



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Doutorado

**EFEITO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DOS
ALUMINOSSILICATOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
E MICROESTRUTURAIS DE COMPÓSITOS ARGILOSOS
PRENSADOS**

por

Soenia Marques Timóteo de Sousa

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa - Paraíba

março, 2011

SOENIA MARQUES TIMÓTEO DE SOUSA

**EFEITO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DOS
ALUMINOSSILICATOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
E MICROESTRUTURAIS DE COMPÓSITOS ARGILOSOS
PRENSADOS**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Professor PhD. Sandro Marden Torres

S725e Sousa, Soenia Marques Timóteo de.

**Efeito da ativação alcalina dos aluminossilicatos nas propriedades
mecânicas e microestruturais de compósitos argilosos prensados/ Soenia**

Marques Timóteo de Sousa. - - João Pessoa: [s.n], 2011.

158f. : il.

Orientador: Sandro Marden Torres.

Tese (Doutorado) – UFPB /CT.

*1. Engenharia mecânica. 2. Ativação alcalina. 3. Biodiesel. 4. Blocos
prensados – Terra crua. 5. Biodiesel.*

EFEITO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DOS ALUMINOSSILICATOS NAS PROPRIEDADES MECANICAS E MICROESTRUTURAIS DE COMPÓSITOS ARGILOSOS PRENSADOS

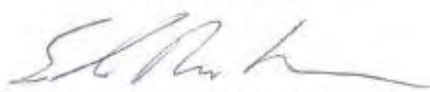
por

Soenia Marques Timóteo de Sousa

Tese aprovada em 31 de março de 2011



Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
Orientador



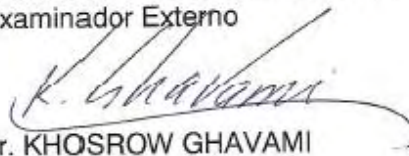
Prof. Dr. SILVIO ROMERO DE BARROS
Examinador Interno



Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES
Examinador Interno



Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA
Examinador Externo



Prof. Dr. KHOSROW GHAVAMI
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais,

“Seu silêncio é como música... Eles se calam como os pássaros cantam, a morte deles só existe para os outros, não para mim...” adaptado do poema de Antonio Figueiredo Agra.

Lois Paulo - 9 anos de idade.
9/12/2007

Lois - Minha querida filha e amiga
deus te seja feliz e te de
guizo e bom sono.
Não te esqueço, nem Avenice
nem Jeumagres.
Escreve-me. Eu espero tuas
cartas. Quando diges-me tudo, com
aquela maneira franca que sube-
leza a tua vida.
Conta-me como vai de
escola. Tua vida em casa. Dig-
me como vai indo a tua mãe,
Avenice, Jeumagres e tio. Dê-lhes
um abraço, por mim ou como um

Olha - Loia - Só agora estou mais alegre
hoje, por que tu e Jeumagres não vieram
falar comigo pelo telefone.
Deste um presentinho a Avenice
hoje? Quando-me diges.
Tem cuidado com tudo, Vieta. Com
minhas moquitos, meus livros, compra tudo
e deixa tudo amadurecer.
Olha se já tem melãozinho. Dig-
me se estás chateado por aí. Aqui chatei
nos prumos - ora é quente ora frio.
Beim - aquele abraço e muitos beijos.
Para para nos e pede a Deus por mim e por
todos. Muitos abraços e felicidades -
Raquel

“O ser humano sempre deve ser tratado como dotado de um valor intrínseco, e não deve ser usado meramente como um meio para se conseguir uma outra coisa.” Immanuel Kant.

“Visto que o amor é a única regra que deve governar as nossas ações, e a única diretriz para o correto uso dos dons divinos, Deus não aprova nada que esteja destituído de amor, não importa quão magníficos os conceitos humanos venham a ser, pois, sem amor, a mais bela de todas as virtudes não passa de mera aparência, um ruído vazio de significação.” (João Calvino – exposição de 1ª. Coríntios – Genebra, 1556)

“Ninguém ensina ninguém. Tampouco ninguém aprende sozinho. Os homens aprendem em comunhão. Mediados pelo mundo.” Paulo freire

“Não há saber mais ou saber menos: há saberes diferentes.” Paulo freire

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.” Isaac Newton.

“A maravilhosa disposição e harmonia do universo só pode ter tido origem segundo o plano de um Ser que tudo sabe e tudo pode. Isso fica sendo a minha última e mais elevada descoberta” Isaac Newton.

“Eu consigo calcular o movimento de corpos celestiais, mas não a loucura das pessoas.” Isaac Newton.

“Se minha Teoria da Relatividade estiver correta, a Alemanha dirá que sou alemão e a França me declarará um cidadão do mundo. Mas, se não estiver, a França dirá que sou alemão e os alemães dirão que sou judeu”. Albert Einstein.

“Deus é a lei e o legislador do Universo.” Albert Einstein.

“O acaso não existe; Deus não joga dados.” Albert Einstein.

“Deveríamos tomar cuidado para não fazer do intelecto o nosso deus; ele tem, naturalmente, músculos poderosos, mas nenhuma personalidade.” Albert Einstein.

“Nenhum cientista pensa com fórmulas.” Albert Einstein.

COTIDIANO

Trago em mim o abandono e o desamparo
dos meninos de rua,
Vejo loucura nos olhos dos ditos homens sábios.
Sinto a crueldade do coração dos homens de bem,
Nas suas duras mãos, o açoite nos corpos
frágeis dos indigentes.
Vi secas e chuvas.
Vestes rotas e verdes pastos.
Os retirantes da seca com o seu prato na mão,
estendido à indiferença de quem os ganham com a opressão.
Sentei-me com políticos bem polidos,
enganado o coração ficou
na ilusão de que minha petição fosse atendida.
Faço festa, vou a velórios
Corro e repouso sem nenhum conforto.
Trabalho, suo, faço e não ganho o repasto.
Xingo a mulher de rua, mal amada e faminta de vida.
Depois... Envergonho-me de minha tirania
Culpei-me tanto por tantas culpas,
mas me perdoei de todas elas.
Abaixei a cabeça para tantos açoites,
mas ergui a espinha.
Pulei em mares rasos e fundos
e me segurei em vagas.
Fugiu o chão dos meus pés,
fiquei suspensa no fio de incertezas
Viver!?!... Eu vivo todos os dias,
o cotidiano de todas as horas...

Soenia Marques Timóteo de Sousa

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu amor incondicional, que me deu a fé crucial em tempos difíceis, e atravessou comigo um deserto tenebroso. “A sua vara e seu cajado me consolam, certamente a sua bondade e a sua misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida.”

Ao prof. Sandro, meu orientador, pelas suas idéias brilhantes e conhecimentos transmitidos.

Ao prof. Normando Perazzo, pela amizade e apoio logístico nos momentos mais difíceis.

Ao prof. Ghavami pelas críticas construtivas.

Ao prof. José Gonçalves pela confecção da máquina de moldagem.

Ao prof. Heber Sivini Ferreira pelo apoio nos ensaios de resistência à flexão, à resistência compressão e florescência.

Ao prof. Severino Jackson nas dicas de caracterização das amostras de água de lavagem.

Ao prof. Tibério pelo apoio no ensaio de MEV.

A prof. Isabel pelo estímulo e amizade.

Ao LES, nas pessoas de prof. Cabral e Rosimari Abreu, que doaram o resíduo líquido de biodiesel em quantidade suficiente para que eu pudesse desenvolver a pesquisa.

Ao LACOM, na pessoa de Luzenir pela amizade e contribuição no fornecimento de várias águas de lavagem e a profa. Ieda pelos conhecimentos que me foram transmitidos.

A Evaneide pelo apoio nos ensaios da água de lavagem.

Ao Laboratório de Elétrica na pessoa de Jandermarques pelo apoio na utilização da estufa.

Ao Serginho pelos ensaios de caracterização do solo.

A Edvania e Maviasel, grandes colaboradores, que estiveram comigo realizando ensaios, na dura tarefa diária de moldagem dos corpos de prova.

A Aline pelo fornecimento das normas de ensaio.

Aos funcionários Sebastião, Delby, Cláudio Matias, Ricardo, Seu Francisco e Zito pelo apoio no desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

A Elisabete pelo estímulo e carinho regado a cafezinho.

Aos amigos Ulisses, Salustiano, Elisangela, João Delonx e Sóstenes que me apoiaram e me consolaram nos momentos de angústia e amenizaram o peso do stress com a dosagem de humor na medida certa.

Aos queridos amigos Daniel, Riccelly, Quirino e Fábio que compartilharam comigo seus conhecimentos.

As queridas amigas Jacqueline, Adiana e Andrea Samara pelo carinho, solidariedade e companheirismo.

Especial agradecimento a Danielle por sua solidariedade no momento mais difícil da minha vida.

A Kelly pelos conhecimentos transmitidos.

A Andressa pela preparação das amostras para o MEV.

A Caulisa pelo fornecimento do Caulim.

A Pernambuco química pelo fornecimento do silicato de sódio.

A CAPES pelo apoio financeiro, na forma de bolsa de estudo.

Ao IFCE pela liberação para a realização desse trabalho.

Aos colegas da Coordenação de Tecnologia em Produção Civil.

Ao Prof. Adhemar Coordenador de Ensino e ao Prof. Francisco Wilson Diretor do Campus Juazeiro do Norte do IFCE.

A família pelos momentos de distanciamento e compreensão.

Agradeço as dificuldades que me moldaram uma mulher mais madura e me fizeram uma pessoa mais humana.

EFEITO DA ATIVAÇÃO ALCALINA DOS ALUMINOSSILICATOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE COMPÓSITOS ARGILOSOS PRENSADOS

RESUMO

Na cadeia da energia e do combustível automotor, dentro da política mundial de adoção de tecnologias verdes, o governo brasileiro vem incentivado à instalação de usinas de biodiesel, material que está sendo empregado como uma alternativa, menos poluente e de menor custo em substituição ao diesel e à gasolina. Na Paraíba, o Programa de Biodiesel foi criado através da Lei Estadual 7.761 de 15 de junho de 2005. O projeto visa inicialmente cumprir duas metas: geração de energia limpa e inclusão social de agricultores familiares. Uma usina será construída em Campina Grande, com capacidade de produção de cerca de 134 mil litros/dia. Estas usinas geram, no processo produtivo, resíduos. Faz-se necessário encontrar uma alternativa para que os resíduos tenham o menor impacto possível no ambiente. Aqueles provenientes da purificação do biodiesel são alcalinos. A ativação alcalina de certos materiais tem sido estudada como um ligante alternativo ao cimento Portland. Neste trabalho estudou-se a formação de um compósito à base de argila alcalinamente ativada para confecção de blocos para construção, nos quais foi usado um solo local e metacaulinita. Como ativadores alcalinos empregaram-se o silicato de sódio, hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio proveniente da água de lavagem de biodiesel. Os ativadores são misturados com o solo e a mistura recebe uma compactação estática da ordem de 2 MPa, que é a comumente fornecida por prensas manuais para a fabricação de blocos prensados de terra crua. Os resultados mostram a viabilidade desse tipo de emprego do resíduo líquido de biodiesel. A resistência mecânica depende do teor de ligantes, podendo atingir valores de até 17 MPa para compósitos com 22% de solo alcalinamente ativado. A durabilidade, as propriedades físicas e microestruturais de amostras com diferentes composições foram estudadas.

Palavras chaves: ativação alcalina, biodiesel, blocos prensados de terra crua.

EFFECT OF ALKALINE ACTIVATION OF THE ALUMINOSILICATES ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF COMPRESSED CLAY COMPOSITES

ABSTRACT

In the chain of energy and motor fuel, in agreement with the policy to adopt green technologies, Brazilian government has encouraged the installation of biodiesel plants to produce an alternative, less polluting and less cost fuel to replace diesel and gasoline. In Paraíba State, the Biodiesel Program was created by the Law 7761 of June 15, 2005. This program initially aims to accomplish two goals: generating clean energy and social inclusion of family farmers. A plant will be built in Campina Grande and will occupy a total area of 704 m² with a production capacity of approximately 134,000 liters/day (40 million liters/year). These biodiesel plants generate by product in the production process. Some of then, as the water from purification of the biodiesel, have high pH. It is necessary to find a way to avoid that these waste causes high environmental impact. The alkaline activation of certain materials has been studied as an alternative to Portland cement binder. In this work clay-based alkaline activated composites were investigated, with the aim to produce construction blocks. Soil available locally and metakaolin were used. As alkaline activators the Na₂SiO₃ (sodium silicate) and the NaOH (sodium hydroxide) were obtained commercially, but the KOH (potassium hydroxide) was obtained from the wash water from biodiesel production process. The activators and some small percentage of metakaolin are mixed with the soil and water, and the mix was compressed by a static strength of about 2 MPa, which is commonly provided by hand presses for the fabricate compressed earth blocks. The results show the feasibility of such use of liquid waste from biodiesel. The mechanical strength depends on the concentration of metakaolin, which can reach up to 17 MPa for composites with 22% activated alkaline soil. The durability, physical properties and microstructures of samples with different compositions were also studied.

