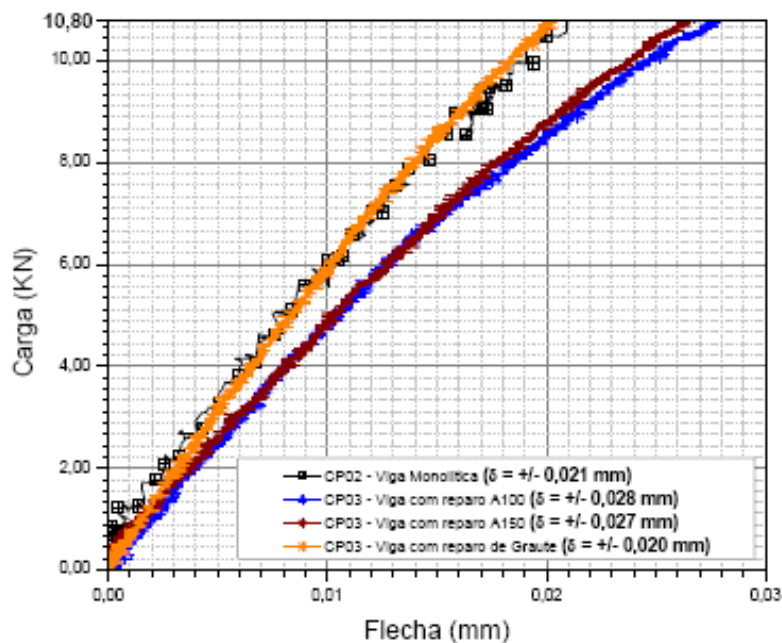


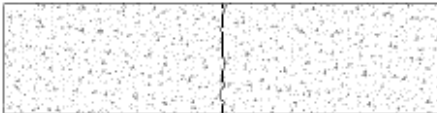
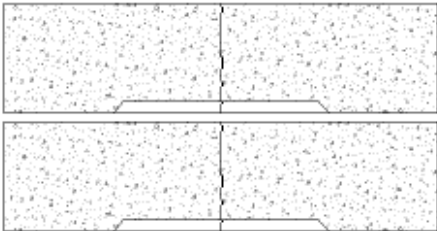
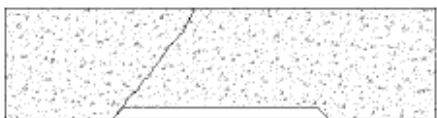
Figura 10 Detalhe de curvas carga versus deslocamento das vigas, ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos para carga mínima de 10,8 kN (90% da carga máxima de ruptura da viga monolítica). (MAZZA, 2010)

MAZZA (2010) observa ainda que:

[...] “Para a carga destacada (10,80 kN), as argamassas de reparo com geopolímeros apresentaram-se com as maiores flechas, ou seja, com menor rigidez em relação à viga monolítica e à reparada com graute. Isso demonstra o bom desempenho que essas argamassas obtiveram em relação à aderência, bem como à capacidade de servir como material de reforço de estruturas.[...]”

Na Tabela 4, MAZZA (2010) apresenta um resumo das diferentes configurações de abertura de fissuras nas vigas ensaiadas.

Tabela 4 Tipos de ruptura. Ensaio AFNOR NF P18-851:1992 (MAZZA, 2010).

Viga	Característica do Material	Tipo de Ruptura	Modo de Ruptura
VM CP01 VM CP02 VM CP03	Viga Monolítica de referência, sem reparo	Tipo M	
VA100 CP01 VA100 CP02 VA100 CP03 VA100 CP04 VA150 CP01 VA150 CP02 VA150 CP03 VA150 CP04	Viga com reparo em geopolímero A100 Viga com reparo em geopolímero A150	Tipo M	
GR CP01 GR CP02 GR CP03 GR CP04	Viga com reparo em Graute	Tipo I-2	

Ou seja, as argamassas de reparo à base de CG apresentaram elevada aderência, comportando-se como material monolítico, semelhante CCP. Isso permitiu à peça suportar maiores intensidades de solicitações. A ruína nessas vigas reparadas foi provocada por fissuras devido à flexão. As fissuras começaram no bordo tracionado das peças e avançaram em direção à linha neutra. A argamassa de referência (graute) apresentou desprendimento da parte inclinada do reparo e desenvolvimento da fissura para o concreto do substrato. A ruptura se deu na região inclinada do entalhe, com a propagação da fissura para o concreto a partir da interface em sua região horizontal após elevada carga aplicada no ensaio (MAZZA, 2010).

O pesquisador considerou satisfatório o desempenho das vigas reparadas com argamassas geopoliméricas, semelhante aos das peças íntegras de CCP monolítico.

2.5.3 – DURABILIDADE

SILVA (2000) *apud* MAURI *et al.* (2009) constata que a maioria das pesquisas na área de tecnologia de novos materiais cimentícios busca a melhoria das propriedades químicas, físicas ou mecânicas a fim de conferir maior durabilidade aos aglomerantes. Um objetivo comum tem sido encontrar

aglomerantes que apresentam comportamento diferenciado em relação ao cimento portland. As alternativas ao cimento, especialmente em condições de exposição a ambientes agressivos, devem oferecer maior durabilidade, diminuir efeitos negativos do emprego do cimento tradicional, inclusive os associados ao impacto ambiental atrelado à indústria cimenteira.

Frequentemente, os fenômenos que afetam a durabilidade das estruturas de materiais à base de CP em longo prazo são os ataques químicos por sulfatos e ácidos. O ataque por sulfatos ao CP leva à expansão, fissuração e deterioração de muitas estruturas de concreto expostas a ambientes sulfatados, tais como cais, pontes, fundações, tubulações, etc. O ataque por ácidos, por sua vez, acarreta lixiviação dos compostos da matriz de CP e degradação gradativa do material.

SKAF (2008) *apud* OLIVEIRA (2005) afirma que:

[...] “Na microestrutura do cimento Portland são formadas diferentes fases, sendo algumas cristalinas, de baixa resistência e porosidade elevada, o que faz com que as resistências dessas fases na matriz de cimento Portland sejam muito inferiores às do geopolímero. O fato de se ter uma microestrutura porosa compromete a durabilidade do compósito ao expor as fases aos ataques agressivos, à lixiviação ou mesmo a uma reação expansiva (formação de etringita retardada) que leve à fissuração da matriz. A matriz geopolimérica possui uma rede mais massiva e densa Figura 11.” [...]

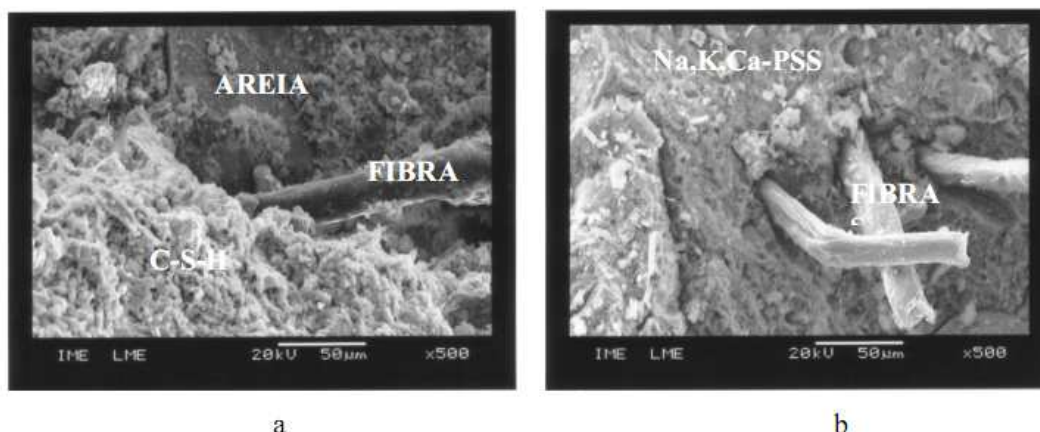


Figura 11 Micrografias de MEV (elétrons secundários) da superfície de fratura dos compósitos: (a) de cimento Portland e (b) de cimento geopolimérico (500x) (OLIVEIRA, 2005).

SKAF (2008) comenta que o concreto de cimento geopolimérico pode conter em sua formulação subprodutos industriais (cinza volante, escória ou cinza da casca de arroz, entre outros) que lhe conferem igual ou superior desempenho

(maiores resistências ao ataque por ácidos e por sulfatos, à compressão, à tração, melhor trabalhabilidade, baixa taxa de fluência *etc.*) quando comparado ao concreto de cimento portland.

Ensaio de ataque por agentes químicos agressivos foram realizados por DIAS (2001) em corpos de prova de argamassas de cimento portland e de cimento geopolimérico. Segue relato dos ensaios:

- os corpos de prova foram completamente imersos até a data dos ensaios em recipientes plásticos contendo solução de HCl a 0,20M e de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a 0,25M, para simular os ataques por ácido e por sulfato, respectivamente. A proporção volumétrica das soluções em relação aos corpos de prova foi mantida em 4:1 durante todo o experimento;
- as soluções foram trocadas a cada três meses e o monitoramento do pH das soluções, medido a temperatura ambiente, foi realizado mensalmente com pHmetro ED3 da marca Metronic;
- as mesmas propriedades foram avaliadas em corpos de prova de argamassa de cimento portland mantidos em câmara úmida a 20°C e umidade relativa em torno de 95% e corpos de prova de argamassa de cimento geopolimérico mantidos sob as condições ambientes do laboratório, os quais serviram de referência;
- os efeitos deletérios da exposição dos corpos de prova a agentes químicos agressivos foram determinados pela variação do pH da solução, variação do peso, variação da resistência mecânica (compressão, tração por compressão diametral e tração na flexão), avaliação visual, por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários e retroespalhados, por espectroscopia por dispersão de energia, por varredura em linha, por calorimetria diferencial de varredura e também por difração de raios X.

Descreve DIAS (2001) que os resultados obtidos mostraram que os cimentos geopoliméricos podem ser bons substitutos dos cimentos portland em ambientes agressivos, quando o MgSO_4 ou o HCl forem os principais agentes de deterioração.

SKAF (2008) narra os estudos de WALLAH e RANGAN (2006):

[...] “WALLAH e RANGAN (2006) analisaram o efeito da idade na resistência à compressão e as propriedades a longo prazo (fluência sob carga constante, retração à pega, resistência ao sulfato e resistência ao ácido sulfúrico) do concreto geopolimérico baseado em cinza volante com baixo teor de cálcio. Os materiais utilizados foram: cinza volante com baixo teor de cálcio, agregados, líquidos alcalinos (solução de silicato de sódio e solução de hidróxido de sódio), água e superplastificante à base de naftaleno.” [...]

Descreve SKAF (2008):

[...] “Os autores observaram que houve ganho de resistência à compressão com o tempo para o concreto geopolimérico curado nas condições ambientes do laboratório. O concreto geopolimérico apresentou baixa taxa de fluência, pequena retração e excelente resistência ao ataque por sulfatos. Não ocorreu nenhum dano à superfície das amostras após exposição a uma solução de sulfato de sódio durante um ano. As observações destes testes indicaram que não houve mecanismo algum de formação de gesso ou etringita a partir dos principais produtos de polimerização no concreto geopolimérico curado termicamente; porém, a superfície das amostras deste concreto sofreu danos ao ser exposta à solução de ácido sulfúrico, que ocasionou perda de massa em torno de 3% após um ano (Figura 12). O ataque de ácido sulfúrico também causou degradação na resistência à compressão do concreto geopolimérico curado termicamente; a extensão da degradação dependeu da concentração e do período de exposição. Todavia, o concreto geopolimérico apresentou resistência ao ataque ácido significativamente superior a do concreto de cimento Portland.” [...]

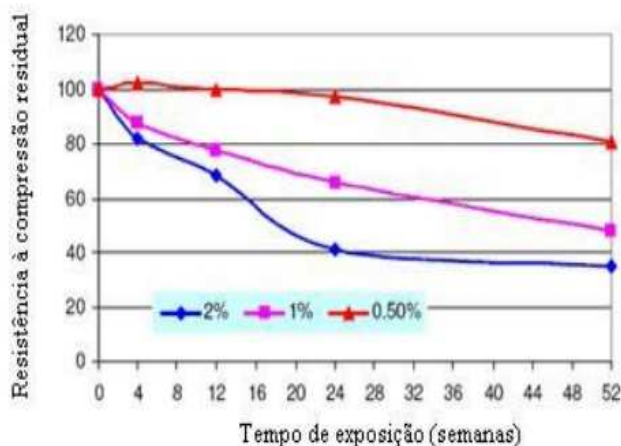


Figura 12 Resistência à compressão (MPa) do CCG após exposição à solução de ácido sulfúrico (WALLAH e RAGAN, 2006 *apud* SKAF, 2008).

MAURI *et al.* (2009) realizou ensaios com argamassas geopoliméricas que tiveram, como fonte de sílica e alumina, o metacaulim e, como fonte de cálcio, o cimento composto com escória de alto forno, onde:

[...] “Foram realizados ciclos de imersão em solução agressiva e secagem ao ar com 10 dias de duração para a solução de sulfato de sódio. Para a solução de ácido sulfúrico, o ataque foi realizado em imersão contínua, devido a maior agressividade deste ácido. A resistência à compressão foi avaliada em ensaios de compressão axial. As análises microestruturais foram realizadas após o sexto ciclo agressivo em pastas geopoliméricas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por análises termodiferenciais (ATD).” [...]

Com base nos procedimentos experimentais adotados, pôde-se concluir que a argamassa geopolimérica mantida na solução de sulfato de sódio mostrou reduzida queda de resistência à compressão axial em comparação à argamassa de referência. Os resultados indicaram que a argamassa geopolimérica mostrou um bom desempenho em solução de sulfato de sódio e um desempenho moderado na solução de ácido sulfúrico, com queda de resistência mecânica e lixiviação da pasta geopolimérica devida à agressividade do ácido.

Todas as pesquisas aqui relatadas obtiveram resultados que mostraram que o concreto geopolimérico possui maior resistência em face de ambientes agressivos quando comparado ao concreto convencional.

2.5.4 – RETRAÇÃO AUTÓGENA

Um importante tipo de retração no concreto é a autógena. É um fenômeno que ocorre nos concretos como consequência exclusivamente das reações químicas de hidratação do cimento portland ao longo do tempo, decorrente da contração de volume que experimenta a água combinada quimicamente com o CP. O fenômeno de retração é bastante danoso, pois provoca microfissuras internas no concreto, formando um caminho preferencial de fragilidade quando este for submetido a uma carga muito elevada (SILVA e DANTAS, 2009).