Keywords: alkaline activation, biodiesel, compressed earth blocks.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
SUMÁRIO.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SIGLAS	xii
1 INTRODUÇÃO.....	001
1.1.1 Objetivos	004
1.1.2 Objetivos Específicos.....	004
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	005
2.0 INTRODUÇÃO	005
2.1 GEOPOLÍMEROS.....	005
2.1.1 Mecanismo de Geopolimerização	009
2.1.2 Precursores Geopoliméricos	011
2.1.2.1 Caulim	011
2.1.2.2 Metacaulinita.....	013
2.1.3 Aplicações dos Geopolímeros	014
2.2 BIODIESEL.....	015
2.2.1 Biodiesel no Brasil	016
2.2.2 Produção do Biodiesel.....	023
2.2.3 Transesterificação	024
2.2.4 Reação de Transesterificação.....	026
2.2.5 Resíduo Líquido de Biodiesel (Água de Lavagem)	030

2.2.6	Oxidação de Resíduos Líquidos de Biodiesel	031
2.3	TERRA CRUA	032
2.3.2	Construção com Terra na História	033
2.3.3	Técnicas de Construção com Terra Crua.....	034
2.3.4	Inovações Tecnológicas na Construção com Terra Crua.....	036
2.3.5	Fatores que Afetam a Qualidade dos Blocos Prensados	039
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	041
3.0	INTRODUÇÃO.....	041
3.1	MATERIAIS	043
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES	043
3.2.1	Florescência de Raios X	043
3.2.2	Difração de Raios X	044
3.2.3	Massa Específica	044
3.2.4	Área Específica – Método de Blaine.....	044
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SINTERIZADO	044
3.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	044
3.4	SOLO	044
3.5	RESÍDUO LÍQUIDO DE BIODIESEL	046
3.5.1	Determinação do pH	046
3.6	CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	046
3.6.1	Composição das Misturas	046
3.6.2	Preparação das Misturas	050
3.6.3	Moldagem de Corpos de Prova Prismáticos.....	051
3.6.4	Regime de Cura	053
3.6.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração na Flexão .	053
3.6.6	Absorção por imersão em água	054
3.6.7	Absorção por Capilaridade.....	055
3.6.8	Durabilidade	057
4	RESULTADOS	060
4.0	INTRODUÇÃO	060

4.1	SOLO	061
4.1.1	Caracterização do Solo: Curva Granulométrica, limites de Atterberg composição química	061
4.1.2	Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima	063
4.2	CAULIM	063
4.2.1	Massa Específica e Área Específica pelo Método de Blaine	063
4.2.2	Análise por Difração de Raio X (DRX)	064
4.2.3	Análise Química por Fluorescência de Raio X (FRX)	064
4.3	METACAULIM	065
4.3.1	Massa Específica e Área Específica pelo Método de Blaine	065
4.3.2	Análise por Difração de Raio X (DRX)	065
4.3.3	Análise Química por Fluorescência de Raio X (FRX)	066
4.4	RESÍDUOS LÍQUIDOS DE BIODIESEL	068
4.4.1	Resíduo Líquido de Biodiesel- Determinação do pH	073
4.4.2	Oxidação de Resíduos Líquidos de Biodiesel	074
4.5	RESISTENCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	077
4.6	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NO ENSAIO DE FLEXÃO	083
4.7	ABSORÇÃO	088
4.8	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	093
4.9	DURABILIDADE	096
4.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	102
5	CONCLUSÕES	108
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS	111
	ANEXO I	118
	ANEXO II	123
	ANEXO III	125
	ANEXO IV	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema das estruturas moleculares de polisialatos (DAVIDOVITS, 1982).	007
Figura 2.2 Proposta de modelo estrutural teórico para o geopolímero K-poli(siliato-siloxo) (DAVIDOVITS, 1994)	007
Figura 2.3 Proposta de modelo planar para a estrutura da reação incompleta e do geopolímero poli(siliato-siloxo) não estável (Rowles, 2004), baseado em Barbosa <i>et al.</i> (2000)	008
Figura 2.4 Modelo estrutural do geopolímero poli(sialato-siloxo) usado no encapsulamento de resíduos tóxicos e radiativos (DAVIDOVITS, 2002)	009
Figura 2.5 Esquema do mecanismo de geopolimerização (DUXSON <i>et al.</i> , 2007)	010
Figura 2.6 Estrutura da caulinita	012
Figura 2.7 Transformação térmica da caulinita para a metacaulinita	013
Figura 2.8 Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007 (ANEEL, 2008)	017
Figura 2.9 Esquema da reação de transesterificação de um triacilglicerídeo (SCHUCHARDT, 1997)	026
Figura 2.10 Equações da reação de transesterificação de um triacilglicerídeo com metanol catalisada por uma base (SCHUCHARDT, 1997)	027
Figura 2.11 Separação da glicerina e do biodiesel etílico (Fonte:GRANGEIRO, 2009).	028
Figura 2.12 Biodiesel etílico após a retirada da glicerina (Fonte:GRANGEIRO, 2009).	029
Figura 2.13 Lavagem do biodiesel em escala laboratorial (Fonte:GRANGEIRO, 2009)	029
Figura 2.14 Muralha da China (Fonte: WIKIPÉDIA, 2011)	033
Figura 2.15 Construção com terra com mais de 250 anos, São Paulo, Brasil (Fonte: MINKE, 2008)	034
Figura 2.16 Fazenda de café, em taipa de pilão, São Paulo, Sec. XIX (Fonte: Divulgação IG, CANAL LIVRE, 2011)	034
Figura 2.17 Prensa hidráulica (a) e bloco compactado em prensa hidráulica (b) (JALALI, 2011)	036

Figura 2.18 Produção de adobes mecanizados (Dethier, 1982)	036
Figura 2.19 Construção de parede e edifício em taipa mecanizada (JALALI, 2011)	037
Figura 2.20 Construção em adobe com incorporação de revestimento em concreto, com detalhamento do elemento de concreto (JALALI, 2011)	037
Figura 2.21 Tijolos extrudados não calcinados no estado fresco (JALALI, 2011)	038
Figura 2.22 Tijolo de L.T.G.S. feito com argilas caulínicas (Davidovits, 2002)	038
Figura 3.1 Aspecto do solo	045
Figura 3.2 Detalhes do molde de corpo-de-prova prismático	051
Figura 3.3 Molde prismático desmontável (a) e (b)	051
Figura 3.4 Prensagem dos blocos a taxa de compressão de 2 MPa (A) e molde após prensagem (B)	052
Figura 3.5 Retirada das amostras dos moldes prismáticos	052
Figura 3.6 Espécimes imersos em água (a) Aspecto dos corpos de prova após ensaio de absorção (b)	055
Figura 3.7 Ensaio de capilaridade	056
Figura 3.8 Escovação do corpo de prova	057
Figura 3.9 Ciclo de molhagem dos corpos de prova no ensaio de durabilidade	058
Figura 3.10 Secagem em estufa a 55°C dos corpos de prova submetidos à secagem	058
Figura 4.1 Curva granulométrica do solo	061
Figura 4.2 Curva de compactação do solo	063
Figura 4.3 Difração de raio X do caulim da marca Caulisa	064
Figura 4.4 - Difração de raio X do metacaulim	066
Figura 4.5 pH de diversos tipos de resíduos líquidos de biodiesel (água de lavagem) ...	068
Figura 4.6 Valores de pH da água residual do Pinhão Manso da 1ª a 4ª lavagem	069
Figura 4.7 Valores de pH da água residual do algodão da 1ª a 9ª lavagem	069
Figura 4.8 Valores de pH da água de lavagem de girassol	070
Figura 4.9 Valores de pH da água de lavagem de sebo bovino, soja e babaçu	070
Figura 4.10 Valores de pH da água residual da soja da 1ª a 6ª lavagem, comparando em cada lavagem as fases: topo(Tp), base(Bs), mistura(mix) e Hmg (homogêneo)	071
Figura 4.11 Valores de pH da água residual do óleo de fritura da 1ª a 4ª lavagem, comparando em cada lavagem as fases: topo, base e mistura (b)	072
Figura 4.12 Água de lavagem do óleo de soja na rota etílica com catalisador KOH. Da esquerda para direita e de baixo para cima na ordem crescente da seqüência de	

lavagem	072
Figura 4.13 Comparação dos valores do pH nas fases de topo, base e mistura da 1ª água de lavagem de soja	073
Figura 4.14 Aspecto visual das amostras de água de lavagem da soja submetidas à temperatura de 50°C e a medição da sua alcalinidade ao longo do tempo	074
Figura 4.15 Oxidação da água de lavagem de algodão ao longo do tempo	075
Figura 4.16 Oxidação da água de lavagem de pinhão manso ao longo do tempo	075
Figura 4.17 Oxidação da água de lavagem de girassol ao longo do tempo	076
Figura 4.18 Oxidação água de lavagem de fritura ao longo do tempo	076
Figura 4.19 Oxidação da água de lavagem de soja ao longo do tempo	077
Figura 4.20 Resistência a Compressão Simples de corpos de prova	079
Figura 4.21 Resistência a Compressão Simples de corpos de prova	080
Figura 4.22 Resistência a Compressão Simples de corpos de prova	081
Figura 4.23 Resistência a Compressão Simples de corpos de prova	082
Figura 4.24 Resistência a tração na flexão de corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias	084
Figura 4.25 Resistência à tração na flexão de corpos de prova	085
Figura 4.26 Resistência a tração na flexão de corpos de prova em cura ambiente	086
Figura 4.27 Resistência a tração na flexão de corpos de prova em cura em estufa	087
Figura 4.28 Absorção de corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias	089
Figura 4.29 Absorção dos corpos de prova	090
Figura 4.30 Absorção dos corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias em temperatura ambiente (25°C)	091
Figura 4.31 Absorção dos corpos de prova	092
Figura 4.32 Absorção por capilaridade dos sistemas geopolimérico, geopolimérico com resíduo de biodiesel e de cimento. RB= resíduo líquido de biodiesel	095
Figura 4.33 Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo, em cura ambiente (25°C)	097
Figura 4.34 Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo, em cura em estufa (55°C).....	098
Figura 4.35 Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo	099
Figura 4.36 Microscopia da composição formada por solo + geopolímero (22%). Cura em estufa a 55°C	103

Figura 4.37 Microscopia da composição formada por solo + geopolímero + resíduo líquido de biodiesel (22%). Cura em estufa a 55°C	104
Figura 4.38 Microscopia da composição formada por solo + cimento (22%). Cura em estufa a 55°C	105
Figura 4.39 Microscopia da composição formada por solo + cimento (22%). Cura ambiente a 25°C	106
Figura I Comparação entre uma pelota feita com solo + resíduo líquido de biodiesel de soja e com outra usando apenas água potável	124
Figura II - Usinas de Biodiesel Autorizadas e em Processo de Autorização e Malha Rodoviária e Ferroviária Atual. Fonte: Elaboração EPE a partir de ANP	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Nomenclatura dos geopolímeros	006
Tabela 2.2 Ligações entre os tetraedros de silício e de alumínio	008
Tabela 2.3 Aplicações de materiais geopolímeros baseado na razão atômica Si:Al	015
Tabela 2.4 Produtores de bionergia em 2005	018
Tabela 2.5 Potencial de oferta no Nordeste de biodiesel (milhões de litros)	019
Tabela 2.6 Potencial regional de oferta no Brasil de biodiesel (milhões de litros)	020
Tabela 2.7 Consumo obrigatório de biodiesel por região (milhões de litros)	020
Tabela 2.8 Capacidade instalada de processamento de biodiesel	022
Tabela 2.9 Tipos de catalisadores usados na transesterificação	025
Tabela 2.10 Técnicas de construção com terra crua mais utilizadas	035
Tabela 3.1 Materiais utilizados nas misturas geopoliméricas e suas respectivas procedências	043
Tabela 3.2 Ensaio de caracterização do solo	045
Tabela 3.3 Composição das misturas em relação ao peso do solo	047
Tabela 3.4 Composição da mistura de solo+geopolímero	047
Tabela 3.5 Relação líquido/materiais secos	048
Tabela 3.6 Composição da mistura de solo+geopolímero+resíduo líquido de biodiesel .	048
Tabela 3.7 Relação líquido/materiais secos	049
Tabela 3.8 Composição da mistura de solo-cimento	049
Tabela 3.9 Relação líquidos/materiais secos do solo-cimento	050
Tabela 4.1 Caracterização do solo	062
Tabela 4.2. Composição química do caulim	065
Tabela 4.3 Composição química do metacaulim	066
Tabela 4.4 Absorção por imersão das amostras	088
Tabela 4.5 Absorção por capilaridade das amostras	093
Tabela 4.6 Perda de massa por imersão das amostras	096

Tabela 4.7 Aspecto dos blocos submetidos a ensaio de durabilidade por perda de massa, em temperatura ambiente (25 °C)	100
Tabela 4.8 Aspecto dos blocos submetidos a ensaio de durabilidade por perda de massa, em estufa a 55 °C	101
Tabela 4.9 – Sumário dos aspectos das fissuras na matriz e interface de cada sistema ...	107
Tabela I.1 Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (25°C), período de cura de 3 dias	119
Tabela I.2 Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (25°C), período de cura de 28 dias	120
Tabela I.3 Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (55°C), período de cura de 3 dias	121
Tabela I.4 Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (55°C), período de cura de 28 dias	122
Tabela I.5 Usinas localizadas na região Nordeste	129

LISTA DE SIGLAS

ABMTENC – Associação Brasileira em Materiais e Tecnologias não Convencionais.
ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CRATerre – Centro da Construção com Terra.
EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EAG– Ecole d’Architecture de Grenoble.
LABEME - Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas
LACOM - Laboratório de Combustíveis e Materiais.
LSR - Laboratório de Solidificação Rápida.
L.T.G.S. – Low Temperature Geopolimeric Setting
MME – Ministério das Minas e Energia
MDA – Programa Nacional de Biodiesel do Ministério de Desenvolvimento Agrário.
NOCMAT – Congresso Internacional de Materiais e Tecnologias não Convencionais.
PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.
SEDAP - Secretaria de Desenvolvimento da Agropecuária e da Pesca

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.0 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização o homem para se proteger das condições atmosféricas adversas, dos animais predadores, inimigos de guerra e até mesmo para demarcar seu espaço e fronteiras em relação a outros seres humanos, utilizou-se de abrigos construídos com recursos naturais que se encontravam a sua disposição, como o solo, as fibras, as árvores nativas e as pedras. Embora as técnicas construtivas empregadas fossem primitivas, os materiais eram manuseados de forma adequada, resultando em construções, que muitas vezes não passavam de escavações feitas na própria rocha, mas que ofereciam proteção, segurança, dignidade e auto-afirmação social ao seu morador.

Na Antiguidade, embora o conhecimento do homem fosse empírico, ele soube construir moradias com habilidade, sem agredir o ambiente onde estava inserido. Com o advento da revolução industrial, as grandes conquistas do século vinte e o desenvolvimento de técnicas de exploração agressivas dos recursos naturais, sem a preocupação de como as gerações futuras seriam afetadas, chegou-se ao ponto em que o meio ambiente está sendo degradado: desmatamento, queimadas, poluição da atmosfera, do solo e da água, extinção de espécies vegetais, animais e reservas minerais. Tais agressões trouxeram consequências catastróficas para o planeta, como o efeito estufa, causado pelos altos níveis de gás carbônico emitidos na queima de combustíveis fósseis, provocando mudanças climáticas e afetando toda a população do planeta, desenvolvimento de patologias com repercussões mundiais, tudo isso, causando mudanças profundas em curto espaço de tempo, desequilibrando e ameaçando a vida no planeta. Em face desta

realidade, os governantes, estudiosos, cientistas, ong's, enfim, toda a sociedade está se mobilizando em torno de soluções eficazes e seguras, capazes de satisfazerem as necessidades de alimentação, de energias atuais, sem comprometer o desenvolvimento e a vida das gerações futuras.

Vários estudos a respeito de materiais que consomem pouca energia em sua sinterização diminuem a poluição do ar e preservam os recursos minerais e vegetais estão em andamento. Na França, o Centro da Construção com Terra (CRATerre) se propôs a desenvolver técnicas de construções com a utilização da terra crua, sem calcinação. Há 30 anos, o Prof. Minke da Universidade de Kassel, na Alemanha, desenvolve pesquisas e projetos na área da construção com terra crua. Ele fez várias aplicações na América Latina utilizando-se de protótipos de habitações com a finalidade de investigar a resistência destas moradias quando submetidas a abalos sísmicos, utilizando o bambu como reforço. Além de criar técnicas que empregam a terra extrudada no estado plástico, ou a terra ensacada em tecidos de algodão, ele criou equipamentos que permitem medir a resistência à erosão da chuva, a abrasão e aos impactos dinâmicos (MINKE, 2005 e 2007).

No Brasil, o pioneiro nos estudos desses materiais de menor impacto ambiental como, bambu e fibras vegetais, por exemplo, foi o Prof. K. Ghavami da PUC-Rio. Já em 1984, ele organizou o primeiro congresso sobre materiais de construção não convencionais. Atualmente, a Associação Brasileira em Materiais e Tecnologias não Convencionais (ABMTENC), fundada por aquele pesquisador em 1996, tem organizado periodicamente o congresso da série NOCMAT no Brasil e no Exterior. O evento já vai para sua 13ª edição em setembro de 2011, Hunan, China.

Na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a terra crua foi estudada sob forma de tijolos prensados e de adobes (SOUSA, 1993 e 1996a; BARBOSA *et al.*, 1996; BARBOSA e MATTONE, 1996) e de painéis de paredes com estes blocos (SOUSA *et al.*, 1996b) e de blocos prensados de solo-cimento (SOUSA *et al.*, 2008). A experiência de implantação da tecnologia construtiva de blocos prensados de terra crua, que teve grande aceitação por parte da comunidade carente no Estado da Paraíba, tem mostrado a viabilidade do uso desse produto (BARBOSA, 1996).

Outro material que está sendo estudado no Brasil, desde o final da década de 90 é o geopolímero. Os primeiros estudos sobre os geopolímeros abordaram as argamassas e cimentos geopoliméricos (THAUMATURGO *et al.*, 1999a; 1999b e SILVA *et al.*, 2000).

Na UFPB, o estudo sobre geopolímero foi iniciado em 2006, com o trabalho explorando fontes paraibanas de aluminosilicatos (GOMES, 2008), várias outras pesquisas em torno desse assunto estão sendo conduzidas, o geopolímero como adesivo para colagem de peças de alumínio (DE BARROS *et al.*, 2010), as propriedades térmicas em compósitos geopoliméricos (SILVA, 2009), adesivos alcalinamente ativados (DE SOUZA, 2009) entre outros.

O termo geopolímero foi criado pelo químico francês Davidovits nos anos 70, para representar polímeros inorgânicos que podem possuir características cimentantes. Os geopolímeros são empregados na produção de componentes resistentes ao fogo, na construção de estruturas e na imobilização de resíduos tóxicos e/ou radioativos. Sua aplicação em concretos tem sido introduzida com sucesso na indústria. Eles possuem boa estabilidade térmica e são de fácil manuseio. Este material também pode ser utilizado para construções de moradias, sendo ecologicamente correto, pois não produz poluição no meio ambiente, não requer calcinação, adquirindo altas resistências à baixa temperatura, em torno de 45°C, que corresponde à temperatura do material sinterizando a energia solar. Desta forma, pode-se reduzir o consumo de energia e promover a sustentabilidade ambiental, pois em comparação com o cimento Portland, o geopolímero é considerado menos agressivo ao meio ambiente, podendo fazer uso inclusive de resíduos agro-industriais.

O estado da Paraíba possui recursos minerais para fornecer os aluminosilicatos para a formação de geopolímeros. Dentre eles destacam-se a bentonita, o caulim, as argilas, os solos e as concreções lateríticas.

Atualmente, em todo o mundo, está-se produzindo combustível a partir de matéria prima renovável, como é o caso do biodiesel. Durante o seu processo de fabricação geram-se resíduos líquidos alcalinos, provenientes da lavagem daquele produto, cujas características químicas podem contribuir para a reação geopolimérica devido à alcalinidade inerente a tais resíduos.

A água residual proveniente da purificação do biodiesel contém catalisadores como o KOH (hidróxido de potássio) e o NaOH (hidróxido de sódio), que apresentam valores de pH superiores a 9. O hidróxido de potássio e o hidróxido de sódio são por sua vez ativadores em potencial para a formação do geopolímero.

No presente trabalho, o potencial da água de lavagem do biodiesel será estudado como um agente coadjuvante na ativação da formação do geopolímero visando o desenvolvimento de blocos prensados estruturais.

1.1 OBJETIVOS

Estudar o comportamento de um solo quimicamente estabilizado através do uso de metacaulim ativado alcalinamente com hidróxido de sódio, silicato de sódio e água de lavagem do biodiesel, para a fabricação de blocos prensados estruturais.

1.1.1 Objetivos Específicos

Avaliar o potencial do resíduo líquido do biodiesel pelas características físico-químicas;

Observar os efeitos da incorporação do resíduo de biodiesel nas propriedades de resistência à compressão, à flexão, durabilidade e absorção dos compósitos;

Analisar o comportamento mecânico e as características microestruturais dos compósitos geopoliméricos;

Avaliar o efeito do teor de geopolímeros produzidos com resíduos líquidos de biodiesel na durabilidade de blocos de terra crua prensados;

Avaliar o papel da temperatura e tempo de cura nas propriedades mecânicas e microestruturais dos blocos prensados de terra crua.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.0 INTRODUÇÃO

Neste capítulo foram abordados os conhecimentos mais atuais referentes aos geopolímeros, como as suas propriedades, aplicações, mecanismos dos processos reativos e materiais que envolvem a sua composição. Foi estudado também, o processo de obtenção, a capacidade de produção de resíduos líquidos das usinas de biodiesel no Brasil e a perspectiva de uso desses resíduos como materiais estruturais e na construção de blocos para habitações populares.

2.1 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos constituídos por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente pelo compartilhamento de átomos de oxigênio. A carga negativa do Al no estado de coordenação IV deve ser balanceada por íons positivos, tais como Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ (DAVIDOVITS, 1991).

Geopolímeros são materiais sintéticos formados por ativação de partículas sólidas, ricas em silício e alumínio, através de soluções alcalinas. A ativação alcalina também é conhecida como geopolymerização, termo proposto por Davidovits para este tipo de reação, dada a sua semelhança com a síntese dos polímeros orgânicos de condensação no que diz respeito às condições hidrotérmicas de partida.

Em relação à constituição química, os geopolímeros podem ser vistos como equivalentes amorfos de certas zeólitas sintéticas. Os aluminosilicatos hidratados com a

mesma composição química das zeólitas divergem destas, no aspecto da estrutura que não é cristalina, mas é quase totalmente amorfa. Nas zeólitas a velocidade como se processa a reação é lenta e em abundante fase aquosa, o que favorece a formação de cristais, já nos geopolímeros como esta reação é mais rápida e a fase líquida é apenas a indispensável para hidratação dos vetores de reação dos geopolímeros, a estrutura formada é caracterizada pela amorficidade.

De acordo com Davidovits (1991), os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que os átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigênios.

Como o alumínio Al^{3+} e o silício Si^{4+} têm coordenação IV com o oxigênio O^{2-} , ou seja, estão ligados cada um a quatro átomos de oxigênio dispostos nos vértices de um tetraedro imaginário, gera-se um déficit de carga 5^- no alumínio e 4^- no silício que tem de ser compensado com cátions do tipo Na^+ , K^+ , Mg^{++} ou Ca^{++} para se alcançar o equilíbrio elétrico na matriz (DAVIDOVITS, 1991).

Os geopolímeros possuem a seguinte Eq. (2.1) empírica:



Onde: **M** é um cátion;

n é o grau de polimerização;

z é igual a 1, 2 e 3.

Na Tabela 2.1 é apresentada a nomenclatura dos geopolímeros.

Tabela 2.1 – Nomenclatura dos geopolímeros

z	Nome	Simbologia	Si:Al
1	Polisialato	PS	-Si-O-Al-O-
2	Poli(sialato-siloxo)	PSS	-Si-O-Al-O-Si-O-
3	Poli(siliato-disiloxo)	PSDS	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-

A nomenclatura para esses polímeros minerais baseada no termo polysialato, conforme Fig. 2.1, foi estabelecida no encontro realizado em Estocolmo, 1976, durante o International Symposium on Macromolecules (Simpósio Internacional de Macromoléculas). O termo sialato foi sugerido para abreviar silico-oxo-aluminato.

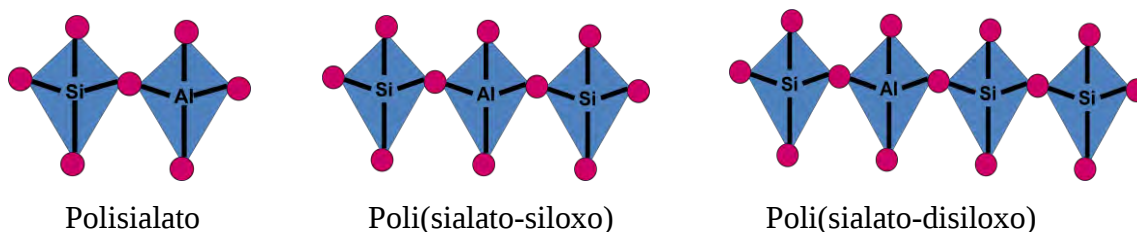


Figura 2.1 – Esquema das estruturas moleculares de polysialatos (DAVIDOVITS, 2008).

A ativação alcalina promove uma alteração profunda na estrutura do aluminossilicato, em curto espaço de tempo, a estrutura plana hexagonal vai se transformar numa estrutura tridimensional em que os anions tetraédricos SiO_3 e Al_2O_3 vão se ligar alternadamente, compartilhando todos os oxigênios dos vértices. Como mostra o modelo proposto por Davidovits (1994) na Fig. 2.2.

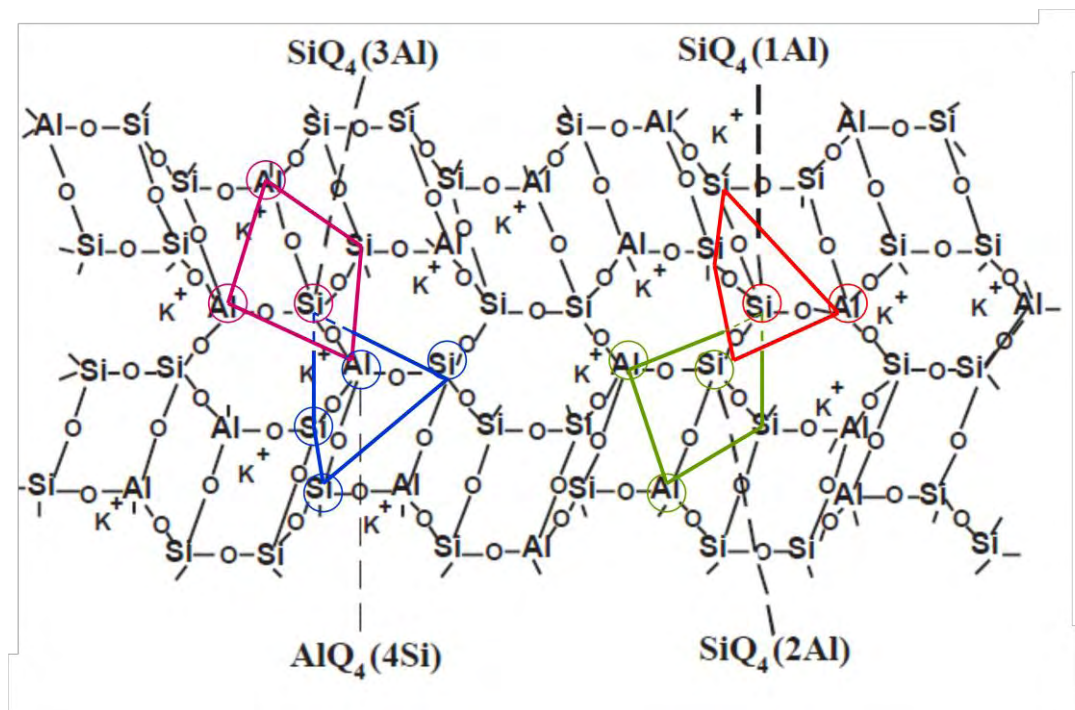


Figura 2.2 - Proposta de modelo estrutural teórico para o geopolímero K-poli (sialato-siloxo) (DAVIDOVITS, 1994).

Na Fig. 2.2 podem ser vistos, em destaque, os arranjos entre os tetraedros de silício e de alumínio, eles encontram-se de maneira desorganizada, como é próprio das estruturas amorfas. Na Tab. 2.2 estão indicadas as possíveis ligações entre os tetraedros de silício e de alumínio.

Tabela 2.2 – Ligações entre os tetraedros de silício e de alumínio.

Símbolo	Ligações entre os tetraedros de silício e de alumínio
SiQ₄(1Al)	Um tetraedro de SiO ₄ ligado a um tetraedro de AlO ₄
SiQ₄(2Al)	Um tetraedro de SiO ₄ ligado a dois tetraedros de AlO ₄
SiQ₄(3Al)	Um tetraedro de SiO ₄ ligado a três tetraedros de AlO ₄
AlQ₄(1Si)	Um tetraedro de AlO ₄ ligado a quatro tetraedros de SiO ₄

Davidovits (2008) refere-se a outros autores como Barbosa *et al.* (2000), que a partir do estudo da hidratação do cimento geopolimérico, criaram um novo modelo estrutural, que por conseguinte foi modificado por Rowles.

Rowles (2004) propôs um modelo planar para a estrutura do geopolímero, conforme se pode ver na Fig. 2.3.

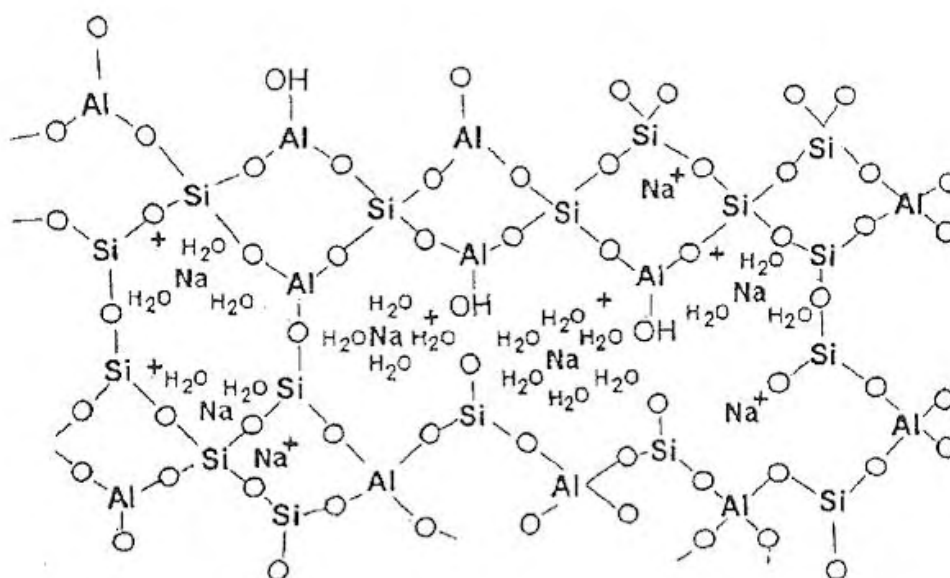


Figura 2.3 – Proposta de modelo planar para estrutura da reação incompleta e não estável do poli(sialato-siloxo) dos geopolímeros (ROWLES, 2004), baseado em Barbosa *et al.* (2000).

A estrutura geopolimérica tem a capacidade de fixar um grande número de cátions para compensar o déficit de cargas decorrentes das ligações entre os ânions SiO_4^{4-} e AlO_4^{5-} . Essa propriedade dá condição do geopolímero de promover o encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos. Para esta estrutura Davidovits (2002) criou o modelo, que pode ser visto na Fig. 2.4.

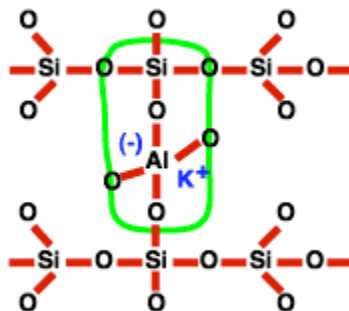


Figura 2.4 – Modelo estrutural de geopolímeros poli(sialato-siloxo) usado no encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos (DAVIDOVITS, 2002).