A retração autógena corresponde à variação de volume da pasta de CP, mesmo sem troca de umidade com o meio externo e sob temperatura constante. No CCP endurecido, a tensão capilar da água do poro é comumente considerada

como a força motriz para a retração autógena. Ao ser usada a água do poro na hidratação, a auto dessecação causa redução do raio do menisco da água dentro dos poros, aumentando a tensão capilar. Essa tensão capilar é difícil de ser medida, por serem os poros muito pequenos e pela descontinuidade da água dos poros (HAMMER, 2002 *apud* SALES, 2006).

O CCG apresenta vantagens sob este aspecto sobre o CCP, pois a formação de capilares é reduzida devido à microestrutura do CG ser massiva e monofásica. A seguir serão citados alguns estudos sobre concretos à base de cimento portland de elevado desempenho com adições de sílica ativa, metacaulim e escória de alto forno, como base para comparação posterior (vide Capítulo IV) com o CCG que também é considerado um concreto de elevado desempenho e possui as mesmas substâncias citadas.

KALINTZINS e KUPERMAN (2001) encontraram os seguintes valores de retração autógena aos 90 dias: $309,98 \times 10^{-6}$; $220,60 \times 10^{-6}$; $124,62 \times 10^{-6}$ e $63,49 \times 10^{-6}$, em concretos de elevado desempenho com substituição de 6% do cimento por sílica ativa e relação água/aglomerante igual a 0,29; 0,37; 0,52 e 0,76, respectivamente. A Figura 13 abaixo mostra a variação das deformações ao longo do tempo, referente à citação deste parágrafo.

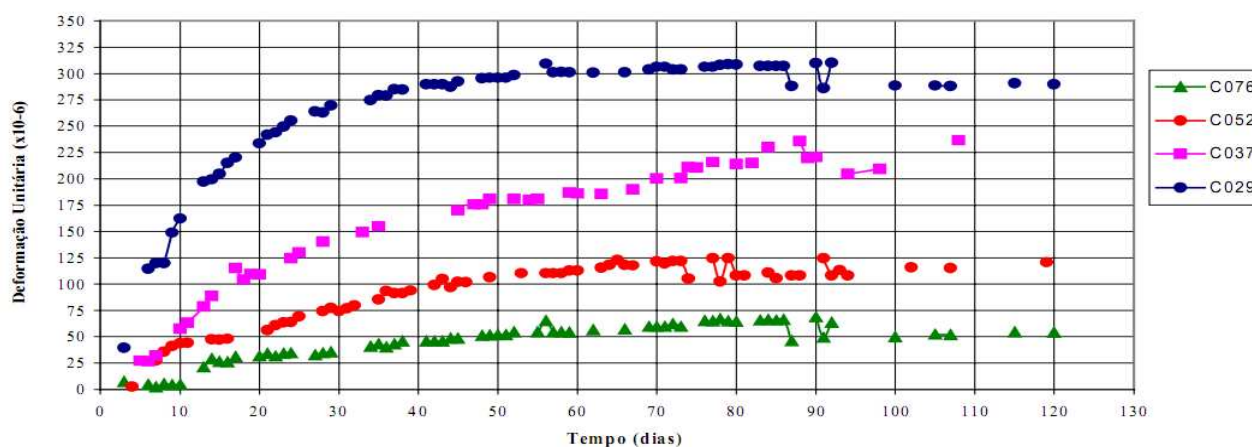


Figura 13 Variação da retração autógena em função da idade (KALINTZINS e KUPERMAN, 2001).

TAVARES (2008) estudou a retração autógena em concretos de alto desempenho em função, principalmente, do tipo, teor e combinações binárias e

ternárias de diferentes adições empregadas (escórias de alto forno, metacaulim e sílica ativa) e encontrou os resultados mostrados na Figura 14. Os cinco traços estudadas são mostrados na Tabela 11.

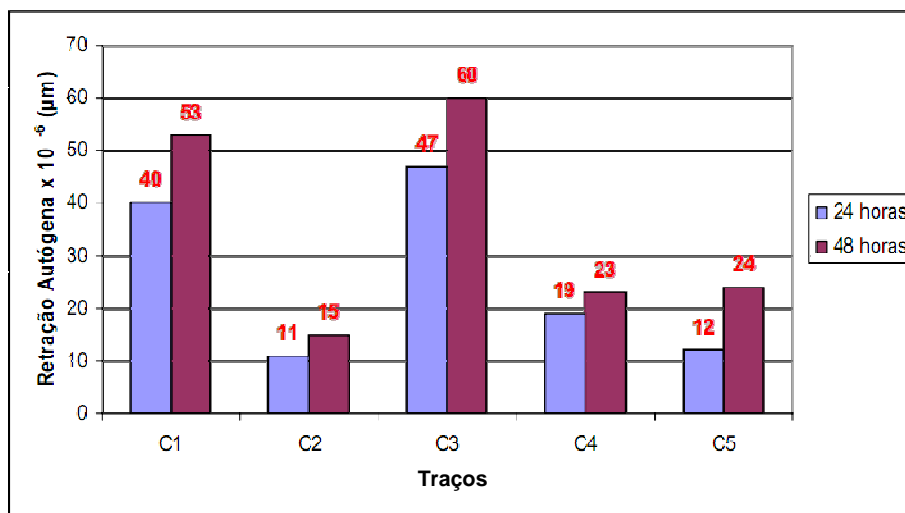


Figura 14 Retração autóloga de cinco traços (TAVARES, 2008).

Tabela 5 Traços (TAVARES, 2008).

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de alto forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de alto forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita n.º1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Relação água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

O concreto C2, que apresentou melhor comportamento em relação a esta propriedade dentre os analisados, com 48 horas apresentou retração de 15×10^{-6} . Será visto no Capítulo IV que o CCG apresentou retração menor.

FARIA (2012) analisou a estabilidade dimensional de um concreto autoadensável de alto desempenho com um catalisador chamado Ecat (do inglês

Equilibrium Catalyst) que, segundo o pesquisador, é semelhante ao metacaulim. O ensaio de retração autógena teve como melhor resultado o valor de 225×10^{-6} aos 120 dias.

BALTHAR (2004) realizou ensaios de retração autógena em pastas com substituição parcial do cimento por metacaulinita e sílica ativa e encontrou aos 120 dias retração igual a $1,37 \times 10^{-3}$ e $1,32 \times 10^{-3}$, respectivamente.

Todos os resultados citados foram considerados muito bons, e serviram de parâmetro para confirmar que o CCG apresenta retração autógena menor que o CCP.

2.5.5 – RETRAÇÃO HIDRÁULICA

KALINTZINS e KUPERMAN (2001) explicam que a retração por secagem ou hidráulica está associada à perda de umidade para o meio ambiente, o que a torna uma das principais causas de fissuração da matriz e faz com que assuma papel importante, pois sua ocorrência pode afetar a durabilidade do concreto.

A retração do CCP ocorre devido às reações químicas, evaporação da água capilar e carbonatação de produtos decorrentes da hidratação do cimento, entre as principais causas. No concreto geopolimérico, como existem pouquíssimos hidratos ou capilares presentes, a retração por secagem é muito baixa.

KALINTZINS e KUPERMAN (2001) encontraram, para CCP com relação a/agl igual a 0,37 e 0,52 e resistência à compressão de 65 e 46,5 MPa, valores de retração hidráulica iguais a $354,2 \times 10^{-6}$ e $355,2 \times 10^{-6}$ aos 28 dias, respectivamente.

LI *et al.* (2005) mediram a retração por secagem de prismas de argamassa de cimento Portland e argamassa de cimento geopolimérica com relação água-cimento igual a 0,34 para a primeira amostra e igual a 0,34 a 0,42 para as demais, conforme mostra a Figura 15. A retração por secagem das três argamassas de CG foi menor do que a da argamassa de CP.

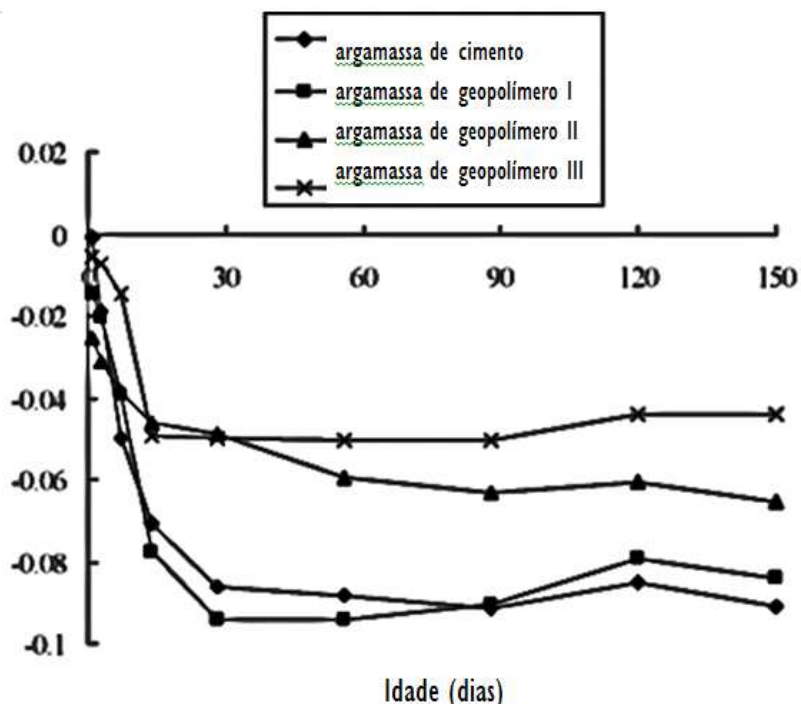


Figura 15 Retração por secagem de argamassa de cimento portland e de argamassas de cimentos geopoliméricos (LI *et al.*, 2005)

SILVA (2004) *apud* MEIRA (2009) estudou argamassas moldadas com CPV-ARI com adição de cinza de casca de arroz, em substituição ao cimento portland, nos teores de 5 e 10% e as retrações encontradas aos 28 dias foram 3×10^{-5} e 7×10^{-5} , respectivamente. Tais resultados foram considerados excelentes. No entanto, o CCG estudado nesta dissertação apresentou resultados ainda melhores.

Ao contrário do CCP que utiliza a formação de hidratos de cálcio para a formação da matriz, O CCG envolve a reação química de alumino-silicatos induzida por um ativador alcalino para formar um gel. Este gel liga os agregados aos outros materiais da mistura. A água presente na mistura não é utilizada para ativar as reações de pega e sim para dar trabalhabilidade apenas. Portanto, a relação líquido/ sólido pode ser reduzida, o que contribui para uma menor retração. Além disso, os materiais de elevada finura utilizados no fabrico do CCG, tais como o metacaulim, auxiliam na redução da retração, pois permitem uma maior coesão da matriz e melhor resistência às tensões de contração volumétrica.

2.5.6 – PERMEABILIDADE

O transporte de massa pelo interior do concreto ocorre através de um sistema interligado de poros. Um concreto poroso e permeável a fluidos e gases terá sua durabilidade e resistência afetadas pela ação de agentes agressivos.

O CCG oferece a vantagem de não sofrer processo de hidratação e, por consequência, não possuir zona de transição. No caso de aplicação em reparos, a interface reparo/matriz será menos permeável no vão do concreto de cimento geopolimérico, diminuindo assim a permeabilidade dessa região. Além disso, possui uma matriz densa como pouco poros interligados entre si.

NEVILLE (1997) *apud* FRIZZO (2001) esclarece que:

[...] “Um material é permeável quando permite a passagem de fluidos através de seus poros intercomunicáveis. O fluxo do fluido em meios porosos, como o concreto, ocorre por diferença de pressão entre dois pontos considerados e é um fenômeno que ocorre de acordo com a Lei de Darcy.” [...]

Explica ALVES (1993):

[...] “Segundo a Lei de Darcy, o caminho percorrido por um fluido através de um meio poroso desvia-se de forma errática, mas ligeiramente na forma de curvas contínuas, denominadas linhas de fluxo. No concreto, as linhas de fluxo seguem a porosidade intercomunicável da pasta através das microfissuras e nas falhas de aderência entre a pasta e os grãos do agregado graúdo. A permeabilidade dos agregados é muito baixa, tendo pouca influência na permeabilidade do concreto.” [...]

Dentro desse contexto, PETRY (2004), ao considerar que não há um método geral que caracterize e relacione a estrutura dos poros com a durabilidade de concretos com alto teor de cinza volante, afirma que a permeabilidade dos mesmos à água pode ser adotada como uma das medidas de durabilidade potencial do mesmo.

Para METHA (1989), o emprego de adições minerais no CCP altera a microestrutura da pasta de cimento portland, reduzindo a permeabilidade e reforçando a zona de transição, onde microfissuras na interface com os agregados formam caminhos para a passagem dos fluidos. SOUSA COUTINHO

(1974) *apud* FRIZZO (2001) diz que a utilização de pozolanas confere ao CCP concreto baixos coeficientes de permeabilidade, resultado que não se obtém com o aumento da dosagem de cimento portland. Este fenômeno foi também verificado com o CCG deste estudo, pelo uso do metacaulim.

THOMAZ (2000) *apud* PEREIRA *et al.* (2005) realizou um estudo da distribuição de cálcio na zona da interface agregado/matriz do CCG em que não constatou a presença de gradientes de concentração de cálcio. Este fato indica a inexistência da zona de transição entre agregado e matriz no geopolímero. A Figura 16 mostra a homogeneidade entre o agregado e a matriz.

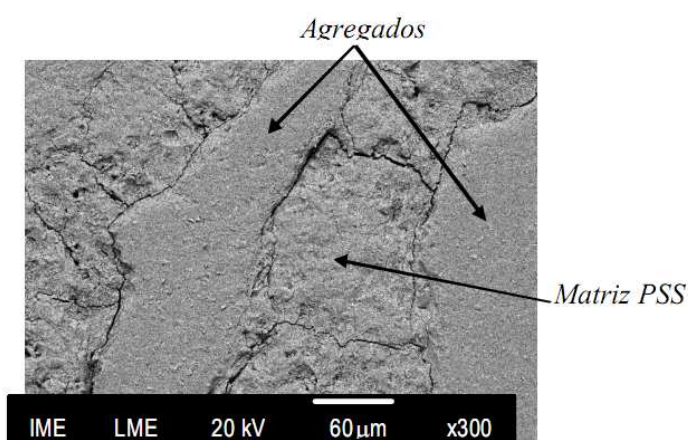


Figura 16 Imagem do CCG aos 720 dias de idade e $a/c=0,384$ (PEREIRA *et al.*, 2005).

SILVA (1995) afirma que:

[...] “Durante o período inicial da hidratação dos concreto convencionais, a zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração, devido às deformações diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, induzidas geralmente por retração por secagem, retração térmica e cargas externas aplicadas prematuramente. As fissuras na zona de transição são pequenas, porém mais largas que a maioria dos poros capilares presentes na matriz da pasta e assim colaboram ao estabelecer as interconexões, que aumentam a permeabilidade do sistema.” [...]

Alguns resultados de estudos sobre a permeabilidade de concretos à base de CP serão fornecidos a fim de estabelecer parâmetros para posterior comparação com o CCG desta pesquisa.

GOMES *et al.* (2003) realizaram ensaios de permeabilidade segundo a NBR 10786/89, em testemunhos extraídos da estrutura da ponte Vitória/Vila

Velha, no Espírito Santo, visando avaliar o estado de conservação e durabilidade da mesma. Encontraram resultados que variaram entre 1×10^{-7} a $9,7 \times 10^{-8}$ m/s.

MARSH *et al.* (1985) *apud* TAYLOR (1990) encontrou permeabilidade igual a 1×10^{-15} m/s para uma argamassa de CP com relação líquidos/sólidos de 0,47 e 30% de substituição do CP por cinza volante, curada a 20°C por um ano. A argamassa correspondente de cimento portland puro apresentou permeabilidade de $1 \times 10^{-11,7}$ m/s. A permeabilidade do basalto denso é de $2,47 \times 10^{-12}$ m/s, mostrando-se mais permeável que o concreto de cimento geopolimérico avaliado neste estudo.

2.5.7 – POROSIDADE

A porosidade do concreto está ligada ao índice de vazios e à absorção de água. O ensaio de absorção total de água por imersão permite definir esse índice e, também, a massa específica do concreto endurecido. O índice de vazios é uma propriedade relacionada diretamente à durabilidade do material, pois implica na capacidade do mesmo de resistir às ações climáticas, aos ambientes com agentes agressivos e a outros processos de deterioração (FARIA, 2012).

Segundo o CEB (1992) *apud* FRIZZO (2001), a estrutura dos poros e fissuras do concreto e mecanismo de transporte de fluidos são os fatores que governam os fenômenos químicos e físicos que afetam a durabilidade do concreto, de acordo com o esquema apresentado na Figura 17.

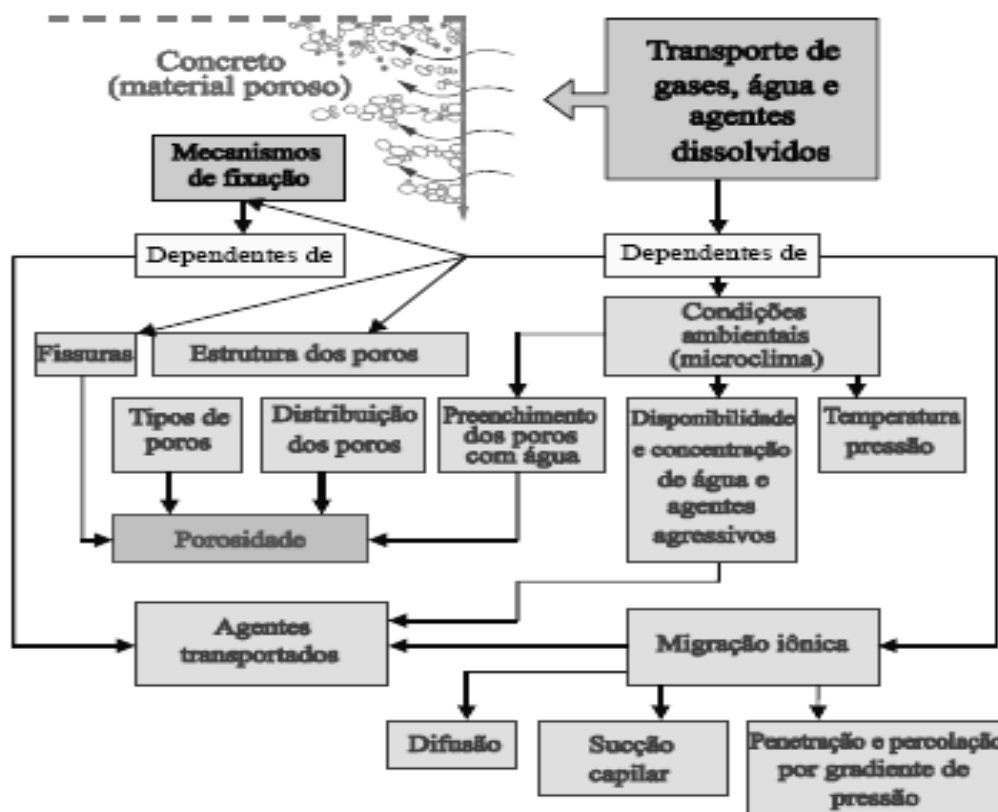


Figura 17 Fenômenos de transporte de massa no concreto (FRIZZO, 2001).

DOURADO e COSTA (2009) realizaram ensaios de absorção baseados na mesma norma, com um CCP de traço 1:2,48:3:0,60 e com aditivo Chryso plast 777 em proporção de 0,45%. Foram utilizados cimentos CP II-F-32 (composto com filer) e CP II-Z-32 (composto com pozolana), que obtiveram absorção de 4,30% e 5,48%, índice de vazios igual a 9,8% e 12,4% e massa específica real de 2,52 e 2,57 g/cm³, respectivamente.

BAUER *et al.* (1999) realizaram ensaios, também conforme a NBR 9778/2005, para determinação da absorção com vários traços e tipos de cimento. O que mais se aproximou do traço utilizado no presente trabalho foi o traço A = 1:1,77:2,79:0,48, onde foi utilizado o cimento CP II E-32. Os resultados obtidos em média foram 4,7% de absorção e 10,6% o índice de vazios.

O CCG de uma forma geral apresenta estrutura mais densa em relação ao CCP, conforme mencionado anteriormente. A diferença entre processo de formação da matriz do CCP e do CCG contribui para que a porosidade do CCG seja menor. No entanto, o concreto geopolimérico fabricado para este

experimento, mostrou ser mais poroso que os concretos à base de cimento portland citados neste tópico. Os motivos que levaram a tal resultado serão discutidos no Capítulo IV.

2.5.8 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ALTA RESISTÊNCIA INICIAL)

A resistência à compressão pode ser considerada a característica mais importante do concreto. No CCG, que é um ligante álcali-ativado, as propriedades mecânicas dependem da relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ no ativador alcalino e da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e teores de cálcio no material de origem, conforme citado por YANG (2007). Oliveira (2005) *apud* SKAF (2008) afirma que na microestrutura do cimento Portland são formadas diferentes fases, sendo algumas cristalinas, de baixa resistência e porosidade elevada, o que faz com que as resistências dessas fases na matriz de cimento Portland sejam muito inferiores às do geopolímero.

HARDJITO et al. (2004) *apud* SKAF (2008) mostraram os efeitos de vários parâmetros na resistência à compressão do CCG à base de cinza volante com baixo teor de cálcio. Os principais parâmetros que afetam a resistência à compressão do CCG, coletados através da análise de numerosas misturas de concreto geopolimérico produzidas e testadas em laboratório por estes autores, são citados abaixo:

- Razão $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ - esta razão deve estar entre 2,0 e 3,5;
- Razão ativadores alcalinos / matéria-prima (cinza volante) em massa;
- Concentração molar de NaOH na faixa de 8 a 16 M;
- Razão silicato de sódio/ hidróxido de sódio – o efeito deste parâmetro depende da composição da solução de silicato de sódio;
- Temperatura de cura na faixa de 30 a 90°C;
- Tempo de cura na faixa de 6 a 96 horas;
- Teor de água na mistura.

MAZZA (2010) afirma que o cimento geopolimérico pode apresentar uma resistência elevada em um curto período de tempo a temperatura ambiente. Na maioria dos casos estudados, 70% da resistência é desenvolvida nas primeiras 12 horas.

GOURLEY e JOHNSON (2005) afirmam que, em geral, a taxa de aumento de resistência em função do tempo é muito maior para concretos geopoliméricos do que para concretos de cimento Portland, simplesmente porque no primeiro ocorre um processo de polimerização induzido pelo calor, enquanto que no segundo, o calor acelera o processo de hidratação.

Diferente do processo químico do cimento Portland, o rápido processo de polimerização do geopolímero faz com que ele adquira alta resistência à compressão logo nas primeiras idades (SKAF, 2008).

Segundo KHALE e CHAUDHARY (2007) *apud* SKAF (2008):

[...] “Os geopolímeros possuem alto ganho de resistência inicial. Os geopolímeros se diferem substancialmente do cimento Portland pelo fato de obterem a integridade estrutural a partir de um caminho de reação totalmente diferente. Os cimentos Portland pozolânicos dependem da presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) para a formação da matriz e ganho de resistência, enquanto os geopolímeros utilizam a policondensação dos precursores de sílica e alumina (cinza volante, caulim, metacaulim, entre outros) e um alto teor de álcali para atingirem resistência estrutural – os argilominerais reagem durante o tratamento alcalino e formam aluminossilicato hidratado.” [...]

SKAF (2008) estudou a influência de matérias primas diferentes na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos. Os resultados confirmaram que o cimento geopolimérico é capaz de adquirir altas resistências nas primeiras horas de cura. O processo de polimerização do geopolímero ocorre em curto espaço de tempo e é responsável pela alta resistência à compressão nas primeiras idades. No caso dos compósitos com cimento portland, o ganho de resistência ocorre de forma diferente dos geopolímeros, sendo de acordo com o seu processo de hidratação (mais lento que o da geopolimerização).

SILVA *et al.* (2002) encontrou no concreto geopolimérico com adição de pozolana artificial resistências à compressão superiores a 45 MPa obtidas em poucas horas, superando todos os tipos de cimento portland, inclusive os de alta resistência inicial (ARI).

DAVIDOVITS (1994a) relata que a equipe de James Sawyer adaptou formulações de cimento geopolimérico para ser usado na fabricação de pré-moldados e que, ao mesmo tempo, apresentasse alta resistência inicial quando

curado à temperatura ambiente. O concreto de cimento geopolimérico desenvolvido e patenteado permitiu a colocação de um pavimento para tráfego pesado o qual foi liberado para uso em 4 horas.

Portanto, o CCG, além de alcançar elevada resistência à compressão, atinge-a nos primeiros dias. Essa é uma característica vantajosa em relação aos CCP visto que, em muitas aplicações é necessária a liberação das estruturas para uso logo após a concretagem.

SILVA *et al.* (2002) comparou as resistências à compressão alcançadas, em função da idade, do cimento PSS (polissialato ou geopolimérico), do cimento portland composto, CPIIE-32 e do cimento portland de alta resistência inicial, ARI; conforme mostra a Figura 18. Como observado, o cimento PSS ou CG, quando curado a 65°C por 4 horas, atinge resistência à compressão da ordem de 45 MPa. Esse mesmo nível de resistência é atingido aos 3 dias de idade, quando curado sob temperatura ambiente (22°C). O CCG desta pesquisa alcançou resistência próxima a do cimento ARI curado em temperatura ambiente.

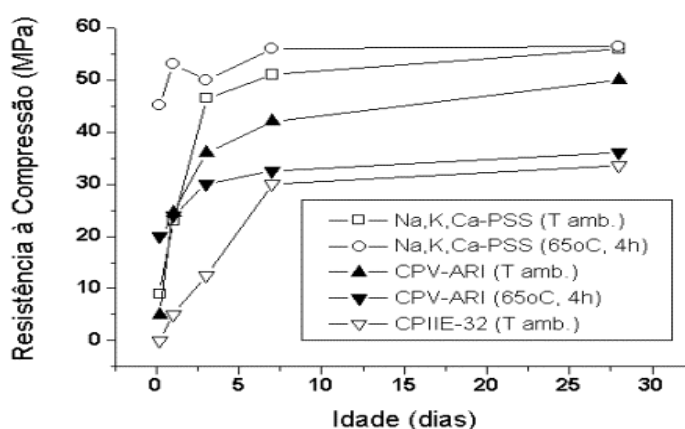


Figura 18 Variação da resistência à compressão da argamassa Normal, em função do tempo, do cimento Na,K,Ca-PSS, CPIIE-32 e CPV ARI. (SILVA *et al.*, 2002).

SKAF (2008) relata os diferentes resultados encontrados em ensaios de resistência à compressão de outras pesquisas com concretos à base de CG:

- THOMAZ (2000) *apud* SOARES (2006) encontrou 59,0 MPa de resistência à compressão para CCG à base de metacaulim 28 dias;

- SILVA (2006) *apud* SOARES (2006) obteve resistências à compressão para o CCG à base de metacaulim de 29,23 MPa para a idade de 24 horas, 51,2 MPa para a idade de 7 dias e 55,9 MPa para a idade de 28 dias;
- PEREIRA (2006) *apud* SOARES (2006) encontrou para os CCG, na idade de 7 dias, resistência à compressão igual 51,2 MPa quando nenhum teor de fibras curtas de aço foi adicionado e 52,7 MPa quando 0,5% (em volume) de fibras foi adicionado.

2.5.9 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

NETO e HELENE (2002), em seus estudos sobre a relação entre dosagem e módulo de elasticidade de CCP, encontraram o valor desta propriedade igual a 25,5 GPa para o traço 1:1,15:2,84:0,53 (cimento:areia:brita:relação água-cimento) aos 28 dias, resultado inferior ao obtido com o CCG deste trabalho, mesmo levando-se em consideração a diferença dos traços. O traço do concreto analisado pelos pesquisadores é considerado um traço rico por conter um maior consumo de aglomerante em relação ao consumo de agregados; portanto, esperava-se que apresentasse maior resistência que o traço 1:2:3 utilizado neste estudo, considerado um traço normal. No entanto, será mostrado nos resultados desta pesquisa que o CCG, mesmo utilizando um traço com menor consumo de aglomerante, apresentou rigidez maior.