2.1.1 Mecanismos de Geopolimerização

A geopolimerização é uma reação que se manifesta em abundância na natureza e baseia-se na capacidade do alumínio em induzir, por ativação alcalina, alterações químicas e cristalográficas numa estrutura de matriz silicosa (TEXEIRA PINTO, 2004).

O mecanismo de formação dos geopolímeros está representado na Fig. 2.5, e contém as seguintes etapas:

A - Dissolução onde a solução alcalina hidrolisa a superfície do mineral e também dissolve uma pequena quantidade de espécies Al e Si. Nesta fase o OH atua como um catalisador da reação, e o cátion alcalino do metal atua como um elemento de formação da estrutura.

B - As espécies dissolvidas reagem com os íons silicatos já dissolvidos e polimerizam por reações de condensação;

C - Início da formação do gel;

D - Reorganização da estrutura;

E - Formação de um gel que é transformado na estrutura final.

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 álcalis, bem como o tamanho de partículas e a estrutura cristalina das fontes de sílica e alumina terão uma maior influência na eventual formação de gel via espécies dissolvidas (VAN JAARVELD, VAN DEVENTER e LORENZEN, L., 1998).

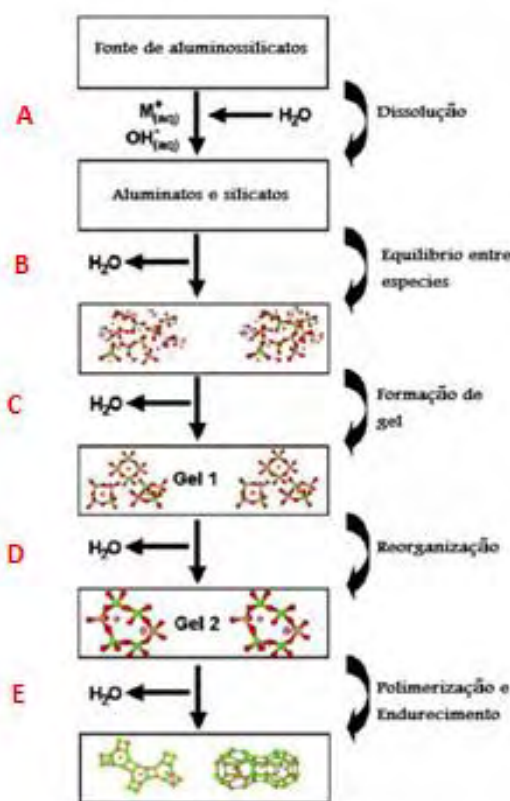


Figura 2.5– Esquema do mecanismo de geopolimerização (Duxson *et al.*, 2007)

Em muitos casos, a dissolução dos 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 (VAN JAARVELD e VAN DEVENTER, 1999).

Durante a síntese, os cátions de metais alcalinos desempenham um papel muito importante na ordenação das moléculas de água e, depois, na solubilização das espécies para começar o processo de nucleação que conduzirá à formação da estrutura. O tamanho do cátion também afeta a morfologia do eventual cristal, sendo o potássio o responsável por um maior grau de condensação, quando comparado ao sódio, sob as mesmas condições. A escolha do tipo de álcali a ser utilizado durante a síntese dependerá de muitos

fatores, sendo o mais importante o tipo de material de partida a ser utilizado, bem como o objetivo final em termos de aplicação (VAN JAARSVELD e VAN DEVENTER, 1998).

Segundo Duxson *et al.* (2007), a ativação alcalina é o resultado de duas fases sucessivas e de controle. Primeiramente ocorre a nucleação ou a dissolução do material aluminosilicoso e a formação de espécies poliméricas, que são altamente dependentes da termodinâmica, e dos parâmetros cinéticos. Posteriormente, ocorre o desenvolvimento dos cristais

Segundo Palomo *et al.* (1999), a ativação alcalina, também denominada de geopolimerização, é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfa e/ou metaestável) em um compósito bem compactado e cimentante.

2.1.2 Precursores Geopoliméricos

2.1.2.1 Caulim

É um mineral industrial que possui as seguintes características: é quimicamente inerte em uma ampla faixa de pH; tem cor branca, apresenta ótimo poder de cobertura quando usado como pigmento ou como extensor em aplicações de cobertura e carga, é macio e pouco abrasivo, possui baixas condutividades de calor e eletricidade e seu custo é mais baixo que a maioria dos materiais concorrentes.

Os caulins resultam da ação do intemperismo ou hidrotérmica sobre rochas feldspáticas, sendo classificados em primários e secundários. Os primários, ou residuais, são produtos de decomposição de rochas e contêm grandes quantidades de restos da rocha matriz, tais como quartzo, mica e feldspato. Os residuais 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 haloisita isolados ou de mistura em diversas proporções; nos caulins secundários, o argilomineral presente é geralmente a caulinita (SOUZA SANTOS, 1998).

A caulinita é um aluminosilicato lamelar, de fórmula $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$, formado por tetraedros de silício e octaedros de alumínio unidos pelo compartilhamento de átomos de oxigênio, conforme pode ser visto na Fig. 2.6.

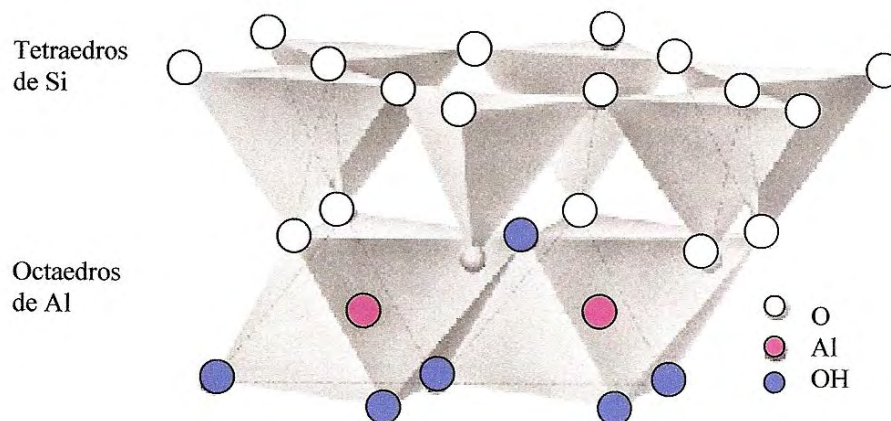


Figura 2.6– Estrutura da caulinita (<<http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/applychem/alsilicate.html>>) SILICATO DE ALUMINIO, 2007

Os caulins são amplamente explorados na indústria, Suas principais aplicações são como agentes de enchimento filler no preparo de papel; como agente de cobertura coating para papel couché e na composição das pastas cerâmicas. Em menor escala o caulim é usado na fabricação de materiais refratários, plásticos, borrachas, tintas, adesivos, cimentos, inseticidas, pesticidas, produtos alimentares e farmacêuticos, catalisadores, absorventes, dentifrícios, clarificantes, fertilizantes, gesso, auxiliares de filtração, cosméticos, produtos químicos, detergentes e abrasivos, além de cargas e enchimentos para diversas finalidades (SILVA, 2001).

Os países que detém 95% das reservas mundiais de caulim são: os Estados Unidos que contribuem com 53%, o Brasil com 28%, a Ucrânia e a Índia com 7% cada (SILVA, 2001).

No Brasil, existem depósitos de origem pegmatítica ou granítica no nordeste (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia), Amazonas, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, todos se encontram em exploração industrial comercial (SOUZA SANTOS, 1989).

Os Estados do Pará, Amazonas e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando, respectivamente, com 56%, 41% e 2% do total (MÁRTIRES). A produção no estado da Paraíba corresponde a menos de 1% da produção nacional, porém a extração do caulim possibilita a geração de uma renda que é responsável pela sobrevivência de muitas famílias das cidades do interior da Paraíba, destacando-se com a

maior produção o município de Junco do Seridó, seguido pelas cidades de Juazeirinho, Assunção e Salgadinho (MOTTA, 2009).

2.1.2.2 Metacaulinita

Os caulins, quando tratados termicamente a temperaturas específicas, fornecem produtos com propriedades características de significado industrial, chamados caulins calcinados. O caulim contém como principal mineral a caulinita. A caulinita, quando aquecida, se transforma inicialmente em metacaulinita até chegar a mulita (SOUZA e SANTOS, 1998)

A temperatura de calcinação entre 550°C a 750°C ocorre a desidroxilação da estrutura hexagonal da caulinita originando um material amorfo ao RAIO-X, denominado metacaulinita. Como se pode ver na Fig. 2.7

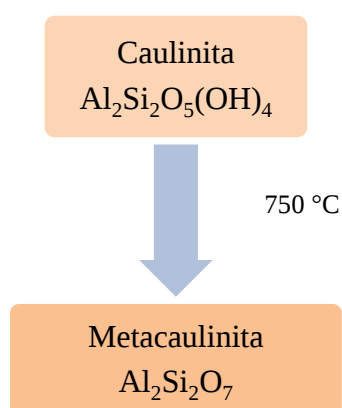


Figura 2.7 - Transformação térmica da caulinita para metacaulinita.

Na metacaulinita, a rede Si-O permanece intacta, enquanto a rede Al-O se reorganiza da forma octaédrica para tetraédrica, desta maneira, a metacaulinita pode ser considerada uma fase precursora bastante adequada à produção de geopolímeros, uma vez que, este é constituído de tetraedros de Si e Al, tal qual o geopolímero. A metacaulinita melhora as propriedades mecânicas e químicas do compósito geopolimérico. Essas propriedades são em função, principalmente, da natureza e abundância do argilomineral na matéria-prima, das condições de calcinação e do tamanho da partícula do material. Entre as aplicações da metacaulinita, está um produto de alta reatividade utilizado como carga na

indústria do concreto, denominado metacaulinita de alta reatividade (produto refinado e sem impurezas), que gera um produto de propriedades melhoradas comparáveis à sílica ativa.

2.1.3 Aplicações dos Geopolímeros

Estes materiais estão sendo aplicados nas indústrias: automobilística e aeronáutica, na fundição não ferrosa e metalúrgica, na engenharia civil e na indústria de plásticos. Podem ser usados puros ou na forma de compósitos (DAVIDOVITS, 1991).

Os geopolímeros também podem ser aplicados na preparação de compósitos com fibra de carbono, para serem aplicados no interior de cabines e outros componentes de aeronaves cuja matriz não é combustível. Esses materiais são adequados para situações onde se deseja alta resistência à queima e com custo baixo a moderado.

Balaguru (2007) verificou o uso dos geopolímeros em substituição aos polímeros orgânicos em compósitos de fibra de carbono aderidos a feixes de concreto. Os resultados mostraram vantagens quanto à resistência à queima, a durabilidade frente à luz UV, e a retenção de qualquer substância tóxica.

Também são utilizados como reforço de fibra em compósitos de concreto e aço, com a função de proteger estruturas; na construção de sensores piezoelétricos para temperaturas entre ambiente e 1360°C; na construção de varistores e resistores; recobrimento de superfícies contendo carbono, agregantes para o tratamento de materiais (MARINHO, 2004).

Dentre as características que dão destaque a este material incluem-se alta resistência inicial, baixa retração, resistência a sulfatos, resistência a ciclos resfriamento-descongelamento e melhor adesão.

Na construção civil os geopolímeros vão se constituir nos ligantes do futuro, com os quais é possível fabricarem-se argamassas e concretos de desempenho superior. Mesmo aglomerando o solo, para fabricar blocos prensados, já se tem aplicação (DAVIDOVITS, 2010).

Uma das mais importantes propriedades do compósito geopolimérico, usando como componente o solo, é a sua capacidade de absorver o vapor d'água, o que favorece o conforto térmico da construção. À noite este material armazena a umidade da condensação do ar do exterior e de dia a lança para o interior ou exterior. Esta capacidade bioclimática

do geopolímero misturado ao solo de manter os ambientes internos em equilíbrio higratérmico com o externo traduz-se numa moradia isolada do calor, de dia, e do frio, à noite (DAVIDOVITS, 2010).

Segundo Davidovits, os geopolímeros por serem constituídos de aluminosilicatos, suas propriedades e aplicações são determinadas pela relação entre a sílica e alumina como apresentada de forma resumida na Tabela 2.3 (DAVIDOVITS, 1999).

Tabela 2.3 – Aplicações de materiais geopoliméricos baseado na razão atômica Si:Al

Si:Al	Aplicações
1	Tijolos Cerâmica Proteção contra incêndio
2	Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos Cimentos e concretos com baixa emissão de CO ₂
3	Compósitos de fibras resistentes ao fogo Equipamento para fundição Compósitos resistentes ao calor, 200 °C a 1000 °C
>3	Selantes para indústria, 200 °C a 1000 °C Cabines e componentes para aeronáutica
20-35	Compósitos de fibra resistentes ao fogo e à altas temperaturas

2.2 BIODIESEL

O biodiesel é definido como um éster de ácido graxo de cadeia longa (monoéster alquílico), derivado de fontes de lipídios renováveis, como óleos vegetais e gordura animal, através da reação de transesterificação com álcool de cadeia curta, como metanol e etanol. O produto obtido é comparável com o biodiesel obtido a partir do óleo refinado.

As oleaginosas que mais se destacam para a produção do biodiesel são as sementes de soja, amendoim, mamona, canola (colza), babaçú, girassol, milho e algodão por apresentarem um alto teor de óleo nas sementes. Estes óleos são compostos principalmente por triglicerídios, que ao reagirem com o álcool, na presença de um catalizador, produzem

ésteres (biodiesel) e glicerina como subproduto, além de mono e diglicerídios, como intermediários.

O biodiesel é um combustível alternativo de queima limpa, produzido por recursos renováveis, formado através do processo químico chamado transesterificação onde a glicerina é separada da gordura ou do óleo vegetal. O produto gera um éster (biodiesel) e uma glicerina (sabão). Tem como vantagem a ausência de enxofre e de compostos orgânicos nocivos ao ser humano, além de ser uma fonte de energia renovável e ser biodegradável.

Embora o biodiesel seja considerado ambientalmente limpo, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), em 2002, verificou que a taxa de emissão de NOx (responsáveis pelas chuvas ácidas) pode aumentar entre 10% a 25%, dependendo da composição química do biodiesel em relação ao diesel comum (VICHÍ e MANSOR, 2009).

Outro problema ambiental ocorre quando se faz uso de metanol na síntese do biodiesel, que acaba gerando resíduos tóxicos na etapa de lavagem. Desta maneira, a água de lavagem do biocombustível é rica em metanol, além de outros subprodutos, que acabam sendo descartados sem nenhum tipo de tratamento. O impacto ambiental causado por este tipo de efluente é de difícil avaliação, por causa da variedade de compostos oriundos da matéria-prima, reagentes, produtos e subprodutos do processo (GRANGEIRO, 2009).

2.2.1 Biodiesel no Brasil

Em face da grande demanda de energia, o Brasil está investindo em fontes renováveis como a biomassa, tendo como o principal representante, o etanol, obtido a partir da cana-de-açúcar, ocupando o segundo lugar no ranking mundial, superado apenas pelos Estados Unidos, sendo este o líder mundial na produção de energia a partir da biomassa. No Brasil a biomassa conta com a participação de 3,7% da oferta total de energia somente superada pela hidreletricidade, conforme Fig. 2.8.