Na Figura 19 são apresentados os resultados obtidos por ARAÚJO (2000) para concretos feitos com agregado graúdo de gnaiss, mesma litologia utilizada neste estudo. Os pontos experimentais correspondem aos resultados obtidos com CCG de diversas barragens brasileiras. O parâmetro “s” é utilizado em fórmulas para previsão do módulo de elasticidade, levando-se em consideração a litologia do agregado graúdo de acordo as normas utilizadas. O número de pontos experimentais foi igual a 25.

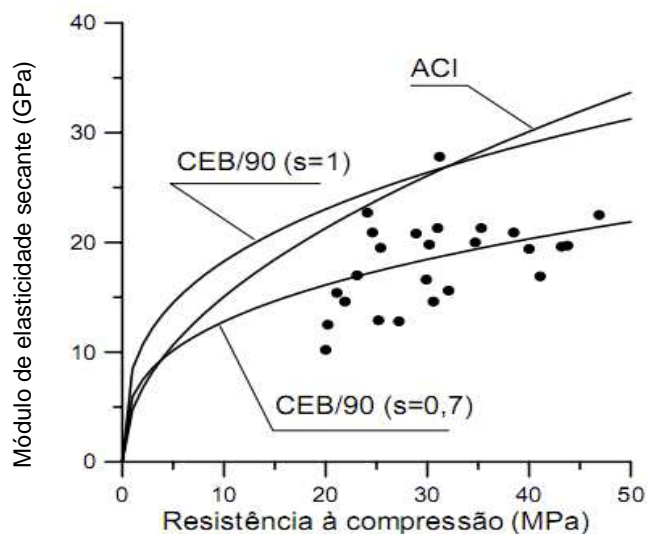


Figura 19 Variação do módulo de elasticidade secante em função da resistência à compressão - brita do tipo gnaiss (ARAÚJO, 2000).

De acordo com as curvas, o módulo de elasticidade esperado para um CCG de resistência igual a 40 MPa seria próximo de 30 GPa, no melhor dos casos. Este valor foi alcançado pelo concreto de cimento geopolimérico deste programa experimental.

THOMAZ (2000) analisou a microestrutura do CCG por microscopia eletrônica de varredura, verificando a inexistência da zona de transição na região próxima à interface dos agregados com a matriz geopolimérica e, também, a ausência de hidróxidos de cálcio nesta matriz, o que contribuiu para uma elevada rigidez do material. O autor também avaliou o módulo de elasticidade em função da resistência para concretos de CP e CG contendo agregado de gnaiss britado, como mostra a Figura 20 abaixo.

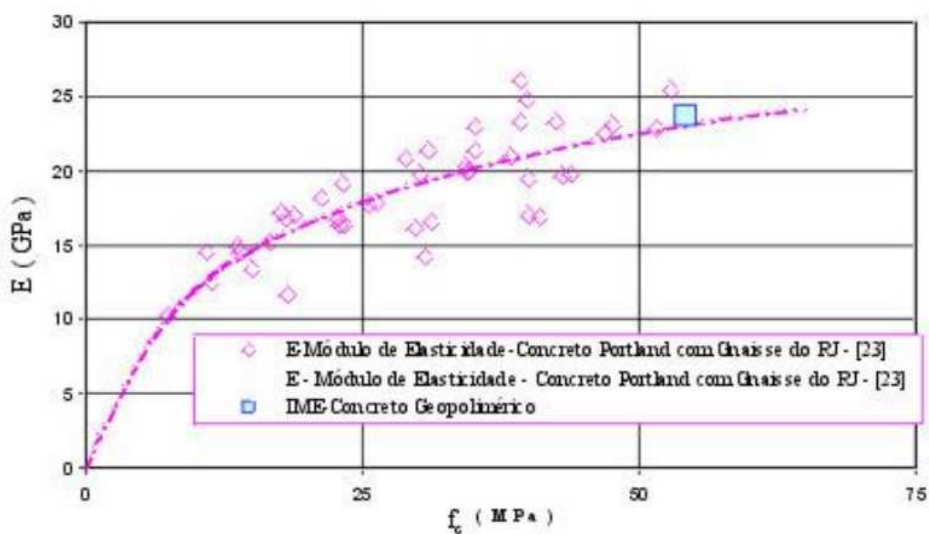


Figura 20 Módulo de Elasticidade (E) em função da resistência à compressão (f_c) para os concretos de cimento geopolimérico e portland, contendo agregado de gnaiss britado (THOMAZ, 2000).

Amostras de pastas e argamassas foram observadas por SILVA *et al.* (2000) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipado com espectrômetro de dispersão de energia (EDS) – Figuras 21 e 22, onde relata:

[...] “Foi constatado que a microestrutura do cimento poli(sialato-siloxo) é formado por uma única fase aluminossilicato de sódio, potássio e cálcio – Na,K,Ca-PSS (Figura 32)), sem quaisquer traços das fases comuns do cimento Portland hidratado (Figura 33). É sabido que a portlandita é a fase menos resistente do cimento Portland hidratado, sendo um subproduto da hidratação do C_3S e C_2S .” [...]

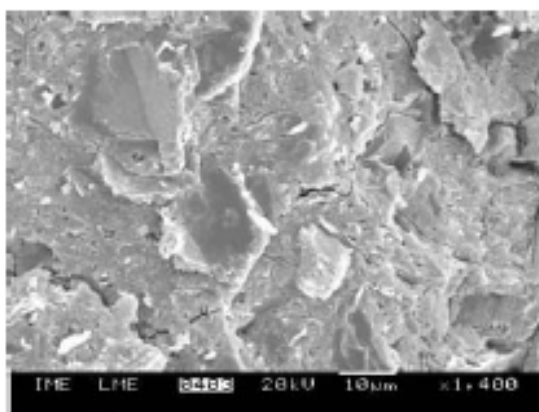


Figura 21 Micrografia (MEV) da pasta de Na,K,Ca-PSS - 1400X (SILVA *et al.*, 2000).

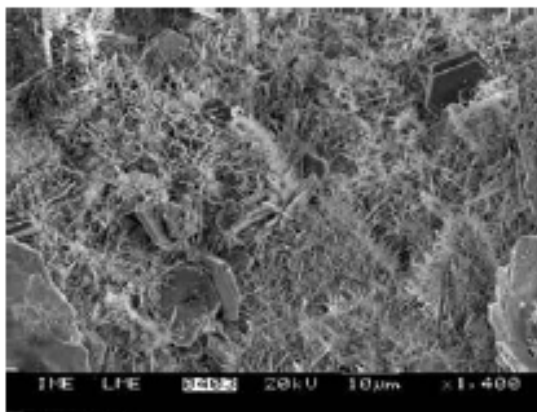


Figura 22 Micrografia (MEV) da pasta de CPIIE-32 aos 28 dias, relação $a/c=0,30$ - 1400X (SILVA *et al.*, 2000).

PEREIRA (2006) *apud* SKAF (2008) avaliou diversas propriedades mecânicas do CCG obtido a partir da combinação de metacaulim (como fonte principal de alumínio e silício), de cimento portland de alto-forno (como fonte de cálcio) e de uma solução alcalina composta por hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino reforçado com fibras de aço com baixo teor de carbono, onde relata:

[...] “Os resultados vantajosos sobre o concreto de cimento Portland foram atribuídos a maior capacidade de absorção de energia antes da fratura dos compósitos de cimento geopolimérico. Esta absorção está associada a sua microestrutura massiva de baixa porosidade e a melhor qualidade da interface fibra/matriz que apresentou maior compatibilidade do que a interface fibra/matriz dos compósitos de cimento Portland e a ausência de cristais fracos de portlandita.” [...]

Considerando que quanto maior é o módulo de elasticidade, maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação do material, nota-se que o CCG é mais rígido que o CCP. Sabe-se também que o módulo de elasticidade do concreto é afetado pela microestrutura da zona de transição pasta-agregado. A ausência de portlandita no concreto de cimento geopolimérico, em comparação aos concretos de cimento portland, possibilita maior adesão entre a matriz e os agregados, conferindo maior módulo de elasticidade. A microestrutura do geopolímero baseado em metacaulim possui mais homogeneidade e poros menores. Esta observação tem forte correlação com o módulo de elasticidade e com elevados valores de resistência à compressão (DIAS, 2001).

Fisicamente, o concreto de cimento portland representa um material poroso, sem continuidade de massa em que, segundo SILVA *et al.* (2000):

[...] “Independente das adições minerais (pozolanas), os principais produtos da hidratação são o C-S-H e a portlandita, enquanto que nos polissialatos, não há formação de fases distintas, sendo formado inteiramente por uma microestrutura massiva, sem morfologia definida e com composição semelhante a das rochas.” [...]

Essas conclusões endossam a afirmativa de que o concreto de cimento geopolimérico tem maior capacidade de deformação do que o concreto de cimento portland.

2.6 – CONSTATAÇÕES A PARTIR DO REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico foram feitas considerações importantes sobre o CG e o CCG, assim como foram apresentadas determinadas propriedades do CCG, segundo descrições de diferentes autores. Em consequência, constatou-se o potencial do CG como aglomerante destinado à produção de concretos (CCG) e argamassas, de características vantajosas com relação aos produtos similares, existentes, à base de CP.

Entretanto, considerando o objetivo desta dissertação, a seguir são descritos procedimentos do programa experimental os quais visam apresentar e avaliar outras propriedades importantes do CCG, ainda pouco estudadas, como: retração (autógena e hidráulica), permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - MATERIAIS

O geopolímero utilizado foi do tipo M-PSS (onde M = Na⁺, K⁺ e Ca⁺⁺), obtido a partir da combinação de metacaulim (como fonte principal de alumínio e silício), de cimento Portland (CP III-32) composto com adição de escória de alto forno, como fonte de cálcio, e de uma solução alcalina que funciona como ativador, composta por hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino. O silicato de sódio (Na₂SiO₃) foi utilizado como fonte extra de silício para que a relação SiO₂/Al₂O₃ no cimento geopolimérico fosse maior do que 3. As prescrições normativas e procedimentos usuais para materiais à base de cimento portland foram utilizados como critério para caracterização dos materiais.

A parte sólida do cimento geopolimérico é composta pelo metacaulim, cimento portland, hidróxido de potássio e 49% do consumo de silicato de sódio. A parte líquida é constituída da água e de 51% do silicato de sódio. O cálculo das quantidades foi feito em função da razão molar para maior precisão do traço do CG, já que a aplicação do geopolímero depende da relação Si:Al.

A Tabela 6 mostra a composição química e as características físicas do cimento portland utilizado.

Tabela 6 - Composição química e características físicas do cimento portland (marca Cauê, Camargo Corrêa).

Propriedades		Resultado	Limites NBR 5735/91
Massa específica (g/cm ³)		2,97	---
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	0,5	≤ 8,0
	Resíduo na peneira 325 (%)	4,4	---
	Área específica (cm ² /g)	4.300	---
Tempo de pega (h:min)	Início	4:00	≥ 1:00h
	Fim	5:40	≤ 12:00h
Água de consistência - pasta (%)		29,6	---
Expansão em autoclave (%) (Norma ASTM C-151)		0,0	≤ 0,8
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	15,3	≥ 10,0
	7 dias	24,2	≥ 20,0
	28 dias	37,3	≥ 32,0 / ≤ 49,0
	90 dias		≥ 40,0
Calor de hidratação Calor de hidratação (J/g)	3 dias	196,0	---
	7 dias	201,7	---
	28 dias		---

Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	1,54	≤ 4,5	
	Resíduo insolúvel	0,92	≤ 1,5	
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,28	≤ 4,0	
	Óxido de magnésio (MgO)	4,36	≤ 6,5	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	28,50	---	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	1,59	---	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	7,58	---	
	Óxido de cálcio (CaO)	52,51	---	
	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,0	---	
	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,25	---
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,70	---
		Equiv. alcalino	0,71	---
	Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,05	---
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,34	---
		Equiv. alcalino	0,27	---
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	3,38	---		
Teor de escória	54	≥ 35 e ≤ 70		
Anidrido carbônico (CO ₂)			≤ 3,0	
Cloretos solúveis em água		0,001		
Teor de enxofre na forma de sulfeto		0,46	≤ 1,0	

Os resultados das análises física e química do silicato de sódio alcalino e do hidróxido de potássio utilizado na fabricação da solução alcalina são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 Análise química e física do silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio. Dados fornecidos pelos fabricantes.

Silicato de sódio alcalino	
SiO ₂ (%)	32,2
Na ₂ O (%)	15,0
H ₂ O (%)	52,5
Relação (SiO ₂ /Na ₂ O)	2,2
Densidade (g/cm ³)	52,5
Viscosidade a 20°C	1.100
Hidróxido de potássio	
K ₂ O(%)	71,7

Para SOARES (2006), embora a maioria dos metacaulins comerciais contenha impurezas, tais como quartzo, muscovita e minerais ferro-titaníferos, o efeito destas impurezas é limitado, tanto pela baixa dissolução quanto pela falta de habilidade dos produtos de suas dissoluções afetarem o mecanismo de formação do geopolímero. A Tabela 8 mostra a caracterização do metacaulim utilizado neste trabalho, fornecida pelo fabricante.

Tabela 8 Composição química e características físicas do metacaulim (Metacaulim do Brasil)

Propriedades		Resultado	Limites NBR 5735/91		
Massa específica (g/cm ³)		2,62			
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)		≤12		
	Resíduo na peneira 325 (%)				
Área específica (cm ² /g)			≥ 2600		
Tempo de pega (h:min)	Início		≥ 1:00		
	Fim		≤ 10:00		
Água de consistência - pasta (%)					
Expansão em autoclave (%) (Norma ASTM C-151)			≤ 0,8		
Resistência à compressão (MPa)	3 dias		≥ 10		
	7 dias		≥ 20		
	28 dias		≥ 32 e ≤ 49		
	90 dias				
Calor de hidratação (J/g)	3 dias				
	7 dias				
	28 dias				
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo		3,41	<6,5	
	Trióxido de enxofre (SO ₃)		0,04	<4,0	
	Óxido de magnésio (MgO)		0,69	<6,5	
	Dióxido de silício (SiO ₂)		54,58		
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,40		
	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		33,19		
	Óxido de cálcio (CaO)		0,91		
	Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)		2,19	
		Óxido de potássio (K ₂ O)		2,31	
		Equiv. alcalino		3,71	
	Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)			
		Óxido de potássio (K ₂ O)			
		Equiv. alcalino			
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)				
Teor de escória					
Anidrido carbônico (CO ₂)			≤ 5,0		
Cloretos solúveis em água					
Teor de enxofre na forma de sulfeto			≥ 6,0 e ≤ 34,0		

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de rio, lavada e seca em estufa, aproveitando-se todo o material passante na peneira de 4,8 mm. Os resultados da caracterização da areia estão descritos na Tabela 9.