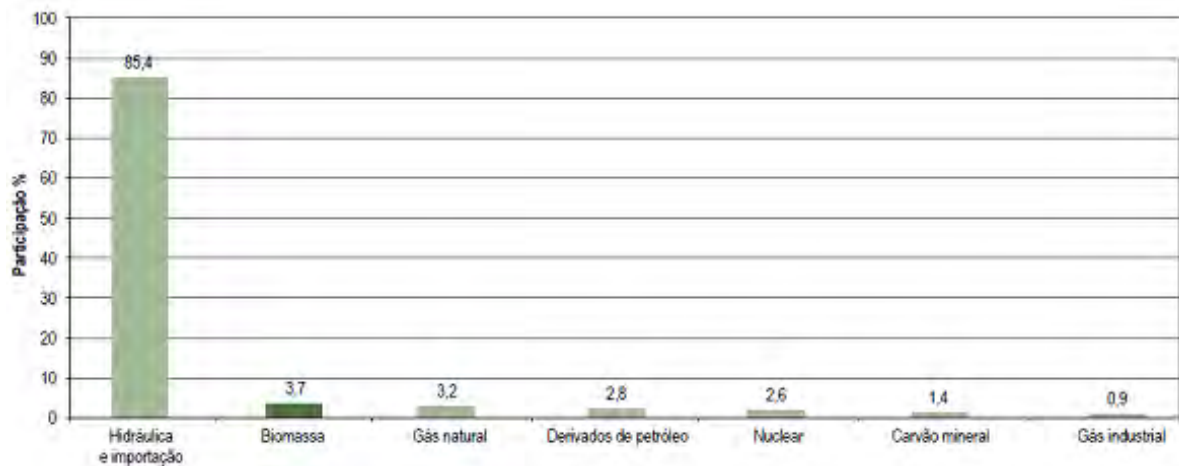


Figura 2.8- Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007 (ANEEL, 2008).

A biomassa pode ser usada como matéria-prima para gerar calor, eletricidade e força motriz para as indústrias, sendo menos poluente que os combustíveis derivados do petróleo e o carvão. No processo da obtenção da energia termelétrica, os resíduos voláteis oriundos da combustão da matéria-prima, como as cinzas retidas nas chaminés, são aproveitadas em processos de metalurgia e na construção civil.

A produção de biodiesel também é crescente, segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis), o Brasil produziu 789.832m³, em 2008 diante dos 402.154 m³, em 2007 (ANEEL, 2008).

Em nível mundial o Brasil conta com 13,4% ao lado da Alemanha, conforme se pode verificar na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Produtores de bionergia em 2005

Produtores de Bionergia em 2005		
País	TWh	%
Estados Unidos	56,3	30,7
Alemanha	13,4	7,3
Brasil	13,4	7,3
Japão	9,4	5,1
Finlândia	8,9	4,9
Reino Unido	8,5	4,7
Canadá	8,5	4,6
Espanha	7,8	4,3
Outros países	57,1	31,3
Total	183,3	100

Fonte: ANEEL, 2008

A Tabela 2.5 apresenta a quantidade de biodiesel possível de ser ofertada através de cada uma das fontes analisadas para o período de 2008 a 2017, na região nordeste. As informações da oferta de biodiesel por regiões no Brasil encontram-se na Tabela 2.6.

Desde 2004, o Governo Federal tem estimulado esta atividade através do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 2007, cujos investimentos em obras superam a R\$ 17 bilhões. Segundo a ANEEL, o PAC deverá investir mais de R\$ 13,3 bilhões na construção de usinas de etanol e biodiesel (ANEEL, 2008).

O consumo obrigatório do biodiesel foi estabelecido pela lei nº 11.097/05, refere-se ao percentual mínimo de 2% de adição ao óleo diesel comercializado ao consumidor, que teve início em janeiro de 2008, até alcançar 5% em 2010.

Tabela 2.5 - Potencial de oferta no Nordeste de biodiesel (milhões de litros)

Região	Fonte	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nordeste	Soja	166	174	197	186	193	200	206	214	220	227
	Soja grão exportação	340	335	354	358	373	381	393	402	414	424
	Mamona	57	59	61	62	64	66	68	69	71	73
	Dendê	27	28	29	30	31	31	32	33	34	35
	Outros	83	85	87	90	92	95	97	100	102	105
	Sebo bovino	116	119	122	125	128	132	135	138	142	145
	Graxa suína	16	16	16	17	17	17	18	18	19	19
	Gordura de aves	8	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	Borra	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Total	814	825	858	878	910	933	961	987	1014	1040

Fonte: MME e EPE, 2009

Tabela 2.6 – Potencial regional de oferta no Brasil de biodiesel (milhões de litros)

Região	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Norte	439	448	463	474	488	501	514	527	541	555
Nordeste	814	825	858	878	910	933	961	987	1014	1040
Sudeste	1241	1260	1309	1340	1387	1423	1466	1506	1549	1589
Sul	3474	3505	3668	3752	3902	4005	4139	4257	4385	4505
Centro-oeste	4903	4944	5164	5278	5480	5617	5795	5953	6123	6281
Brasil	11170	11308	11816	12103	12576	12915	13339	13721	14131	14517

Fonte: MME e EPE, 2009

Tabela 2.7 – Consumo Obrigatório de Biodiesel por Região (milhões de litros)

Ano/Região	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Norte	116	137	240	252	237	248	261	274	288	302
Nordeste	162	206	361	379	399	419	442	466	492	518
Sudeste	515	648	1130	1186	1246	1310	1377	1448	1524	1603
Sul	219	276	484	510	536	565	595	626	660	695
Centro-Oeste	119	149	262	276	291	307	323	341	359	378
Brasil	1130	1417	2477	2602	2709	2849	2999	3156	3322	3495

Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2008-2017

Na Tabela 2.7 são apresentadas as previsões do consumo obrigatório regional do biodiesel.

Na Tabela 2.8, estão sintetizadas as informações sobre a capacidade brasileira de processamento do biodiesel, apresentando a quantidade total de biocombustível possível de ser ofertada com a utilização da capacidade de processamento das usinas de biodiesel no país, tanto a já autorizadas como a projetada, discriminada por região geográfica.

O Programa de Biodiesel na Paraíba foi criado através da Lei estadual 7.761 de 15 de junho de 2005 (GOVERNO DA PARAÍBA, 2011). Neste mesmo ano, as ações para ingresso do Estado Paraíba no Programa do Nacional do biodiesel, da Petrobrás, foi o de incentivar a produção de sementes de girassol e de mamona.

Inicialmente o Governo da Paraíba pretendia contemplar 56 municípios zoneados para a cultura de girassol e de mamona. A meta era de explorar uma área de dois mil hectares, nas regiões do Brejo, Agreste, Curimataú e Litoral paraibano.

No município de Patos, na fazenda Tamanduá, foram iniciadas experiências com o plantio de pinhão manso (*Jatropha curcas*). Este cultivo mostrou-se como uma alternativa economicamente viável para produção de biodiesel, nesta região. A cultura do pinhão manso dispõe das seguintes vantagens: ser uma produção perene o ano todo, possuir longevidade de 50 anos, ter a facilidade de se adaptar ao clima, à pluviometria e ao solo do semi-árido, além de apresentar um menor período de colheita e também melhor custo benefício. Segundo o professor de Engenharia Florestal da UFPB, que participou desse projeto, Ricardo Viegas, “O pinhão manso pode ser cultivado desde o nível do mar até em altitudes elevadas, se adapta tanto nos terrenos de encosta, nos áridos e úmidos, além de produzir com qualidade em terras de pouca fertilidade, a colheita se estende por cerca de seis meses, o custo é mais barato e tem alta produção” (JORNAL DA PARAÍBA, 2006).

Tabela 2.8 – Capacidade instalada de processamento de biodiesel

Região	Ml/ano			% Total (Autorizadas + em processo		
	Total	Autorizado	Em processo de autorização	Total	Autorizado	Em processo de autorização
Norte	301	169	132	7,2	4,1	3,2
Nordeste	1041	619	422	25,0	14,9	10,2
Sudeste	714	693	21	17,2	16,7	0,5
Sul	779	598	181	18,7	14,4	4,3
Centro-Oeste	1322	1048	274	31,8	25,2	6,6
Brasil	4158	3128	1030	100	75,2	24,8

Fonte: Elaboração EPE a partir de ANP

Em maio de 2009 foi realizada uma reunião com o coordenador do Programa Nacional de Biodiesel do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA), que teve como foco principal o Projeto Pólos do Biodiesel na região Nordeste, o andamento do programa no país e a definição da implantação de pólos nos municípios da Paraíba. Em novembro de 2009, no encontro do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que ocorreu na cidade de Patos e em João Pessoa, a Secretaria de Desenvolvimento da Agropecuária e da Pesca (SEDAP) confirmou investimento de até R\$ 700 mil reais na produção de biodiesel proveniente do óleo de mamona e de girassol. Este investimento deverá beneficiar 125 municípios paraibanos (PAULA FELIX, 2010).

Em 13 de janeiro de 2010, o Governador do Estado reuniu-se com o Ministro das Minas e Energia, Edson Lobão, em Brasília, (DF). Neste encontro o Governador recebeu do ministro a garantia de apoio a três projetos, que serão desenvolvidos pelo Governo do Estado no setor energético, são eles: a elaboração do projeto da usina de biodiesel, a instalação de uma usina termosolar e a confecção do Atlas Eólico da Paraíba (CLEANE COSTA, 2011).

2.2.2 Produção de Biodiesel

O processo químico adotado para a produção de biodiesel é a reação de transesterificação, na qual um óleo vegetal ou animal, reage com um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador, geralmente alcalino, sendo os mais utilizados o NaOH (hidróxido de sódio) e o KOH (hidróxido de potássio) para formar ésteres monoalquílicos (biodiesel) e glicerina. No processo de purificação do biodiesel através da lavagem com água, esta retira e concentra os hidróxidos alcalinos do biodiesel.

A transesterificação pode ser realizada tanto em meio ácido quanto em meio alcalino, porém ela ocorre mais rapidamente na presença de catalisador alcalino do que na presença de um catalisador ácido. Na indústria, a reação alcalina é a mais empregada, pois ela apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação, além de ter menores problemas relacionados à corrosão de equipamentos (ZANIER *et al.*, 1996). Os catalisadores mais eficientes para esse propósito são o hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH).

A concentração de hidróxidos alcalinos na água de lavagem viabiliza o seu reaproveitamento na sinterização de geopolímeros. A concentração de álcalis tem uma

grande influência na formação de gel, produzida principalmente pela copolimerização de espécies de alumina e sílica individuais, dissolvidas pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina (VAN JAARSVELD e VAN DEVENTER, 1998).

2.2.3 Transesterificação

A transesterificação de um óleo com monoalcoois (alcóolise), especificamente metanol ou etanol, promove a quebra da molécula dos triacilglicerídios, gerando mistura de ésteres metílicos ou etílicos dos ácidos graxos correspondentes, liberando glicerina como co-produto.

A transesterificação, de um modo geral, é a reação de um lipídeo com um álcool para formar um éster e um co-produto, o glicerol, é um processo relativamente simples, reduz a massa molecular para um terço em relação aos triacilglicerídeos, como também reduz a viscosidade e aumenta a volatilidade.

Na transesterificação são usadas duas rotas alcoólicas: metílica e etílica.

A rota metílica em comparação a rota etílica possui as seguintes vantagens: o consumo de metanol é cerca de 45% menor que o do etanol anidro; o preço é mais baixo, é mais reativo com o triacilglicerídeo nas mesmas condições operacionais e o tempo de reação é menos da metade do tempo quando se usa o etanol. Considerando a mesma produção de biodiesel, o consumo de energia é menos da metade na rota metílica; os equipamentos de processo são cerca de $\frac{1}{4}$ do volume de equipamentos usados para a rota etílica, dissolve facilmente o catalisador básico e permite a separação simultânea do glicerol.

A rota metílica embora possa ser produzida a partir da biomassa, é usualmente sintetizado a partir do gás natural, produto fóssil. É bastante tóxico e possui risco maior de incêndio. É controlado pela Polícia Federal, por se tratar de matéria-prima para extração de drogas.

Embora menos reativo que o metanol e com os problemas tecnológicos envolvidos, o etanol, no Brasil apresenta um grande potencial devido a sua baixa toxicidade e fácil disponibilidade (SCHUCHARDT *et al*, 1997).

Na rota etílica, a produção alcooleira no Brasil já está consolidada, é feito a partir da biomassa e produz um combustível que é 100% renovável. Gera mais ocupação e renda

no meio rural. Não é tão tóxico quanto o metanol. Possui menor risco de incêndio, dissolve facilmente o catalisador básico e permite a separação simultânea do glicerol.

As desvantagens dos ésteres etílicos são: eles têm mais afinidade a glicerina, dificultando a separação; o etanol possui azeotropia, quando misturado em água, com isso sua desidratação requer maiores gastos energéticos e com equipamentos; dependendo do preço da matéria-prima, os custos de produção do biodiesel etílico podem ser 100% maiores do que o metílico.

Os tipos de catalisadores usados na transesterificação dos triacilglicerídeos estão na tabela 2.9.

Tabela 2.9 - tipo de catalisadores usados na transesterificação

Alcalinos	NaOH (hidróxido de sódio) KOH(hidróxido de potássio) NaOCH ₃ (Metóxido de sódio) KOHCH ₃ (Metóxido de potássio) NaOCH ₂ CH ₃ (Etóxido de sódio) KOHCH ₂ CH ₃ (etóxido de potássio)
Bases não iônicos	Trietilamina, piperidina, guanidina são usados para evitar a formação de subprodutos indesejáveis como os sabões.
Ácidos	Ácido sulfúrico, ácidos sulfônicos e ácido clorídrico.

A conversão enzimática de óleos vegetais em biodiesel oferece uma opção ambientalmente mais atrativa que os processos convencionais.

Enzimas hidrolíticas como as lipases são usadas como biocatalisadores, embora o processo enzimático não tenha sido desenvolvido comercialmente.

2.2.4 Reação de Transesterificação

Na transesterificação de óleos vegetais, um triacilglicerídeo reage com um álcool na presença de uma base ou ácido forte, produzindo uma mistura de ésteres de ácidos graxos e glicerol (SCHUCHARDT, 1997), conforme o esquema da Fig. 2.9.

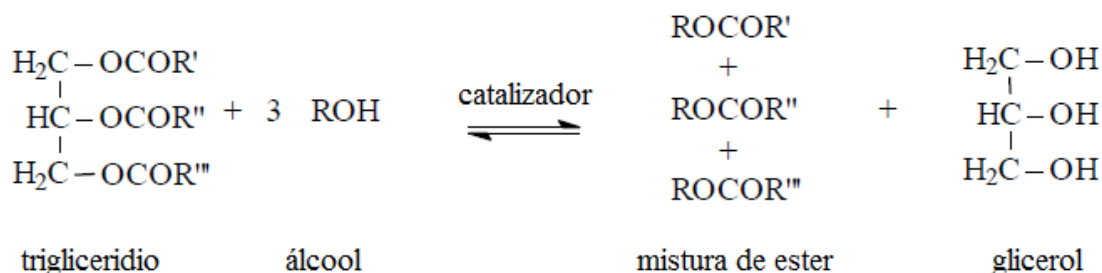


Figura 2.9 - Esquema da reação de transesterificação de um triacilglicerídeo.

Todo o processo se constitui numa sequência de três reações consecutivas e reversíveis, em que o di e monogliceróis são formados como intermediários.

Embora a reação estequiométrica requiera 3 moles de álcool para cada um mol de triglicerídeos, adota-se um excesso de álcool para favorecer as reações, aumentando o rendimento dos ésteres e permitindo sua separação da fase do glicerol formado. Na prática, a razão utilizada é de 6 moles de álcool para um mol de óleo. Assim, sempre haverá um excedente de 3 moles de álcool no fim da reação.

O processo de transesterificação de óleos vegetais com um catalisador básico ocorre mais rapidamente do que na reação ácida. Além disso, os catalisadores alcalinos são menos corrosivos do que os ácidos, geralmente as indústrias utilizam os catalisadores como metais alcalinos, hidróxidos e carbonatos de sódio e potássio.

O mecanismo de transesterificação de óleos vegetais com catalisadores alcalinos é apresentado no esquema da Fig. 2.10.

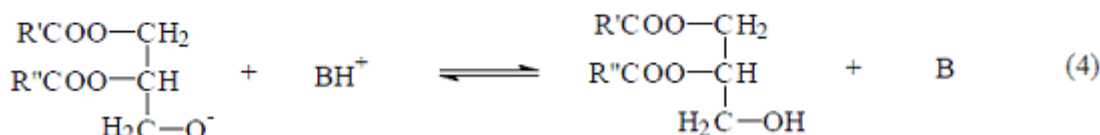
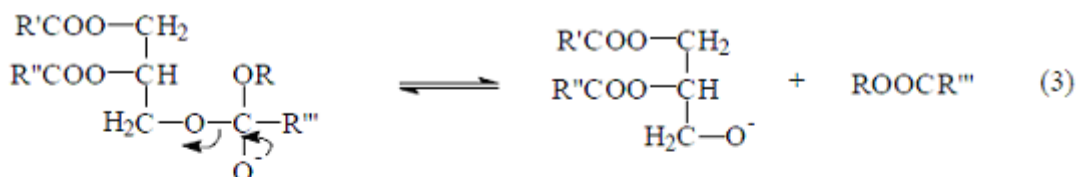
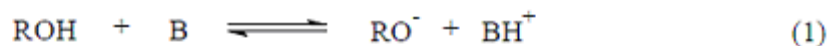


Figura 2.10 – Esquema das equações de reação de transesterificação de um triacilglicerídeo com metanol, catalisada por uma base (SCHUCHARDT *et al*, 1997).

B = base (catalizador Na, K).

1ª. Equação: é a reação de base com o álcool, produzindo um alcóxido e um catalisador com carga positiva.

2ª. Equação: o ataque nucleofílico do alcóxido ao grupo carbonílico do triglicerídeo gera um intermediário tetraédrico do carbono.

3ª. Equação: são formados, o éster alquílico do intermediário tetraédrico do carbono e o correspondente ânion do diglicerídeo.

4ª. Equação: Finalmente a reação com a base catalisadora que regenera a espécie ativa que é capaz de reagir com a segunda molécula de álcool, iniciando outro ciclo. Os diglicerídios e monoglicerídios são convertidos pelo mesmo mecanismo para formação de ésteres alquílicos e glicerol.

No processo de obtenção do biodiesel devem-se considerar os seguintes passos:

1) Preparar a matéria-prima para a efetivação da reação de transesterificação, com o objetivo de alcançar a máxima taxa de conversão;

2) A matéria-prima deve ter o mínimo de acidez e umidade, sendo realizado um processo de neutralização, efetuando uma lavagem com solução alcalina de hidróxido de sódio ou potássio seguido do processo de secagem;

3) Converter o óleo em ésteres (biodiesel), onde o produto é constituído por duas fases, separadas por decantação. A fase mais densa é composta por glicerina bruta, excessos de álcool, água e impurezas inerentes ao óleo e a fase menos densa é constituída por uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos.

A reação de transesterificação comumente é processada com razão molar de 1:6 (álcool/óleo) que corresponde a 100g de óleo, 1% do catalisador (NaOH) e 30% de álcool sob constante agitação durante certo período. A mistura de partida é preparada com 1 litro de óleo, 300g de álcool e 10 g do catalisador hidróxido de potássio (NaOH).

A mistura é transferida para funis de decantação, com o intuito de separar as fases. Após 40 minutos é possível observar duas fases bem distintas, ver Fig. 2.11. É feita a retirada do glicerol, conforme se pode ver na Fig. 2.12

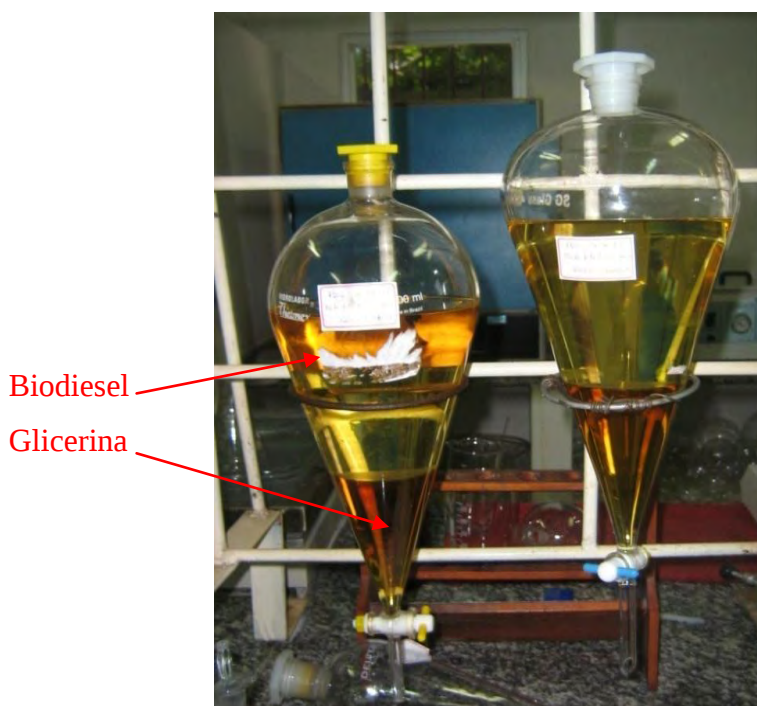


Figura 2.11 - Separação da glicerina e do biodiesel etílico (Fonte: GRANGEIRO, 2009).



Figura 2.12 - Biodiesel etílico após a retirada da glicerina. (Fonte: GRANGEIRO, 2009).

O biodiesel, no funil de decantação, passa pelo processo de lavagem, visando purificar os ésteres presentes, removendo resíduos de sabões, ácidos graxos, glicerina e outras impurezas. Estas impurezas estão concentradas na fase leitosa como podem ser vistas na Fig. 2.13.



Figura 2.13 - Lavagem do biodiesel em escala laboratorial. (Fonte: GRANGEIRO, 2009).

Cada litro de biodiesel é lavado, com três litros de água deionizada para garantir a sua limpeza, sendo gerados três litros de água de lavagem. Segundo, De Boni *et al.* (2007), o Brasil desde 2008 começou a produzir cerca de 840 milhões de litros de biodiesel, e para tanto foram gastos o equivalente a 2.520.000 m³ de água no processo de purificação, isto, levando-se em consideração a boa qualidade da matéria-prima e das quantidades de catalisador e de álcool. O grande volume de água lavagem produzida, no processo de transesterificação, requer que se desenvolvam mecanismos para minimizar o impacto ambiental.

2.2.5 Resíduo Líquido de Biodiesel (Água de Lavagem).

Durante a etapa de purificação do biodiesel são retirados todos os resíduos. A purificação do biodiesel é feita pela lavagem do produto, seguido de filtração e secagem do biodiesel.

As águas de lavagem contêm basicamente resíduos de sabões de sódio ou potássio, além dos ácidos graxos, glicerina, alcoóis (metanol ou etanol) e outros contaminantes (NOUREDDINI, 2001). Assim, os impactos ao meio ambiente ficam evidentes devido ao grande volume de água de lavagem que é produzida e descartada sem tratamento dos efluentes.

A água proveniente do processo de lavagem do biodiesel apresenta-se inapta a ser despejada em qualquer corpo hídrico, por causa das suas características físico-químicas impróprias, como pH elevado (acima de 10) e concentração de óleos e graxas. Desta forma torna-se imprescindível um tratamento para se obter um efluente com características dentro dos padrões de emissão de efluentes presentes na resolução do (Conselho Nacional do Meio Ambiente) CONAMA nº. 357. (DE BONI *et al.*, 2007).

No CONAMA, 2009, a legislação brasileira, particularmente a resolução 357/2005, estabelece que:

Art. 24. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam as condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.

Os parâmetros físicos, químicos e ecotoxicológicos caracterizam a água. A determinação desses parâmetros é exigida pelos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, dentre eles, estão o pH (potencial hidrogeniônico) da água, a turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e óleo e graxas.

A resolução 357/2005, CONAMA, recomenda as seguintes especificações:

- a) O pH deve estar entre 5 a 9 para condições de lançamento de efluentes;
- b) Nos corpos receptores a turbidez não pode ultrapassar 100 UNT (unidades nefelométricas de turbidez).
- c) As concentrações de óleos e graxas devem ser inferiores a 20 mg/l para óleo minerais e 50 mg/l para óleos vegetais e gorduras animais.

A resolução do CONAMA não estabelece valores para a DBO e nem para a DQO. Mas se sabe que o despejo de efluentes, com alto valor de DBO irá provocar o consumo de oxigênio do corpo receptor, podendo chegar a níveis de anoxia total. Já altos valores de DQO indicam a presença de matéria orgânica não biodegradável.

Grangeiro (2009) ao caracterizar as águas de lavagem de óleo de soja e de fritura, encontrou para concentração de óleos e graxas valores entre 1105 mg/l e 1855 mg/l respectivamente, bem superiores ao máximo recomendado. Para o pH o valor máximo obtido foi de 10,65 na primeira lavagem e valor mínimo de 8,56 na terceira lavagem do biodiesel de soja. Já para a turbidez encontrou os valores de 2550 UNT e 595 UNT para a primeira e terceira águas de lavagem de soja, respectivamente, ultrapassando o valor máximo de 100 UNT recomendado.

Tendo em vista a sua elevada alcalinidade, um dos usos que se vislumbra para água de lavagem de biodiesel é na síntese de geopolímeros.

2.2.6 Oxidação de Resíduos Líquidos de Biodiesel

Não existe ainda bibliografia a respeito da oxidação do resíduo líquido de biodiesel, embora já se tenha na literatura estudos sobre a oxidação do biodiesel (CANDEIA *et al.*, 2011). Como a produção de biodiesel é um processo muito complexo e sujeito a variações de composição, condições de armazenamento, dentre outras. Os diferentes ésteres de ácidos graxos insaturados presentes no biodiesel geram variados produtos de degradação (CANDEIA *et al.*, 2011).

Leung *et al.* (2011) avaliaram a degradação do biodiesel sob várias condições de estocagem e determinaram que a temperatura do ambiente e o contato com o ar são os principais fatores que aceleram a degradação do biocombustível. A presença de água no biocombustível, também causa um aumento da velocidade de degradação do biodiesel, devido à hidrólise, porém muito menos quando comparado ao efeito da temperatura e do contato com o ar.

2.3 TERRA CRUA

Atualmente um terço da humanidade vive em habitações feitas com terra. Em quase todas as regiões de clima seco e quente, a terra tem sido o material de construção mais empregado.

A demanda por habitações em países emergentes é muito grande. As ofertas de materiais industrializados como o cimento, tijolos cerâmicos, concreto, as capacidades e financeiras não conseguem suprir estas demandas de imediato. Surge como alternativa viável, para atender a demanda por habitações, a utilização de materiais locais e técnicas de autoconstrução, como a terra.

A terra é o material de construção mais abundante na maioria das regiões do mundo e oferece as seguintes vantagens (MINKE, 2008):

- a) Regula a umidade ambiental, mantendo a umidade de um ambiente mais constante durante o ano todo;
- b) O conforto térmico é maior, pois conserva o calor no inverno e mantém o ambiente fresco no verão;
- c) Acusticamente eficiente;
- d) Pode ser feita a reciclagem do material demolido para nova construção;
- e) Permite um canteiro de obras limpo que não gera entulhos;
- f) Não é poluidor do meio ambiente;
- g) Não precisa ser calcinado, economizando energia e materiais como madeira e combustíveis fósseis;
- h) Evita o desmatamento, pois a madeira não vai ser empregada como fonte de energia;
- i) Pode ser retirado próprio terreno, sem custo nenhum, ou adquirido em local próximo a baixo custo.

2.3.1 Construção com Terra na História

As técnicas empregando a terra datam de mais de 9000 anos. Todas as culturas utilizaram a terra para construção de suas habitações, fortalezas e obras religiosas. Como exemplos, citam-se:

5000 a.C. – Cimentos feitos de terra encontrados na Assíria;

3000 a.C. – Templo mortuário de Ramisés II, no Egito;

4000 anos – A muralha da China (quase toda construída com terra apiloada e recoberta com pedras), Fig. 2.14.



Figura 2.14 – Muralha da China (Foto: WIKIPÉDIA, 2011)

2500 anos – Parte das construções da cidade de Arge Bem, no Irã;

Sec. VI a.C – Muro de terra da Fortaleza de Heunegerg, na Alemanha;

Séculos XIII a XVII (idade Média) – Construções com terra foram utilizadas na Europa Central;

Séculos XV ao XIX, na França – A técnica da taipa foi muito utilizada. Existem muitas edificações com mais de 300 anos em Lyon.

A edificação mais alta da Europa com terra maciça está em Weilburg, Alemanha, sua construção foi terminada em 1828 e ainda é habitada.

No México, América Central e América do Sul existiram construções de adobe em quase todas as culturas pré-colombianas. Igrejas e fazendas na América Latina e Brasil datam de 300 anos. Na Fig. 2.15, fazenda de café feita com taipa de pilão em São Paulo.



Figura 2.15 - Construção em terra com mais de 250 anos, São Paulo, Brasil
(Fonte: MINKE, 2008)

Na Fig. 2.16, pode-se ver uma fazenda de café construída em taipa de pilão, São Paulo.



Figura 2.16 – Fazendas de Café, em taipa de pilão, São Paulo, Sec. XIX.
(Fonte: Divulgação IG, CANAL LIVRE, 2011)

2.3.2 Técnicas de Construção com Terra Crua

Existem muitas técnicas de construção com terra crua no mundo inteiro. Dentre as mais utilizadas destacam-se: o adobe, a taipa e o bloco compactado.

Inovações técnicas nesta área consistem no aperfeiçoamento de soluções de estabilização do solo a fim de melhorar as propriedades mecânicas, de durabilidade, economia e estética. Pode-se usar o cimento, a cal, a emulsão asfáltica, a pozolana e as cinzas volantes ou outros materiais orgânicos e vegetais como estabilizantes do solo. Na Tabela 2.10, encontram-se o resumo das técnicas de construção com terra, mais empregadas.

Tabela 2.10 – Técnicas de construção, mais utilizadas, com terra crua.