A distribuição granulométrica da areia expressa em termos das porcentagens retidas acumuladas foi enquadrada na zona utilizável.

Tabela 9 Caracterização do agregado miúdo.

Descrição	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	2,62
Absorção (%)	0,80
Módulo de finura (areia grossa)	2,43
Diâmetro máximo (mm)	4,75

O agregado graúdo utilizado foi uma brita, identificada como gnaisse, por ensaio petrográfico. Os resultados da caracterização da brita estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 Caracterização do agregado graúdo.

Descrição	Resultado
Massa específica	2,80
Absorção (%)	0,60
Módulo de finura	6,97
Diâmetro máximo (mm)	19

A distribuição granulométrica da brita atendeu os limites das porcentagens retidas acumuladas para a zona granulométrica $d/D = 9,5/25$.

3.2 - MÉTODOS

O concreto de cimento geopolimérico deste estudo foi produzido no Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A., localizado na cidade de Aparecida de Goiânia – GO, em março de 2012, sob a supervisão do Eng^o Ricardo Barbosa Ferreira e da autora deste trabalho. Foi utilizada a seguinte seqüência de mistura dos materiais, em razão das reações químicas que ocorrem

entre os mesmos. Os passos 1 a 6 foram realizados em recipientes à parte, fora da betoneira.

- 1) pesagem da água;
- 2) pesagem do hidróxido de potássio (KOH);
- 3) dissolução do KOH na água,
- 4) pesagem do silicato de sódio alcalino;
- 5) dissolução da mistura KOH + água no silicato de sódio alcalino;
- 6) resfriamento da mistura a temperatura ambiente;
- 7) mistura do material seco na betoneira: metacaulim + cimento Portland + areia até alcançar homogeneidade;
- 8) introdução da parte líquida na betoneira (materiais envolvidos até o passo 6);
- 9) mistura na betoneira por mais 3 min;
- 10) adição da água restante;
- 11) introdução da brita na betoneira em movimento.

A moldagem dos corpos de prova foi feita de acordo com a NBR 5738/2003. Foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm e 3 de dimensões 15x30 cm para o ensaio de permeabilidade, 4 corpos de prova prismáticos de dimensões 10x10x30 cm, instrumentados com extensômetros elétricos para posterior leitura da variação dimensional.

As idades escolhidas para execução dos ensaios foram as seguintes:

- ensaio de resistência à compressão – 7 e 28 dias;
- módulo de elasticidade – 7 e 28 dias;
- índice de vazios, massa específica, absorção – 7 e 28 dias;
- permeabilidade – 7 e 28 dias;
- retração hidráulica – 1-120 dias;
- retração autógena – 1-90 dias.

O traço CCG escolhido foi 1:2:3 (CG:areia:brita) baseado em trabalhos anteriores já realizados no Instituto Militar de Engenharia e nesta Universidade por outros pesquisadores (SOARES, 2006; DIAS, 2001). Este traço sempre resultou em CCG com boas características. A relação água/aglomerante foi de

0,44. A água adicionada no fim da mistura foi colocada aos poucos, com medidas previamente conhecidas, enquanto se observava a consistência do concreto. A Figura 23 mostra os corpos de prova moldados.



Figura 23 Corpo de prova moldados.

Percebe-se que este concreto tem um tom avermelhado. Essa coloração se deve ao metacaulim. Existem vários tipos de metacaulim no Brasil que diferem entre si basicamente pela composição química e mineralógica. O tom avermelhado é devido ao elevado teor de óxido de ferro (Fe_2O_4), o que não contribui para melhores propriedades do concreto; porém, tendo em vista que isto pode ocorrer com metacaulins de diversas marcas disponíveis no mercado, buscou-se facilitar a reprodução dos ensaios e simular uma possível produção em larga escala.

As Figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, a medição do abatimento do tronco de cone que foi igual a 8 cm e o adensamento do concreto.



Figura 24 Abatimento do tronco de cone.



Figura 25 Adensamento do concreto.

Foi realizado o ensaio de determinação do ar pelo método pressiométrico (NBR 11686/1990) e medida a temperatura do concreto no estado fresco. A Figura 26 mostra a medição da temperatura.



Figura 26 Medição da temperatura do concreto.

Foram realizados ensaios para a determinação das seguintes propriedades: retração autógena e hidráulica, permeabilidade, absorção de água, índice de vazios, massa específica real, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. Os ensaios seguiram as normas comumente utilizadas para o concreto à base de cimento Portland.

A moldagem e a cura dos corpos de prova foi executada de acordo com NBR 5738/2003. Foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm e 3 de dimensões 15x30 cm, além de 4 corpos de prova prismáticos de dimensões 10x10x30 cm instrumentados com extensômetros tipo Carlson, modelo KM 120, para medir a retração. A Figura 27 mostra as formas prismáticas antes da moldagem.



Figura 27 Formas instrumentadas das para ensaios de retração.

O ensaio de resistência à compressão e para determinação do módulo de elasticidade à compressão foi realizado, respectivamente, segundo as normas NBR 5739/2007 e NBR 8522/2008, aos 7 e 28 dias. Para a determinação do módulo de elasticidade foram fixados extensômetros de forma que os pontos de medição ficassem equidistantes dos extremos dos corpos-de-prova, com tolerância de ± 5 mm. O carregamento foi constante de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s até a ruptura, no regime elástico, ou seja, até 30% da carga de ruptura. Neste nível de carregamento, os extensômetros para determinação do módulo de elasticidade foram retirados e seguiu-se com o carregamento até a ruptura para determinação da tensão máxima. A Figura 28 mostra o esquema do ensaio de resistência à compressão conforme NBR 5739/2007. A Figura 29 mostra o esquema do ensaio de determinação do módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522/2008.



Figura 28 Ensaio de resistência à compressão - NBR 5739/2007.
(Laboratório de Concreto de Furnas)



Figura 29 Realização de ensaio de módulo de elasticidade utilizando extensômetro elétrico Carlson.(Laboratório de Concreto de Furnas)

Os ensaios para determinação do índice de vazios, massa específica real e absorção de água do concreto no estado endurecido foram regidos pela NBR 9778/2009, aos 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram previamente secos em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 72 h e em seguida foi determinada a massa dos mesmos (m_s). Após isto, as amostras foram submergidas em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e mantidos durante 72 h nesta condição. Completada esta etapa de saturação, os corpos de prova foram colocados em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levado à ebulição durante um período de 5 h, mantendo aproximadamente constante o volume da água. Em sequência, a água foi deixada a esfriar naturalmente a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. A massa novamente foi determinada com auxílio de balança hidrostática (m_i). Os corpos de prova foram retirados e secos com pano úmido e mais uma vez pesados (m_{sat}). Através das determinações feitas e de expressões padronizadas obteve-se a absorção de água, o índice de vazios, a massa específica seca e saturada e a massa específica real. Na Tabela 11 são mostradas as equações utilizadas para o cálculo destas propriedades.

Tabela 11 Equações utilizadas no cálculo da absorção, índice de vazios e massa específica.

Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica (kg/dm ³)		
		Seca	Após saturação e fervura	Real
$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100$	$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100$	$\frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i}$	$\frac{M_{\text{sat}}}{M_{\text{sat}} - M_i}$	$\frac{M_s}{M_s - M_i}$

A determinação do coeficiente de permeabilidade à água foi realizada segundo a NBR 10786/1989. A norma exige que o tamanho dos corpos de prova cilíndricos seja de 15x15 cm, obtidos a partir de corpos de prova de 15x30 cm em número de 3 para cada idade. Porém, devido à pouca quantidade de material disponível, não se conseguiu que assim fosse feito para a primeira idade. Aos 11 dias após a moldagem, ocorreu o primeiro ensaio de permeabilidade com

resultado corrigido devido ao tamanho dos corpos de prova utilizados, que foram de 10x10 cm obtidos a partir de 3 corpos de prova de 10x20 cm. O ensaio de 28 dias não teve nenhuma alteração em relação ao que exige a norma.

A metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade à água sob altas pressões foi realizada através da utilização de um aparelho composto de unidades dotadas de um reservatório de água. O reservatório é equipado com um controlador de vazão que fornece a quantidade de água que saiu e percolou pelo corpo de prova. A extremidade superior do reservatório é conectada a uma tubulação, onde aplica pressão no sistema. A fonte de pressão pode ser a ar comprimido ou nitrogênio gasoso e fornece gradientes de pressão de até 3,5 MPa para cada unidade. A pressão é controlada por um manômetro que é colocado próximo ao reservatório de água, onde fica também a conexão com a fonte de água externa. Na extremidade inferior do reservatório de água fica a tubulação que vai até o bujão metálico que acondiciona o corpo de prova. Os bujões são dotados de paredes resistentes a pressões de até 4,0 MPa e possuem tampa aparafusada para evitar qualquer vazamento. Os corpos de prova têm dimensões de 15 cm de altura. Eles são obtidos serrando-se a região central de cilindros com dimensões de 15 x 30 cm. Na acomodação do corpo de prova no bujão é colocado material selante para preencher o espaço entre o corpo de prova e a parede do bujão, fazendo com que a água só passe pelo concreto. A vazão é determinada repetidas vezes nos demais dias. O ensaio completo de permeabilidade leva em torno de 500 horas. Um esquema do aparelho utilizado para realização deste ensaio é mostrado na Figura 20.

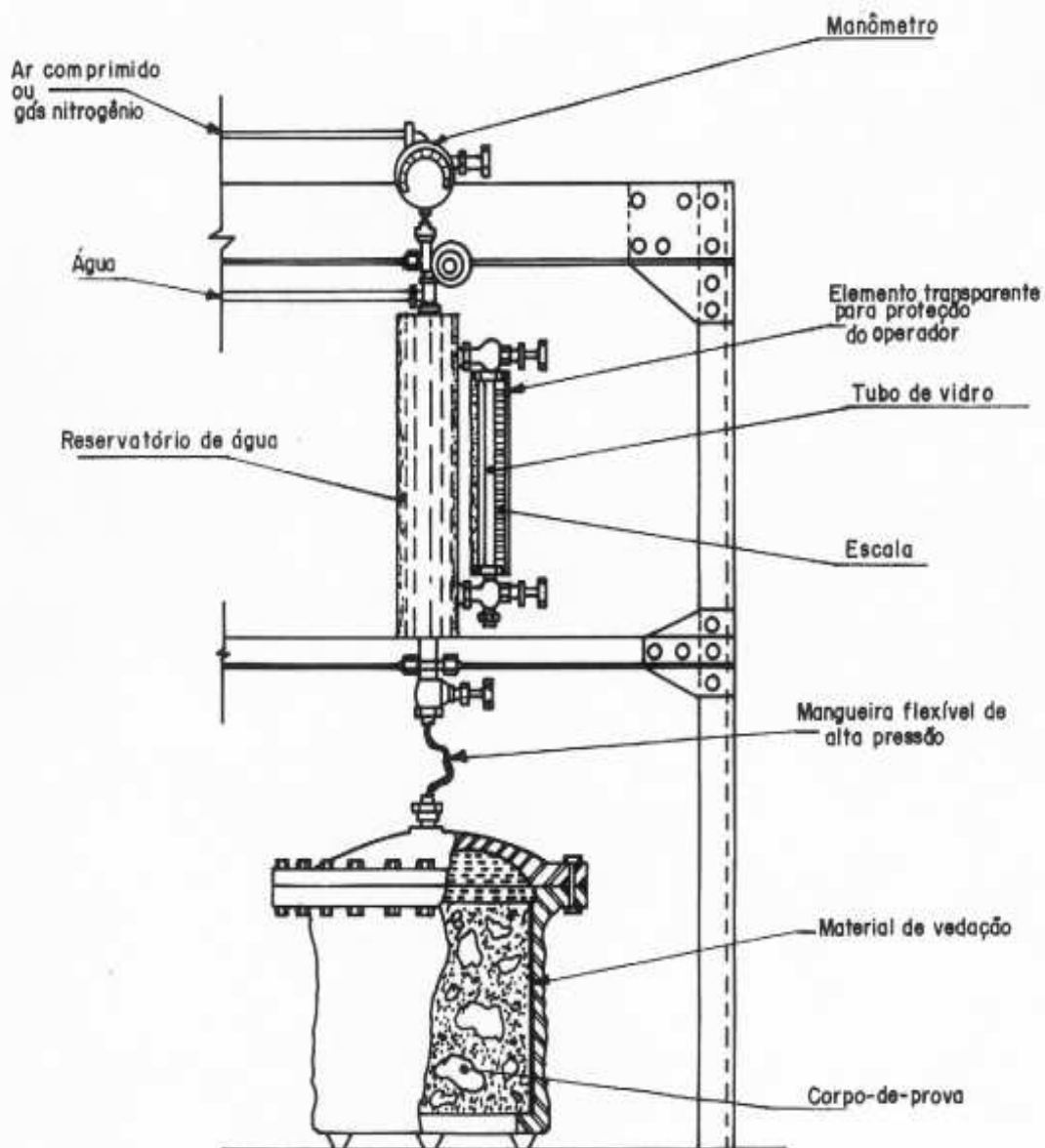


Figura 20 Esquema do aparelho para determinação da permeabilidade (NBR 10786/1989)

O coeficiente de permeabilidade deve ser calculado pela expressão:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H}$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

Q = vazão de entrada (cm³/s)

L = altura do corpo-de-prova (cm)

A = área da seção transversal do CP (cm²/s)

H = altura da coluna d'água correspondente à pressão utilizada (cm)

Com relação aos métodos para medição da retração existem vários, mas basicamente todos são baseados no mesmo princípio: os corpos de prova são moldados e são medidas as alterações de comprimento usando transdutores de deslocamento. Neste trabalho, o ensaio para determinação da retração hidráulica ou higrométrica foi conduzido segundo a NM 131/1997 durante o período do 1º ao 120º dia, quando se estabilizaram as alterações dimensionais. Após a moldagem, os prismas foram estocados em câmara úmida a $23,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar igual a 95%. Decorridos $24,5 \pm 0,5$ h, os corpos de prova foram removidos dos moldes e colocados em recipientes com água saturada de cal, à temperatura de $23,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$ por 30 minutos antes de se proceder à leitura do comprimento inicial. Após a leitura do comprimento inicial, os corpos de prova foram novamente estocados em recipientes com água, até a idade de 28 dias. Ao fim do período de cura foi tomada a segunda medida de comprimento. A seguir, os corpos de prova foram transferidos e estocados em sala climatizada ($23,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$) e com umidade relativa igual a $50 \pm 4\%$. Foram feitas leituras diárias até a estabilização das deformações.

A fórmula utilizada para calcular a variação do comprimento de cada corpo de prova foi a seguinte:

$$\Delta L = (\Delta L_x - \Delta L_i) \times 100 / L_g$$

onde,

ΔL – variação do comprimento na idade x, em porcentagem;

ΔL_x – é a leitura do comprimento com o corpo de prova na idade x, menos a leitura do comparador com a barra de referência à idade x, em milímetros;

ΔL_i – é a leitura inicial do comparador com o corpo de prova com a barra de referência no mesmo momento, em milímetros;

L_g – é a base da medida em função do tipo de comparador utilizado, em milímetros.

Os comparadores podem ser do tipo vertical, horizontal, de placa pivotada ou medidores elétricos. Neste estudo foram utilizados medidores elétricos do tipo Carlson.

O ensaio de retração autógena seguiu a norma americana ASTM_C1698/2009 e teve duração de 90 dias a contar da moldagem. Este método de ensaio (www.astm.org) mede a deformação volumétrica da pasta ou argamassa de cimento selada, incluindo as misturas que contêm vários materiais cimentícios suplementares, e outros materiais finos, a temperatura constante e não sujeito a forças externas, a partir do momento final da moldagem até uma idade especificada. Após a desforma, os corpos de prova são imediatamente envolvidos com três camadas de filme plástico. Esses corpos de prova são mantidos em sala climatizada com temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $55 \pm 5\%$ até o fim do ensaio. A Figura 31 e 32 abaixo mostram algumas etapas do ensaio de retração autógena.



Figura 31 Estocagem dos corpos-de-prova dentro de caixa plástica com água.
(Laboratório de Concreto de Furnas)

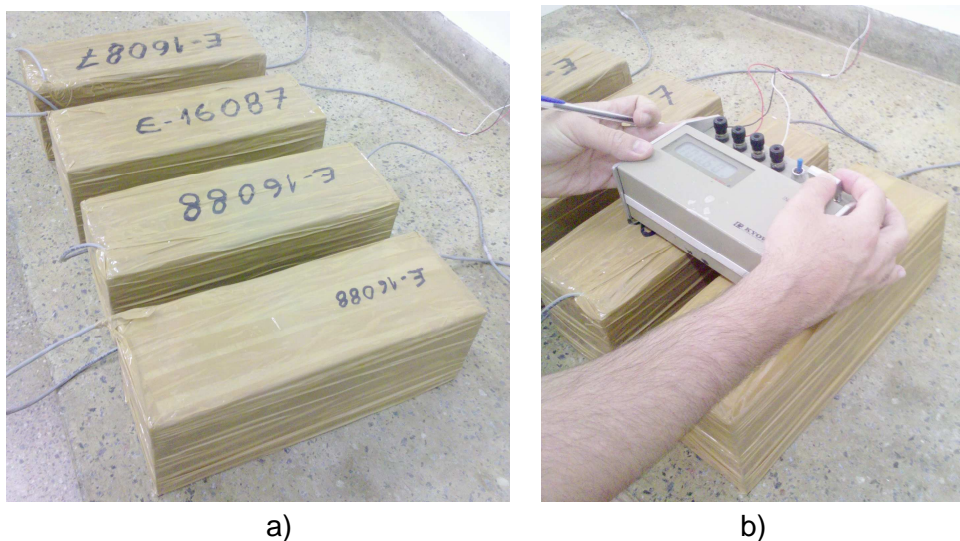


Figura 32 Ensaio de retração autógena: a) corpos de prova envoltos por filme plástico; b) realização das leituras de deformação. (Laboratório de Concreto de Furnas)

Os resultados foram comparados com os obtidos por outros pesquisadores, tanto para trabalhos realizados com concretos à base de cimento portland como concretos de cimentos geopoliméricos. Em algumas situações buscou-se comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos em normas.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo traz os resultados e discussões sobre os ensaios de retração autóloga e retração hidráulica, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade, realizados com o material produzido no programa experimental.

4.1 - RETRAÇÃO AUTÓGENA

A Figura 33 mostra o desenvolvimento da retração autóloga do CCG em função da idade para o presente estudo.

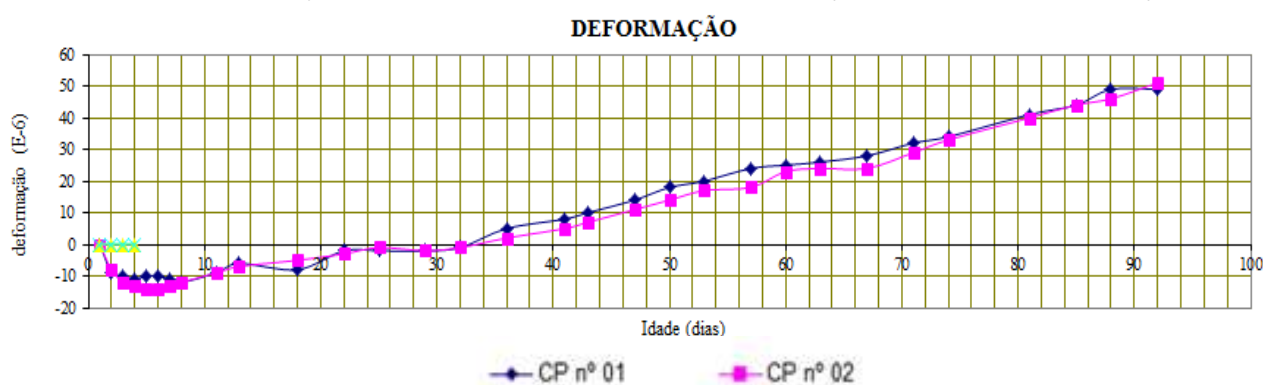


Figura 33 Variação da retração autóloga em função da idade.

Até os 32 dias, o concreto de cimento geopolimérico apresentou uma pequena retração que se reduziu gradativamente até que, nesta idade, iniciou-se uma expansão, alcançando, aos 90 dias, a medida de 50×10^{-6} . A Tabela 10 na página seguinte mostra mais precisamente os resultados encontrados.

Nos concretos de cimento geopolimérico, a formação de capilares é bastante reduzida, pois a microestrutura do CCG é massiva e monofásica, contribuindo para a redução da retração autóloga. A expansão final, detectada no CCG desta pesquisa, é benéfica no caso de ser utilizado como material de reparo, pois melhora a aderência com o substrato. Quando há grande retração do material de reparo, ocorrem fissuras que prejudicam a aderência ao substrato de concreto.

A baixa retração do CCG também influi para uma boa durabilidade do material, visto que as microfissuras provenientes da retração costumam tornar o material mais susceptível à penetração de agentes agressivos.

Tabela 12 Retração autógena do CCG ensaiado.

Idade (dias)	Leitura ($\times 10^{-6}$)		Deformação ($\times 10^{-6}$)	
	CP nº 01	CP nº 02	CP nº 01	CP nº 02
1	574	1795	0,00	0,00
2	565	1787	-9,00	-8,00
3	564	1783	-10,00	-12,00
4	563	1782	-11,00	-13,00
5	564	1781	-10,00	-14,00
6	564	1781	-10,00	-14,00
7	563	1782	-11,00	-13,00
8	562	1783	-12,00	-12,00
11	565	1786	-9,00	-9,00
13	568	1788	-6,00	-7,00
18	566	1790	-8,00	-5,00
22	572	1792	-2,00	-3,00
25	572	1794	-2,00	-1,00
29	572	1793	-2,00	-2,00
32	573	1794	-1,00	-1,00
36	579	1797	5,00	2,00
41	582	1800	8,00	5,00
43	584	1802	10,00	7,00
47	588	1806	14,00	11,00
50	592	1809	18,00	14,00
53	594	1812	20,00	17,00
57	598	1813	24,00	18,00
60	599	1818	25,00	23,00
63	600	1819	26,00	24,00
67	602	1819	28,00	24,00
71	606	1824	32,00	29,00
74	608	1828	34,00	33,00
81	615	1835	41,00	40,00
85	618	1839	44,00	44,00
88	623	1841	49,00	46,00
92	623	1846	49,00	51,00

Segundo o FIP/CEB (1990a) *apud* KALINTZINS e KUPERMAN (2001):

[...] “Devido à baixa relação a/agl e microestrutura refinada, o concreto de elevado desempenho exibe uma deformação autógena quase tão grande quanto a retração por secagem.” [...]

Outros pesquisadores (ISAIA, 1995 *apud* MEIRA, 2009; VELASCO, 2008) reafirmam a ocorrência de aumento da retração autógena devido a adição minerais como sílica ativa e metacaulinita. ISAIA *apud* MEIRA (2009) afirma que:

[...] “As baixas relações a/agl dos concretos de alto desempenho aliadas ao teor de finos presentes levam a uma retração autógena elevada, tanto maior quanto menor a relação a/agl.” [...]

No caso do concreto geopolimérico, foi observado que a retração autógena foi muito inferior às medidas encontradas por outros pesquisadores de concretos e pastas à base de cimento Portland de elevado desempenho, mesmo em casos em que houve adições de pozolanas, conforme pode ser visto na Tabela 11.

ACKER e ULM (2001) *apud* BALTHAR (2004) afirma que:

[...] “A retração autógena é menor que 100×10^{-6} para concretos com relações água/cimento maiores que 0,45, mas quando esta relação é menor que 0,40, pode atingir valores da ordem de 300×10^{-6} . Isto ocorre em virtude do tamanho dos poros dos concretos, já que as tensões na fase líquida, que produzem a compressão na matriz mineral, variam inversamente com o tamanho dos poros na interface com a fase gasosa. A lei de evolução da retração autógena no tempo está diretamente relacionada com a cinética de hidratação do cimento, a qual também controla a evolução da resistência mecânica do concreto. Portanto, os parâmetros que influenciam essa cinética são os mesmos que afetam a taxa de crescimento da resistência do concreto, quais sejam: tipo e finura do cimento e relação água/cimento.” [...]

No entanto, a relação a/agl igual a 0,44 utilizada neste trabalho, não influenciou para que a retração autógena fosse maior ou menor, visto que o concreto de cimento geopolimérico não hidrata e sim, polimeriza. Além disso, o resultado encontrado foi melhor que o esperado por ACKER e ULM (2001) *apud* BALTHAR (2004) para concretos de cimento Portland.

A Tabela 13 abaixo mostra os resultados do ensaio de retração autógena desta pesquisa em comparação com outros obtidos por pesquisadores que estudaram a mesma característica em CCP.

Tabela 13 Comparação da retração autógena do CCG ensaiado com CCP's ensaiados por outros pesquisadores.

Autor / Ano	Material Estudado	Idade	Relação a/agl	Resultados
PEÇANHA (2012)	CCG	2 d	0,44	9×10^{-6}
		90 d		50×10^{-6} (expansão)
KALINTZINS e KUPERMAN (2001)	CAD (substituição do CP em 6% por sílica ativa).	90 d	0,29	$309,98 \times 10^{-6}$
			0,37	$220,60 \times 10^{-6}$
			0,52	$124,62 \times 10^{-6}$
			0,76	$63,49 \times 10^{-6}$
TAVARES (2008)	CAD (combinação ternária de CP-40%, metacaulim-10% e escória de alto forno-50%)	2 d	0,45	15×10^{-6}
FARIA (2012)	CAD autoadensável com adição de Ecat (semelhante ao metacaulim)	120 d	0,47	225×10^{-6}
BALTHAR (2004)	Pasta de CP (substituição parcial do CP por metacaulinita ¹ e sílica ativa ²)	120 d	0,33	¹ 1370×10^{-6}
				² 1320×10^{-6}

Os resultados comparados permitem concluir que o CCG possui menor retração autógena que o CCP.

4.2 - RETRAÇÃO HIDRÁULICA

A Figura 34 mostra a variação da retração hidráulica do CCG em função da idade. A Tabela 14 na mostra todas as medidas realizadas neste ensaio.

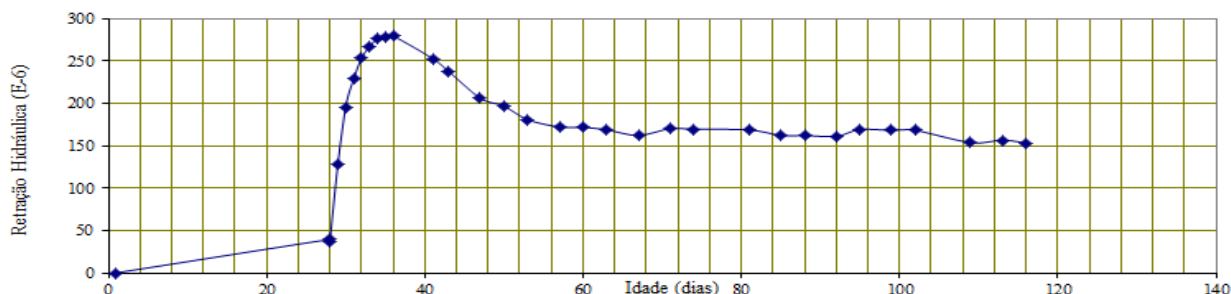


Figura 34 Variação da retração hidráulica em função da idade.

Tabela 14 Resultados do ensaio de retração hidráulica do CCG ensaiado.