Técnica	Características
Adobe	Facilidade produção; Uso de solo com plasticidade; Moldagem utilizando moldes de madeira, que são desmoldados ainda no estado fresco e colocados para secar em temperatura ambiente; Usam-se fibras vegetais para evitar a retração; A construção em adobe é simples, semelhante a colocação do tijolo convencional com argamassa à base de terra.
Taipa	Conhecida como taipa de mão, barro armado ou pau-a-pique; Uma estrutura interna de madeira, formada por ripas horizontais e verticais amarradas por arames ou similar é preenchida com uma mistura de água, terra e fibras; O solo é jogado com as mãos do lado de dentro e, de fora ao mesmo tempo, e apertada sobre a trama da parede.
Bloco de Terra Compactada	Consiste da prensagem de um solo confinado num molde, obtendo blocos com mais resistência e durabilidade; A prensagem é manual e produz diversos tipos de blocos, maciços, furados e de encaixe; O bloco de encaixe permite assentamento com menor uso de argamassa nas juntas horizontais e sem argamassa nas verticais. Estes quando furados podem incorporar o concreto, cabos e fios elétricos e tubulações d'água; A primeira prensa de blocos, a CINVA-RAM foi desenvolvida na Colômbia em meados dos anos 50.

2.3.3 Inovações Tecnológicas na Construção com Terra Crua

Com a adaptação de novas tecnologias às técnicas de construções com terra, apareceu o bloco de terra em prensa hidráulica, adobe e a taipa mecanizados.

O bloco de terra em prensa hidráulica é compactado em prensa hidráulica, aumentando substancialmente a sua resistência mecânica e resistência ao contato com a água, Fig. 2.17.

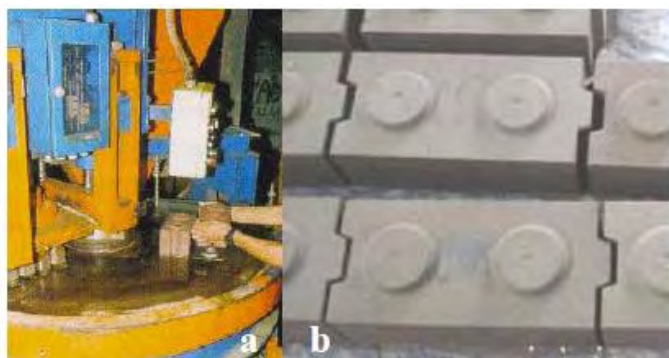


Figura 2.17 – Prensa hidráulica (a) e bloco compactado em prensa hidráulica (b) (JALALI, 2011).

Adobe mecanizado, com base no uso de máquinas semelhantes às agrícolas permite a fabricação mecanizada e mais rápida dos blocos. Encontram-se no sul de Portugal duas empresas que fabricam este tipo de bloco, ver Fig. 2.18.



Figura 2.18 – Produção de adobes mecanizados (DETHIER, 1982).

Na taipa mecanizada são utilizados moldes de madeira de um lado e do outro da parede a ser compactada. Os moldes de madeira têm maior dimensão e sua amarração é feita com perfis metálicos e para a compactação utiliza-se um compactador pneumático, conforme Fig. 2.19.



Figura 2.19 – Construção de parede e edifício em taipa mecanizada (JALALI, 2011).

Adobe com incorporação de revestimento em concreto é uma técnica oriunda do Marrocos. Esta técnica consiste na construção de paredes exteriores em adobe com elementos pré-fabricados de concreto a fim de proteger as paredes das intempéries. O elemento tem forma de L invertido, que dá a construção uma aparência industrial e ao mesmo tempo aumenta a sua durabilidade, ver Fig. 2.20.

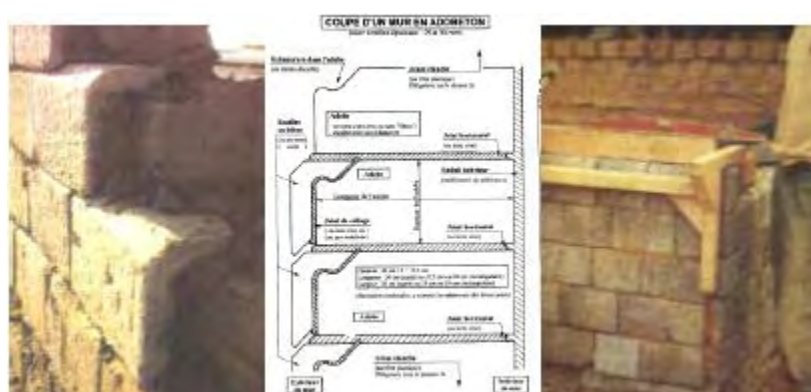


Figura 2.20 – Construção em adobe com incorporação de revestimento em concreto, com detalhamento do elemento de concreto (JALALI, 2011).

Em alguns países da Europa, como a Escócia e a Alemanha, blocos de terra crua não calcinados estão sendo produzidos por extrusão. Entre estes produtos encontram-se tijolos e placas de revestimento de interiores, sendo estes perfurados ou maciços, conforme se pode ver na Fig. 2.21.

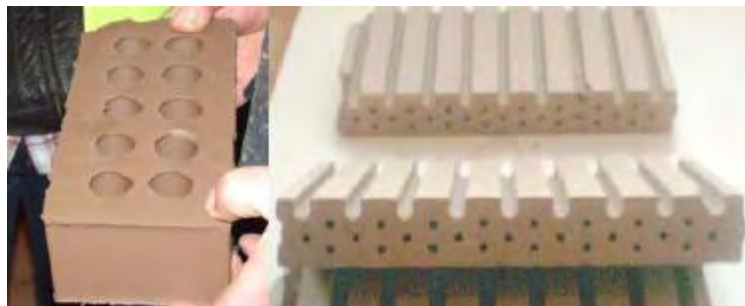


Figura 2.21 – Tijolos extrudados não calcinados no estado fresco (JALALI, 2011).

Blocos de terra crua eco-eficientes estão sendo desenvolvidos na Universidade do Minho. Estes blocos são feitos com misturas de solo, metacaulim e a cal hidratada. As misturas são ativadas com materiais alcalinos, tendo como objetivo a redução do tempo de cura do bloco, o aumento da resistência mecânica e prevenção de aparecimento de fungos e bactérias.

Tijolos L.T.G.S. – Low Temperature Geopolimeric Setting (Geopolímero de pega a baixa temperatura). O L.T.G.S. foi desenvolvido por Davidovits (2002) e envolve a ativação de argilas minerais do tipo caulinita, sem calcinação. Nesta reação não se verifica a adição de ligantes, mas de catalisadores como o hidróxido de sódio ou de potássio que vão permitir aos componentes minerais reagirem entre si, reticularem e ganharem pega. É o próprio material argiloso que irá produzir o ligante para a aglomeração, ver Fig. 2.22.



Figura 2.22 – Tijolo de L.T.G.S. produzido com argilas cauliníticas (DAVIDOVITS, 2002)

2.3.4 Fatores que Afetam a Qualidade dos Blocos Prensados

A terra é um material de composição variável, portanto é importante definir as características dos materiais constituintes e quantificar o efeito de parâmetros que influenciam no comportamento dos tijolos. Existem dois tipos de parâmetros: o intrínseco e o físico (BARBOSA, 1996).

Os parâmetros intrínsecos referem-se ao próprio material:

- a) Tipo e percentagem de argila;
- b) Quantidade de areia;
- c) Distribuição granulométrica.

O tipo de argila considerada nesta técnica construtiva são as caulinitas ou ilitas. As montmorilonitas são expansivas.

A quantidade de argila influencia na densidade seca. Esta decresce com o aumento do teor de argila de 22 a 17 kN/m², segundo Olivier (1994).

A distribuição granulométrica tem influência decisiva na qualidade dos blocos prensados. Em uma curva granulométrica bem distribuída consegue-se melhor arranjo dos grãos, menores vazios e conseqüentemente melhor compactação.

Os parâmetros físicos são aqueles que dependem do processo de fabricação:

- a) Porcentagem de água;
- b) Pressão de compactação;
- c) Natureza e percentagem de estabilizantes;
- d) Cura.

Pequenas variações na percentagem de água conduzem mudanças na densidade seca, conseqüentemente a resistência. O ideal é usar a umidade ótima obtida no ensaio de compactação estática.

A pressão de compactação aproxima os grãos, reduz os poros do material e aumenta a sua densidade, o que lhe dará maior resistência mecânica. As prensas manuais tem um limite em torno de 2 MPa.

Para cada tipo de solo é necessário um tipo de ligante específico para sua estabilização. Solos arenosos podem ser estabilizados com cimento. Solos argilosos utilizam-se cimento com teores menores que 6%, sendo recomendável o uso da cal como estabilizante. Um solo bem graduado, 4% de cimento já conduzem a ótimos resultados de resistência mecânica.

A cura do bloco é fundamental, após a fabricação, é necessário que a água de moldagem ainda presente, nele permaneça a fim de permitir as reações entre o solo e os ligantes.

CAPÍTULO III

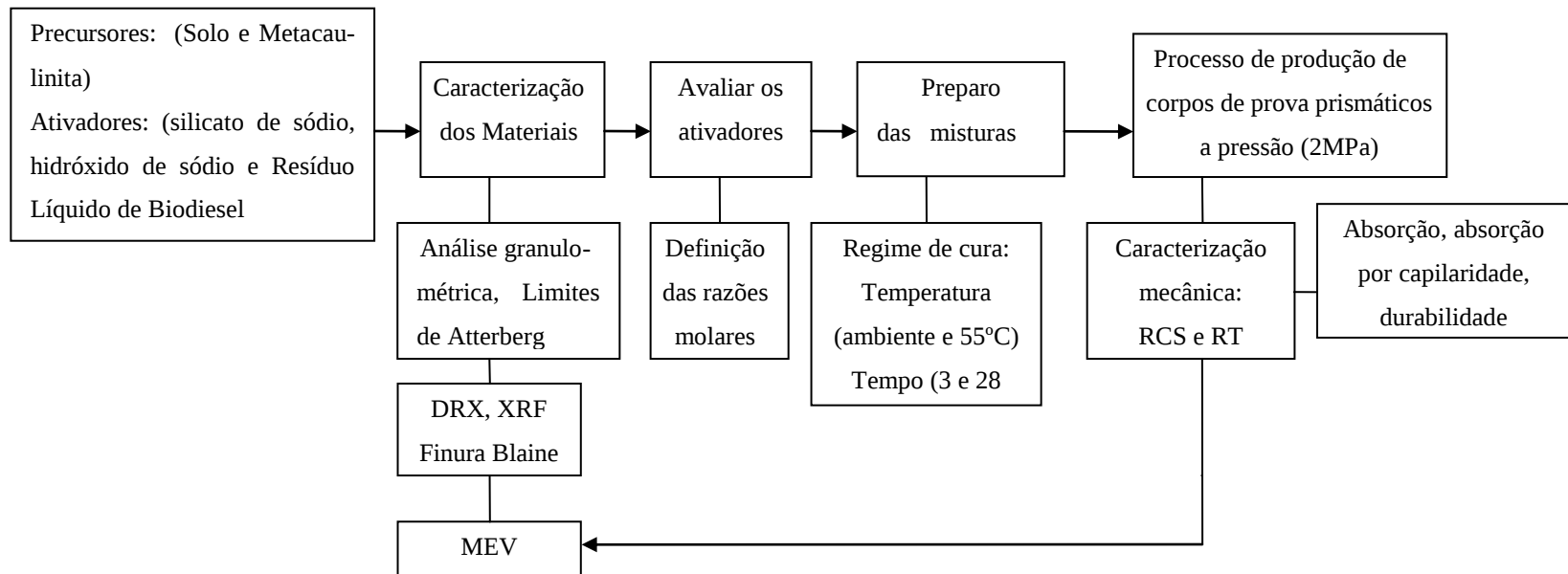
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.0 INTRODUÇÃO

No procedimento experimental foi realizada a caracterização dos materiais que compõem o geopolímero. Foram apresentadas as técnicas utilizadas para cada material mostrando as transformações, que ocorreram antes e depois da sinterização do compósitos geopoliméricos com o resíduo líquido do biodiesel.

Para atingir os objetivos da pesquisa usou-se o procedimento experimental observado na sequencia do Fluxograma.

FLUXOGRAMA



3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa estão descritos na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Materiais utilizados nas misturas geopoliméricas e suas respectivas procedências.

Material	Procedência
Solo	Proveniente do município de Santa Rita
Caulim	Fornecido pela Caulisa
Silicato de sódio: (Na_2OSiO_3)	Fornecido pela Pernambuco química S/A
Hidróxido de Sódio (NaOH)	Comercial
Resíduo Líquido de Biodiesel (água de lavagem)	LACOM, usina piloto de biodiesel do Laboratório de Energia Solar
Cimento Portland CP II - F	Comercial

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES

A caracterização dos precursores foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME), no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) e no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB.

Foram empregadas as seguintes técnicas de análises:

3.2.1 Florescência de Raios-X (FRX)

Foi utilizada para fazer a análise química de cada precursor geopolimérico, metacaulim e solo. Com os dados obtidos da análise química e as concentrações dos ativadores foram definidas as quantidades de materiais usadas em cada formulação.

O metacaulim foi obtido a partir da calcinação do caulim a temperatura de 750°C por um período de 2 horas. O caulim foi espalhado no forno à altura de 5 cm para garantir uma calcinação homogênea.

3.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

O DRX foi realizado no LRS para valores de 2θ entre 5 e 60° e passo 0,02°/seg. O aparelho produtor de raios x apresenta as seguintes características: anti-cátodo em cobre (Cu) e radiação característica $K\alpha$.

3.2.3 Massa Específica

A massa específica dos precursores geopoliméricos foi obtida pelo método de Le Chatelier, conforme a norma da ABNT/NBR-6474.

3.2.4 Área Específica – Método de Blaine

A área específica foi obtida pelo Método de Blaine, conforme a norma da ABNT/NBR-NM76.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SINTERIZADO

3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para o MEV utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura com analisador químico (EDS). As amostras foram embutidas em resina e posteriormente cortadas e polidas até a gramatura de ¼ de microns para posterior cobertura de ouro.

3.4 SOLO

O solo foi destorroado, peneirado em malha 4,8mm. O solo ficou acondicionado em depósitos fechados para conservá-lo na mesma umidade e livre de contaminação. Na Fig. 3.1 pode ser visto o aspecto do solo.



Figura 3.1 – Aspecto do solo

Para a caracterização do solo no estado natural foram executados os ensaios indicados na Tabela 3.2, de acordo com as respectivas normas. O solo usado neste trabalho é comumente encontrado em depósitos de materiais de construção na cidade de João Pessoa.

Tabela 3.2 - Ensaios de caracterização do solo

ENSAIO	NORMAS
Granulometria por peneiramento e sedimentação.	ABNT (NBR-7181)/1984
Limites de Atterberg:	
Limite de liquidez	ABNT (NBR-6459)/1984
Limite de plasticidade	ABNT (NBR-7180)/1984
Massa específica dos grãos	ABNT (NBR-6508)/1984
Compactação do solo	ABNT (NBR-6508)/1984

3.5 RESÍDUO LÍQUIDO DE BIODIESEL

3.5.1 Determinação do pH.

Como os álcalis favorecem a formação do gel geopolimérico, foi determinado o pH das diversas águas de lavagem, usadas na purificação do biodiesel.