Idade (dias)	Leitura (mm)		ϵ_r ($\times 10^{-6}$)		ϵ_{rc} ($\times 10^{-6}$)	Retração hidráulica ($\times 10^{-6}$)
	CP nº A1	CP nº A2	CP nº 01	CP nº 02		
1	1950,0	1359,0	1950,0	1359,0	1654,50	0,00
28	1914,0	1316,0	1914,0	1316,0	1615,00	39,50
28	1918,0	1316,0	1918,0	1316,0	1617,00	37,50
29	1826,0	1228,0	1826,0	1228,0	1527,00	127,50
30	1759,0	1159,0	1759,0	1159,0	1459,00	195,50
31	1731,0	1121,0	1731,0	1121,0	1426,00	228,50
32	1714,0	1089,0	1714,0	1089,0	1401,50	253,00
33	1702,0	1074,0	1702,0	1074,0	1388,00	266,50
34	1693,0	1064,0	1693,0	1064,0	1378,50	276,00
36	1696,0	1055,0	1696,0	1055,0	1375,50	279,00
41	1726,0	1078,0	1726,0	1078,0	1402,00	252,50
43	1741,0	1093,0	1741,0	1093,0	1417,00	237,50
47	1775,0	1122,0	1775,0	1122,0	1448,50	206,00
50	1786,0	1130,0	1786,0	1130,0	1458,00	196,50
53	1803,0	1145,0	1803,0	1145,0	1474,00	180,50
57	1813,0	1152,0	1813,0	1152,0	1482,50	172,00
63	1817,0	1155,0	1817,0	1155,0	1486,00	168,50
67	1824,0	1161,0	1824,0	1161,0	1492,50	162,00
74	1818,0	1152,0	1818,0	1152,0	1485,00	169,50
81	1819,0	1153,0	1819,0	1153,0	1486,00	168,50
85	1825,0	1160,0	1825,0	1160,0	1492,50	162,00
92	1826,0	1161,0	1826,0	1161,0	1493,50	161,00
95	1818,0	1153,0	1818,0	1153,0	1485,50	169,00
102	1820,0	1153,0	1820,0	1153,0	1486,50	168,00
109	1833,0	1169,0	1833,0	1169,0	1501,00	153,50
113	1832,0	1164,0	1832,0	1164,0	1498,00	156,50
116	1837,0	1166,0	1837,0	1166,0	1501,50	153,00

Como foi mencionado no referencial teórico, no CCG existem poucos hidratos ou capilares, o que determina a baixa retração por secagem deste concreto.

A NBR 6118 (2003) fornece uma tabela com valores característicos superiores de deformação específica de retração. Para uma peça de concreto à base de cimento Portland com espessura de 20 cm e exposta a uma umidade ambiente de 90%, pode-se esperar uma retração de até 90×10^{-5} . O CCG ensaiado apresentou um comportamento melhor que o esperado pela NBR 6118. Ao invés de retrair, o CCG expandiu moderadamente dos 32 aos 90 dias após uma pequena retração inicial.

A Tabela 15 abaixo mostra uma comparação de resultados obtidos por outros pesquisadores e os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 15 Comparação da retração autógena do CCG ensaiado com outras pesquisas.

Autor / Ano	Material Estudado	Idade	Relação a/agl	Resultados
PEÇANHA (2012)	CCG	28 d	0,44	$37,50 \times 10^{-6}$
		120 d		153×10^{-6}
KALINTZINS e KUPERMAN (2001)	CAD (substituição do CP em 6% por sílica ativa).	28 d	0,37	$354,20 \times 10^{-6}$
			0,52	$355,20 \times 10^{-6}$
Li <i>et al.</i> (2005)	Argamassa de CP	120 d	0,34	9×10^{-2}
	Argamassa de CG		0,34 a 0,42	4×10^{-2}
				$6,3 \times 10^{-2}$
				$8,2 \times 10^{-2}$
SILVA (2004) <i>apud</i> MEIRA (2009)	Argamassa de CP-ARI com adição de CCA em substituição ao CP em teores de 5% ¹ a 10% ²	28 d	----	$^1 3 \times 10^{-5}$, $^2 7 \times 10^{-5}$

Esses resultados reforçam a ideia de que o concreto de cimento geopolimérico é uma opção vantajosa de material para reparo de estruturas em CCP, visto que a retração do reparo deve ser reduzida para se ter uma boa aderência ao substrato e a pequena expansão ocorrida também coopera para melhora da aderência.

A retração está relacionada à resistência à compressão e durabilidade do concreto, pois as tensões capilares devido à movimentação de água no estado fresco funcionam como um carregamento precoce e causam fissuras. Essas fissuras diminuem o desempenho mecânico do material e facilitam o ataque de agentes agressivos. Sendo assim, os relevantes resultados obtidos em relação às retrações analisadas no CCG em estudo são complementadas pelos resultados dos demais ensaios do programa experimental como permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade mostrados a seguir.

4.3 – PERMEABILIDADE

O melhor resultado obtido entre os corpos de prova ensaiados para a determinação da permeabilidade à água do CCG neste estudo foi de $1,73 \times 10^{-13}$ m/s. Os ensaios foram realizados segundo a NBR 10786/1989.

A Tabela 16 e seguir mostra os resultados obtidos para cada corpo de prova ensaiado. Os resultados foram corrigidos devido à idade e ao tamanho do corpo de prova, segundo metodologia do relatório da Cesp MCC 07.

Tabela 16 Ensaio de permeabilidade à água (NBR 10786/10989).

Dimensões (cm)	Coeficiente de permeabilidade - K (m/s)		
	CP 1	CP 2	CP 3
10x10	$4,27 \times 10^{-13}$	$6,25 \times 10^{-13}$	$6,46 \times 10^{-13}$
15x15	$1,43 \times 10^{-13}$	$3,61 \times 10^{-13}$	$1,73 \times 10^{-13}$

A baixa permeabilidade do CCG já era esperada, pois como foi dito no tópico anterior, a retração está relacionada à esta propriedade. A secagem das pastas de cimento portland, em geral, aumenta a permeabilidade pela

subsequente retração e pode produzir fissuras na zona de transição e nas paredes do gel, as quais separam os capilares.

Com relação à permeabilidade do CCP, saliente-se informação obtida do I Simpósio Brasileiro de Impermeabilização na Construção Civil que refere ser considerado impermeável um concreto no qual a penetração de água não ultrapasse 3 cm para pressões hidrostáticas de 0,1 MPa durante 48 horas e 0,7 MPa em 24 horas, o que corresponde a aproximadamente $1,74 \times 10^{-7}$ m/s. Com base nessa informação o CCG desta pesquisa pode ser considerado impermeável, visto que todas amostras apresentaram o coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-13} metros por segundo.

Nesse contexto, SOUZA COUTINHO (1990) *apud* GOMES (2003) leciona que:

[...] “Sempre que seja necessária estanqueidade numa construção, o coeficiente de permeabilidade do concreto não deve ultrapassar 10^{-5} cm/h ($3,6 \times 10^{-10}$ m/s); quando se exige estanqueidade excepcionalmente elevada, deve-se tomar um limite dez vezes inferior àquele.[...]”

O CCG estudado atendeu a recomendação da citação acima, podendo ser considerado, segundo a mesma, um concreto que possui estanqueidade. Na Tabela 17 a seguir, são fornecidos os resultados de ensaios de permeabilidade de outras pesquisas mencionadas no referencial teórico para fins de comparação.

Tabela 17 Comparação da permeabilidade do CCG ensaiado com outras pesquisas.

Autor / Ano	Material Estudado	Relação a/agl	Resultados
PEÇANHA (2012)	CCG	0,44	$1,73 \times 10^{-13}$
MARSH et al. (1985)	Argamassa de CP curada a 20° por 1 ano (substituição do CP em 30% por cinza volante).	0,47	1×10^{-15}
TAYLOR (1990)	Basalto denso	-----	$2,47 \times 10^{-12}$
GOMES <i>et al.</i> (2003)	CCP - Testemunhos extraídos da ponte Vitória/Vila Velha construída há 40 anos.	-----	1×10^{-7} m/s a $9,7 \times 10^{-8}$ m/s

A medição de parâmetros de transporte de massa no concreto é muito sensível aos procedimentos de ensaio e existem métodos para determinação da permeabilidade do concreto diferentes do utilizado neste trabalho e que foram seguidos por outros pesquisadores, tais como o Método de Torrent (ANDRADE *et al.*, 2000 *apud* FRIZZO, 2001) e o Método de Figg (LEÃO *et al.*, 1999 *apud* FRIZZO, 2001), fator que traz dificuldades para uma efetiva comparação de resultados; porém, é possível concluir, com base nas informações citadas neste tópico, que o concreto de cimento geopolimérico utilizado neste estudo é menos permeável que o concreto de cimento portland, sendo, portanto, ideal para aplicações em reparo/reforço de estruturas.

4.4 - POROSIDADE

Os resultados dos ensaios realizados conforme a NBR 9778/2005 foram os seguintes: absorção de água igual a 6,88%, índice de vazios igual a 15,7% e massa específica real igual a 2,71 g/cm³. Estes resultados não foram tão satisfatórios para um concreto de cimento geopolimérico, se comparado com o concreto de cimento portland, como mostram alguns trabalhos da literatura citados a seguir na Tabela 18.

Tabela 18 Comparação da porosidade do CCG ensaiado com outras pesquisas.

Autor / Ano	Material Estudado		Traço	Resultados (%)	
				Absorção de água	Índice de vazios
PEÇANHA (2012)	CCG		1:2:3:0,44	6,88	15,70
DOURADO E COSTA. (2009)	CCP com aditivo Chryso Plast 777 (45%)	CP II-F-32	1:2,8:3:0,60	4,30	5,48
		CP II-Z-32		9,80	12,40
BAUER <i>et al.</i> (1999)	CCP (CP II E-32)		1:1,8:2,8:0,48	4,70	10,60

Isto se deve em grande parte à baixa qualidade do metacaulim utilizado para a fabricação de geopolímeros, com alto teor de Fe_2O_3 (2,40%). Outro fato que contribuiu para elevar a porosidade foi o adensamento realizado. Devido à viscosidade do concreto geopolimérico, o mais recomendado é adensá-lo em mesa vibratória e, neste estudo foi realizado com vibrador de imersão.

No entanto, a porosidade não afetou a permeabilidade, pois os poros não estavam conectados entre si. Porém, afetou a resistência mecânica, que teve resultado inferior quando comparado a outras pesquisas realizadas com CCG. Ainda assim, os resultados nos ensaios de porosidade sugerem elevado desempenho CCG.

Outro parâmetro relacionado à porosidade do concreto é o teor de ar incorporado e/ou aprisionado. Esse teor foi medido no CCG no estado fresco pelo método pressiométrico (NBR 11686/1990). O CCG foi adensado no recipiente do aparelho da mesma forma que nos corpos de prova. A Figura 29 mostra o medidor que forneceu o valor de 1,8%. Um teor de ar incorporado muito baixo pode prejudicar a trabalhabilidade do concreto. Por outro lado, se for elevado pode prejudicar a resistência à compressão e a durabilidade. Concretos de cimento portland contêm, mesmo sem o uso de aditivos incorporadores de ar, 1 a 3% do seu volume em ar aprisionado. Nos casos de CCP produzidos em centrais e transportados por caminhões betoneira este percentual pode chegar à ordem de 4%. O valor de ar incorporado encontrado neste concreto de cimento geopolimérico está numa faixa considerada normal.



(a)



(b)

Figura 35 Medição do ar incorporado no concreto geopolimérico.

4.5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Em um estudo sobre o CCG THOMAZ (2000) *apud* PEREIRA *et al.* (2005) concluiu que a curva experimental para o desenvolvimento de resistência em função do tempo segue aproximadamente a curva de concretos à base de cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, desenvolvendo uma pequena variação na resistência final, o que pôde ser constatado pela comparação da resistência à compressão obtida neste estudo aos 28 dias de idade igual a 41 MPa. O ganho de resistência do 7º ao 28º foi de 24%.

SKAF (2008) afirma que a importância da rápida aquisição de resistência está interligada com a reconstrução de estruturas de concreto que precisam ser reabilitadas para uso, como pistas de pouso em aeroportos e pontes, ou com a construção de novas estruturas, aonde a demora neste processo causaria transtornos e prejuízos.

THOMAZ (2000) *apud* PEREIRA *et al.* (2005) relata que:

[...] “ Um estudo sobre o desempenho mecânico do concreto geopolimérico foi feito pela comparação das resistências à compressão de um traço fixado a partir de um estudo estatístico com mais de 200 traços diferentes de concreto de cimento Portland existentes na literatura (THOMAZ, 2000). Os resultados de resistência à compressão variaram entre 45 MPa e 60 MPa, bem semelhantes aos resultados encontrados na literatura para concretos de cimento Portland de composição similar.” [...]

Por outro lado, VERBECK e HELMUTH (1968) *apud* SOARES (2006) comentam que a evolução das reações e da resistência mecânica de materiais cimentícios é significativamente acentuada em função da maior superfície específica das matérias primas utilizada na fabricação de concretos e argamassas; como foi comprovado no caso do CCG devido à utilização de matérias primas de elevada finura, especialmente o metacaulim. Além disso, materiais mais finos resultam numa microestrutura mais uniforme e, conseqüentemente, conduzem a uma resistência mecânica mais elevada (LOCHER *et al.*, 1973 *apud* SOARES, 2006). A resistência média à compressão do CCG (f_{cm}) aos 7 dias foi igual a 31 MPa. Este resultado é equivalente aos

encontrados na literatura para CCP de alta resistência inicial (SOARES, 2006; FREITAS JR., 2005; BAUER *et al.*, 1999).

Os resultados do ensaio de resistência à compressão para o concreto de cimento geopolimérico desta dissertação são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 Determinação da resistência à compressão do CCG ensaiado.

Idade (dias)	Força (Kgf)	Tensão (MPa)		Resultado conforme NBR 12655	DP	CV (%)
		Indiv.	Média			
7	25,589	31,95	31,70	31,95	0,45	1,4
7	25,180	31,44				
7	28,558	35,66	34,64	35,66	1,81	5,2
7	26,928	33,62				
28	31,981	39,93	39,99	40,04	0,10	0,2
28	32,066	40,04				
28	33,419	41,73	41,38	41,73	0,63	1,5
28	32,853	41,02				

onde,

DP - desvio padrão ;

CV - coeficiente de variação = $(DP/Tensão\ média) \times 100$.

PEREIRA *et al.* (2007) *apud* SKAF (2008) investigaram a influência da temperatura de cura, entre 40°C-60°C, em geopolímeros à base de metacaulim sob umidade controlada. Afirmaram que, assim como nos materiais cerâmicos, a presença da porosidade faz com que a resistência mecânica dos materiais geopoliméricos decresça exponencialmente – a resistência nos geopolímeros é altamente dependente da porosidade. Segundo aqueles autores, esta porosidade depende da quantidade de água presente nas matérias primas, como no cimento portland, onde a resistência mecânica decresce com o aumento da razão água/cimento, à medida que a trabalhabilidade aumenta.

Essas informações são coerentes com os resultados obtidos neste trabalho, visto que a resistência aos 28 dias não alcançou valores tão altos como os de outras pesquisas realizadas com CCG como pode ser visto Tabela 18 e, a porosidade (índice de vazios e absorção de água) foi maior que o esperado para um concreto CCG. Ainda assim, o resultado obtido equiparou-se aos CCP que utilizam cimentos especiais e de boa qualidade em sua composição, apresentando alta resistência inicial e alto desempenho mecânico.

A redução no desempenho mecânico está associado à presença de impurezas no metacaulim, como Fe e Ca, que adicionam caminhos de reações no geopolímero, conhecidos por causarem grandes mudanças nas propriedades dos materiais durante a síntese e no produto final.

Como nos tópicos anteriores, foi feita uma tabela comparativa (Tabela 20) com resultados de ensaios de resistência à compressão de outras pesquisas.

Tabela 20 Comparação da resistência à compressão do CCG ensaiado com outras pesquisas.

Autor / Ano	Material Estudado	Resultados (MPa)	
		7 dias	28 dias
PEÇANHA (2012)	CCG	31	41
SOARES (2006)	CCP	----	28,6
	CCG		24,7
FREITAS JR. (2005)	CAR com sílica ativa e aditivo SP	43,6	58,0
BAUER <i>et al.</i> (1999)	CCP (CP II E-32)	----	42,5
	CCP (CP-ARI)		55,3
THOMAZ (2000) <i>apud</i> SOARES (2006)	CCG à base de metacaulinita	----	59,0
SILVA (2006) <i>apud</i> SOARES (2006)	CCG à base de metacaulinita	51,2	55,9
PEREIRA (2006) <i>apud</i> SOARES (2006)	CCG	----	51,2

SILVA <i>et al.</i> (2002)	Argamassa de CG (curado a temperatura ambiente)	48,0	53
	Argamassa de CG (curado a 65°C por 4 horas)	52,0	54
	Argamassa de CP-ARI (curado a temperatura ambiente)	40	44
	Argamassa de CP-ARI (curado a 65°C por 4 horas)	29	31
	Argamassa de CPII-E-32 (temperatura ambiente)	26	28

É importante relatar que devido às diferentes fontes de matérias primas existentes, tais como cinzas residuais, que se diferenciam quanto à composição química, mineralógica, solubilidade e tamanho de partículas, influenciam no processo de geopolimerização e nas propriedades mecânicas do produto final (SKAF 2008). Sendo assim, pode-se deduzir mais uma vez a diferença de resistência à compressão obtida nesta pesquisa em relação aos resultados obtidos por outros pesquisadores (THOMAZ, 2000; SILVA, 2006; PERREIRA, 2006), chegando entre 50 a 60 MPa aos 7 dias; porém, a resistência obtida foi satisfatória em comparação aos concretos de cimento Portland de alta resistência inicial.

4.6 – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Quanto ao módulo de elasticidade do CCG ensaiado segundo este programa experimental aos 7 dias foi igual a 26,2 GPa e apresentou dispersão significativa: 7,2%. Aos 28 dias o módulo de elasticidade foi igual a 31,0 GPa com dispersão de 3,6%.

De acordo com MEHTA (2008), nos CCP, em geral, a relação direta entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade acontece pelo fato de que ambos são influenciados pela porosidade das fases constituintes, contudo não no mesmo grau. Isso foi confirmado nesta dissertação, pois a resistência à compressão foi mais afetada pela maior porosidade do que o módulo de elasticidade.

Mazza (2010) afirma que materiais de reparo não devem ter rigidez excessivamente elevada com relação ao substrato de concreto para que haja compatibilidade entre os materiais e não influencie negativamente no desempenho dos mesmos quando em uso. O módulo de elasticidade do concreto de cimento geopolimérico em questão foi superior aos concretos de cimento portland analisados por outros pesquisadores citados anteriormente, em torno de 5 GPa, o que não é considerado um valor excessivamente superior. Porém, como já foi dito, o metacaulim influenciou os resultados negativamente. Deve-se portanto, ter cautela em analisar a compatibilidade mecânica do concreto de cimento geopolimérico com substratos de concreto convencional.

A Tabela 21 abaixo mostra resultados de ensaios para determinação do de módulo de elasticidade de outras pesquisas em comparação aos obtidos nesta pesquisa.

Tabela 21 Comparação do módulo de elasticidade do CCG ensaiado com outras pesquisas.

Autor / Ano	Material Estudado	Observação	Resultados (GPa)	
			7 dias	28 dias
PEÇANHA (2012)	CCG	Traço 1:2:3:0,60 Com gnaisse	26,20	31,0
NETO e HELENE (2002)	CCP	Traço 1:1,15:2,84:0,53	-----	25,5
ARAUJO (2000)	CCP de diversas barragens brasileiras	fc= 40 MPa com gnaisse	-----	30
THOMAZ (2000) <i>apud</i> SKAF (2008)	CCG	fc=59 MPa, com agregado de gnaisse britado	-----	24 GPa

4.7 – RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 22 mostra todos os resultados encontrados nos ensaios realizados com o CCG neste estudo.

Tabela 22 Resumo dos resultados obtidos.

Ensaio	Resultados	
Retração Autógena	2 dias	9×10^{-6} (retração)
	90 dias	50×10^{-6} (expansão)
Retração Hidráulica	28 dias	$37,5 \times 10^{-6}$ (retração)
	120 dias	153×10^{-6} (retração)
Permeabilidade – K	$1,73 \times 10^{-13}$ m/s	
Absorção de Água	6,88%	
Índice de Vazios	15,70%	
Massa Específica	$2,71$ g/cm ³	
Resistência à compressão	7 dias	31,70 MPa
	28 dias	41,38 MPa
Módulo de Elasticidade	7 dias	26,20 GPa
	28 dias	31,00 GPa

CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou resultados de ensaios realizados conforme normas comumente utilizadas para avaliar as propriedades mecânicas de concretos à base de cimento portland, entretanto aplicadas a um concreto totalmente diferente do CCP. No entanto, serviram para comprovar que, apesar das diferenças, o concreto geopolimérico torna-se, comprovadamente, um material alternativo ao CCP nas mais diversas aplicações. Os resultados do programa experimental foram satisfatórios e mostraram as vantagens do CCG sobre o CCP em relação às propriedades avaliadas.

De acordo com os resultados, o CCG apresentou retrações autógena e hidráulica muito baixas. O CCG mostrou ter menor permeabilidade em relação aos concretos à base de cimento portland. Esperava-se que possuísse menor absorção de água e índice de vazios; porém, o metacaulim utilizado influenciou negativamente os resultados em comparação aos concretos à base de cimento portland com traços semelhantes. Houve ganho inicial resistência à compressão muito rápido, semelhante aos concretos à base de cimento portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), chegando aos 28 dias com boa resistência. O módulo de elasticidade foi superior aos valores encontrados para concretos convencionais com traços semelhantes.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho verificou-se que o assunto estudado seria beneficiado com a realização de pesquisas futuras, tais como:

- 1 – estudar as propriedades do CCG de forma e suas correlações com variações de traços;
- 2 – analisar o uso de retardadores de pega;
- 3 – realizar ensaios de permeabilidade com metodologias diferentes das utilidades nesta pesquisa;
- 4 – experimentar o uso de outras matérias primas para a produção do CCG, tal como substituir o hidróxido de potássio por hidróxido de sódio;

5 – testar a utilização do metacaulim de diferentes fabricantes e diferentes quantidades para verificação da influência do mesmo sobre as propriedades do CCG;

6 – estudar o uso do CCG como reforço de peças estruturais em tamanho real.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. 2009. *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. ASTM C1698. Pensilvânia.

ARAÚJO, J. M. de; O Modulo de Deformação Longitudinal do Concreto, Teoria e Prática na Engenharia Civil, Nº.1, p.9-16, Nov., 2000 - Departamento de Materiais e Construção - FURG - Rio Grande, RS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 1989. Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. NBR 10786. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2001. Agregado miúdo: Determinação da absorção de água. NM 30. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2001. Agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2003. Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2003. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. NBR 5738. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2003. Concreto – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2005. Argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água, índice de vazios se massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2008. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. NBR 8522. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. 2009. Agregados para concreto – Especificação NBR 7211. Rio de Janeiro.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M.. Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas. Dissertação de Mestrado. UFRJ. 2004

BATTAGIN, A. F., SCANDIUZZI, L. A utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990. (Boletim nº 35).

BAUER, R.J.F.; CURTI, R.; MARTINS, A.; TAKASHIMA, s. Estudo de característica física e mecânica do concreto pelo efeito de vários tipos de cura. IN: 41º. Congresso Brasileiro do Concreto. Bahia. 30 de agosto a 03 de setembro, 1999.

CORREIA, E.A.S. Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2011

DAVIDOVITS, J.– *Syntesis of New High-Temperature Geo-polymers For Reinforced Plastics/Composites*, Society of Plastic Engineers, Brookfield Center,USA, p. 151-154. 1979

DAVIDOVITS, J. - *Geopolymers: inorganic polymeric new materials*. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633. 1991

DAVIDOVITS, J.– *Properties of geopolymer cements, Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Vol. 1, SRIBM, Kiev, Ukraine , p. 131-149. 1994

DAVIDOVITS, J – *Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement*. NASTS – Journal of Material Education. Vol 16. 1994a

DIAS, D. P. Cimentos Geopoliméricos: Estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2001

DOURADO, A. A; COSTA, F. N. – Avaliação da influência do tipo de cimento na absorção capilar do concreto Disponível em info.ucsal.br/banmon/Arquivos/Art3_0024.pdf

FARIA, E.F. Concretos autoadensáveis de alto desempenho com catalisador residual do craqueamento catalítico fluido (ECAT de refinaria de petróleo) Tese de Doutorado.Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012

FRIZZO, B. T.; Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Santa Maria, 2001.

GOMES, A. M.; AGUIAR, J.E.; NETO, H.A.; COSTA, J.O. Permeabilidade do Concreto: um estudo para a avaliação *in situ* usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais. 3º. *Pan American Conference for non destructive testing*. Rio de Janeiro. Brasil. 2003

GOURLEY, J. T.; JOHNSON, G. B. – *Develoments in geopolymer precast concrete – International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete GGC 2005*

NETO, A. A. M., HELENE, P. R. L. Modo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade dos concretos. 44º. Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2002

KALINTZINS, C. A. A; KUPERMAN, S. C.; “Estudo da Fluência do Concreto de Elevado Desempenho”, BT/PCC/274, São Paulo EPUSP, 2001.

LI, K.L.; H., G. H; CHEN, J.; WANG, D.; TANG, X. S.; *Early Mechanical Property and Durability of Geopolymer - International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete* GGC 2005.

MAURI, J.; DIAS, D.P.; CORDEIRO, G.C.; DIAS, A.A. Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. *Revista Matéria*, V. 14, n.3, 2009. Disponível em: <http://www.matéria.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11050>.

MAZZA, S. C. Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland. Dissertação de Mestrado. 2010. Universidade Federal da Bahia. Salvador – Bahia.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estruturas, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MEIRA, L. R. Propriedades mecânicas e tração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria- RS. 2009

MELO, L. R. Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS 2009.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, F. A. Tenacidade à Fratura em Compósito Geopolimérico Reforçado por Fibra de Polipropileno. Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, D. S. T. Concreto de Cimento Geopolimérico Reforçado com Fibras de Aço para Pavimentação. Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

PEREIRA, D.S.T., OLIVEIRA, F.A., SILVA, F.J. THAUMATURGO, C. 2005. Análise microestrutural de concreto geopolimérico: uma visão comparativa. Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction IAC-NOCMAT 2005 – Rio. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

PETRY, S. B.; Estudo da Permeabilidade à Água na Camada de Cobrimento de Protótipos de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante – UFSM (2004)

PINTO, E.N.M.G. Aditivação de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo. Dissertação de Mestrado. UFRGN. 2007

SILVA, F. J. Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, F. G. S.; SANTOS, L.; RODOLPHO, P. M.; PAULA, J. M. P. de; NEPOMUCENO, A. A. Influência dos efeitos pozolânico e microfiller na resistência à compressão do concreto. 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Recife, 2005. Anais... Recife, 2005, p.V957 – 968.

SILVA, F.J.; THOMAZ, E.C.; DIAS, D.P.; OLIVEIRA, M.C.; THAUMATURGO, C. Cimento polimérico inorgânico para aplicações civis. 2002. Disponível: <http://www.geopolymer.com.br/PDF/09.pdf>

SILVA, F.G.S.; DANTAS, A.B. Estudos sobre a retração autógena em concretos de alto desempenho (CAD'S). IX Encontro Latino de Iniciação Científica e 5º Encontro Latino Americano de Pós Graduação. Universidade Do Vale do Paraíba. São Paulo, 2009

SKAF, T. B. – Influência de Matéria-Primas na Microestrutura e Resistência de Compósitos Geopoliméricos – Dissertação de Mestrado, IME, 2008.

SOARES, J. C. – Aço-Concreto Geopolimérico: Correlação entre Tensão de Aderência e Comprimento de Ancoragem – Dissertação de Mestrado, UENF, 2006.

I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL – IBI (Instituto Brasileiro de Impermeabilização), São Paulo, 1978.

TAKEUTI, A.R., Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho, 1999. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

TAVARES, L. R. C.; Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições – Dissertação de Mestrado, UFMG, 2008.

TAYLOR, H. F. W. Chemistry, 2 a. Ed. Londres, Academic Press. 1990

VAN JAARVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J.; *The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers.* Chemical Engineering Journal, 89, 63, 2002

VELASCO, R.V. Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008

LINKS ACESSADOS:

<http://www.abcp.org.br>

<http://www.geopolymer.com.br>

<http://www.astm.org>