O pH das amostras foi mensurado através do phmetro de bancada, marca mpA-210 da Tecnopon Equipamentos Especiais Ltda.

3.6 CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

3.6.1 Composição das Misturas

Foram usadas três composições básicas:

- 1) Solo + geopolímero (sologeo);
- 2) Solo + geopolímero + resíduo líquido do biodiesel (sologeobio);
- 3) Solo + cimento (solo-cimento).

Neste trabalho, entende-se por geopolímero a mistura entre a metacaulinita, a solução em água destilada de hidróxido de sódio e o silicato de sódio. O resíduo líquido do biodiesel (RB) é o mesmo que água de lavagem e os blocos referem-se aos corpos de prova prismáticos.

As misturas adotadas têm as composições apresentadas na Tabela 3.3.

Na Tabela 3.4 são indicadas as percentagens dos componentes do geopolímero e da água destilada, em relação ao peso do solo, para a mistura sologeo. A Tabela 3.5 mostra a relação líquido/materiais secos do sologeo.

Tabela 3.3 – Composição das misturas em relação ao peso do solo

Solo	Geopolímero (%)	Cimento (%)	Resíduos líquido de biodiesel (%)	Tipo de cura Período de cura
Arenoso	3	0	0	Ambiente e estufa 3 e 28 dias
	6			
	22			
	1	0	12,39	Ambiente e estufa 3 e 28 dias
	3		10,86	
	6		9,11	
	15		7,20	
	22		7,89	
	0	1	0	Ambiente e estufa 3 e 28 dias
		3		
		6		
		15		
		22		

Tabela 3.4 – Composição da mistura de solo+geopolímero

	Materiais secos %		Líquidos %			
Geopolímeros	Solo	Metacaulim	Na ₂ OSiO ₃	NaOH	Água destilada	Água
3%	100	1,12	1,10	0,12	0,66	10,86
6%	100	2,23	2,20	0,24	1,33	9,11
22%	100	8,18	8,08	0,87	4,87	7,89
Sologeo	Solo %	Geopolímero %				Água %

Tabela 3.5 - relação líquido/materiais secos.

Geopolímeros	Líquidos/ Materiais secos
3%	0,14
6%	0,14
22%	0,21
sologeo	

Na Tabela 3.6 são indicadas as percentagens dos componentes do geopolímero, da água destilada e da água de lavagem do biodiesel, em relação ao peso do solo, para mistura sologeobio. A Tabela 3.7 mostra a relação líquido/materiais secos do sologeobio.

Tabela 3.6 – Composição da mistura de solo+geopolímero+resíduo líquido de biodiesel

	Materiais secos %		Líquidos %			
Geopolímero	Solo	Metacaulim	Na₂OSiO₃	NaOH	Água destilada	Água de lavagem
1%	100	0,37	0,37	0,04	0,22	12,39
3%	100	1,12	1,10	0,12	0,66	10,86
6%	100	2,23	2,20	0,24	1,33	9,11
15%	100	5,00	5,00	0,02	5,00	7,20
22%	100	8,18	8,08	0,87	4,87	7,89
Sologeobio	Solo %	Geopolímero %				RB %

Tabela 3.7 - relação líquido/materiais secos.

Geopolímero	Líquidos/ Materiais secos
1%	0,14
3%	0,14
6%	0,14
15%	0,16
22%	0,21
sologeobio	

Na Tabela 3.8 são indicadas as percentagens de cimento e da água, em relação ao peso do solo para a mistura de solo-cimento. A Tabela 3.9 mostra a relação líquido/materiais secos do solo-cimento.

Tabela 3.8 - Composição da mistura de solo+cimento

	Materiais secos %		Líquidos %
Cimento	solo	Cimento	H₂O
1%	100	1,00	14,14
3%	100	3,00	14,42
6%	100	6,00	14,84
15%	100	15,00	16,10
22%	100	22,00	17,08
solo+cimento			

Tabela 3.9 - Relação líquidos/materiais secos do solo-cimento

Cimento	Líquidos/ Materiais secos
1%	0,14
3%	0,14
6%	0,14
15%	0,14
22%	0,14
solo-cimento	

3.6.2 Preparação das Misturas

As misturas foram feitas com o solo, metacaulim, hidróxido de sódio, silicato de sódio e resíduo líquido do biodiesel.

Inicialmente todos os materiais foram pesados.

Os materiais secos (solo e metacaulim) foram misturados até que ficassem homogêneos. A homogeneidade era facilmente percebida, quando a coloração da mistura ficava uniforme.

O hidróxido de sódio foi dissolvido na água destilada em um recipiente plástico e homogeneizado manualmente com auxílio de um bastão de vidro, formando uma solução aquosa. Como a mistura provocava uma reação exotérmica, ela ficava em repouso para que ocorresse o resfriamento. A esta mistura foi adicionado o silicato de sódio, que por ser bastante viscoso, necessitou de homogeneização manual com auxílio de um bastão de vidro.

A ordem de colocação dos materiais para se proceder a mistura foi a seguinte:

- 1º. Os materiais secos;
- 2º. Metade da água de lavagem do biodiesel. No caso do geopolímero puro ou do cimento usou-se apenas água potável;
- 3º. Toda a solução feita com o hidróxido de sódio, a água destilada e o silicato de sódio;
- 4º. Restante da água de lavagem do biodiesel ou da água potável;

Depois que a mistura foi preparada, procedeu-se à pesagem de cerca de 550g dessa mistura, que foi colocada em cada compartimento do molde prismático.

3.6.3 Moldagem de Corpos de Prova Prismáticos

Para a produção dos corpos de prova prismáticos (largura de 4 cm, altura de 4 cm e comprimento de 16 cm), foi fabricado um molde desmontável, para facilitar o seu manuseio, conforme os detalhes mostrados nas Fig. 3.2, Fig. 3.3(a) e Fig. 3.3(b). O molde consegue produzir três corpos de prova por vez.

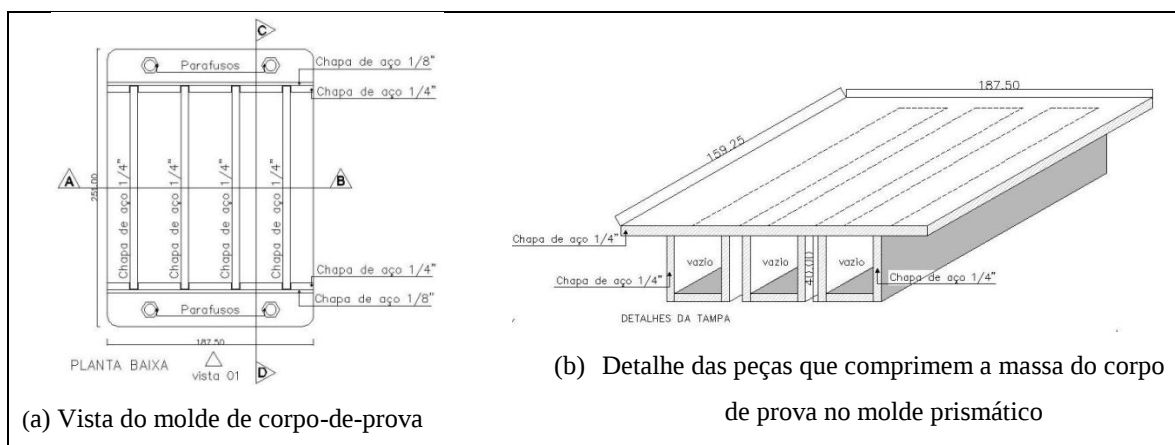


Figura 3.2 – Detalhes do molde de corpo de prova prismático.

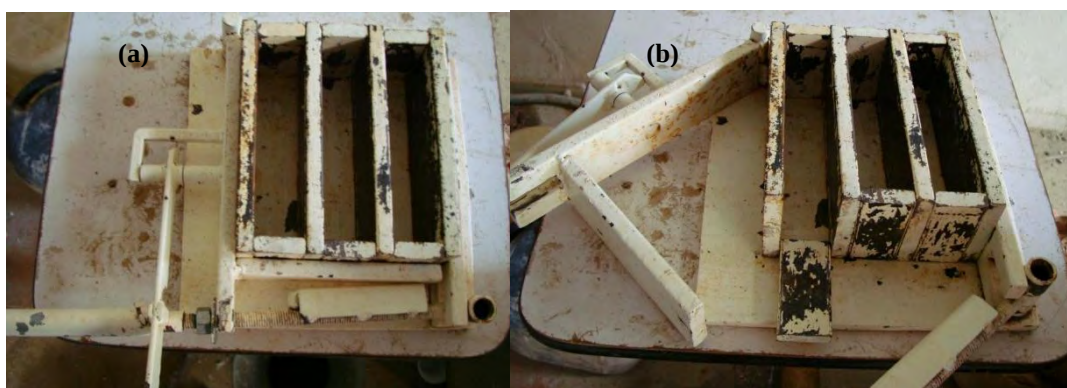


Figura 3.3 - molde prismático desmontável (a) e (b).

A máquina usada para a prensagem do corpo de prova prismático foi da marca Solotest que atinge a carga máxima de 15 tf.

Após a colocação do material no molde, foi aplicada uma carga de compressão de 3840 kgf de forma simultânea tanto na base, quanto no topo do molde, para garantir uma pressão da ordem de 2 MPa. Esta carga reduziu pela metade o volume inicialmente colocado nos compartimentos do molde prismático.

Para garantir que a carga fosse aplicada uniformemente e a energia de compactação ficasse a mesma para todos os corpos de prova, colocou-se em cada compartimento, sobre a massa da mistura, um bloco de aço confeccionado com duas cantoneiras em forma de “L”. Sobre os três blocos de aço, colocou-se uma placa, que distribuiu a carga para os três compartimentos, conforme Fig. 3.4 (a). O molde após prensagem conforme Fig. 3.4 (b).

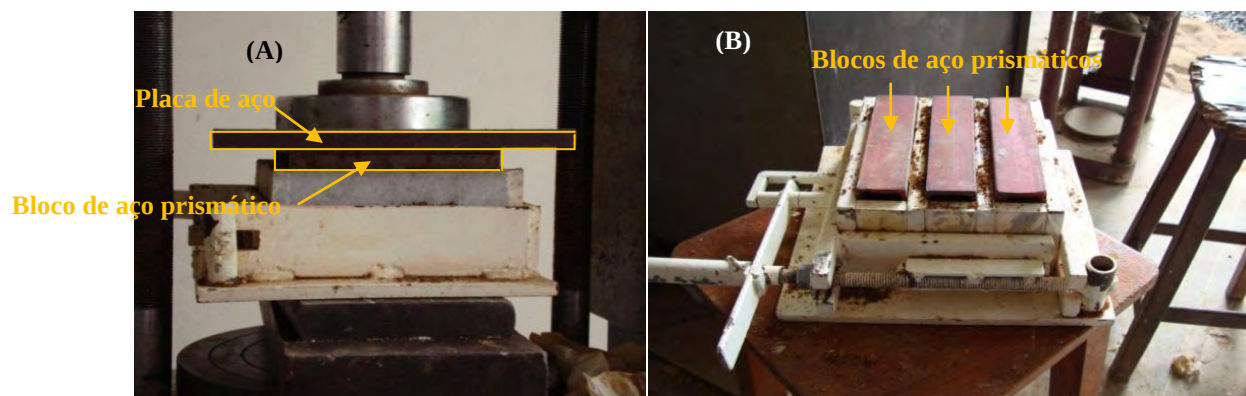


Figura 3.4 - Prensagem dos blocos a taxa de compressão de 2 MPa (A) e molde após prensagem(B).

As placas do molde foram cobertas com fita crepe, para facilitar a retirada dos corpos-de-prova. Após a desmoldagem, os espécimes, apresentaram arestas vivas e vértices bem definidos, conforme Figura 3.5.



Figura 3.5 – Retirada das amostras dos moldes prismáticos

3.6.4 Regime de cura

Alguns regimes de cura são utilizados com objetivos específicos de acordo com as aplicações desejadas para os geopolímeros (DAVIDOVITS 2008, FERNANDEZ-JIMENEZ *et* PALOMO, 2005).

Segundo Bouterin e Davidovits (2003) a reprodução de materiais mineralógicos em laboratório com estruturas equivalentes aos feldspatos, as zeólitas e aos anfibólios ocorrem a baixas temperaturas em simples condições climáticas normais ou a temperaturas moderadas compreendidas entre 45° e 100°C.

Nesta pesquisa os regimes de cura adotados foram em temperatura ambiente e na temperatura de 55°C, pois são nestas temperaturas que ocorrem as condições mais econômicas de energia para a síntese dos geopolímeros. Gomes (2008) obteve resultados mais satisfatórios quando utilizou a temperatura de 55°C do que quando usou a temperatura de 100°C. Na temperatura de 100°C ocorreu à formação de uma estrutura mais porosa, devido à rápida perda de água em comparação com as submetidas a temperaturas inferiores em torno de 55°C. Na temperatura de 100°C, o geopolímero apresentou um comportamento mais frágil, devido a sua estrutura mais cristalina, quando comparadas com as estruturas amorfas dos materiais sintetizados a temperaturas de 55° C. Neste trabalho os corpos de prova foram postos em sacos plásticos para impedir a eliminação rápida da água.

Na temperatura ambiente de 25°C observou-se uma variação de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, mesmo os corpos de prova ficando acondicionados em sacos plásticos e conservados em caixa de isopor.

No final do período de cura, os corpos de prova foram conduzidos à estufa, onde permaneceram por 24 horas, à temperatura de 55°C.

Os períodos de cura adotados foram de 3 e de 28 dias.

3.6.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração na Flexão

As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à flexão, que dividiu o corpo de prova em duas metades, sendo uma usada para o ensaio de resistência a compressão simples, e a outra para o ensaio de absorção. O ensaio de resistência à flexão seguiu a norma da ABNT (NBR – 13279). Foram feitos seis determinações para cada mistura.

Para a determinação da resistência à tração na flexão foi usada a Eq.(3.1):

$$R_t = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (3.1)$$

Onde:

R_t é a resistência à tração na flexão, em MPa.

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do corpo-de-prova prismático, em N.

L é a distância entre os suportes, em mm.

A resistência à compressão foi calculada segundo a Eq.(3.2):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.2)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, em MPa.

F_c é a carga máxima aplicada, em N.

3.6.6 Absorção por Imersão em Água

Para se estudar o efeito da água sobre os corpos de prova, foi executado o ensaio de absorção por imersão em água, de acordo com a ABNT (NBR-8492/1984).

Neste ensaio, os corpos-de-prova foram colocados em estufa a uma temperatura de 110°C até constância de massa, obtendo-se a massa seca M_1 , em g. Em seguida as amostras foram imersas em um recipiente com água, à temperatura ambiente, durante 24 horas. Após este período, os blocos foram retirados da água, a sua superfície foi enxuta com um pano úmido, a massa da amostra foi pesada, antes de decorridos 3 minutos, determinando-se assim, a massa saturada M_2 , em g.

O valor da absorção será expresso em porcentagem e foi calculado pela Eq.(3.3):

$$A\% = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (3.3)$$

Nas Fig. 3.6 (a) e (b) são vistas as amostras do ensaio de absorção por imersão em água.

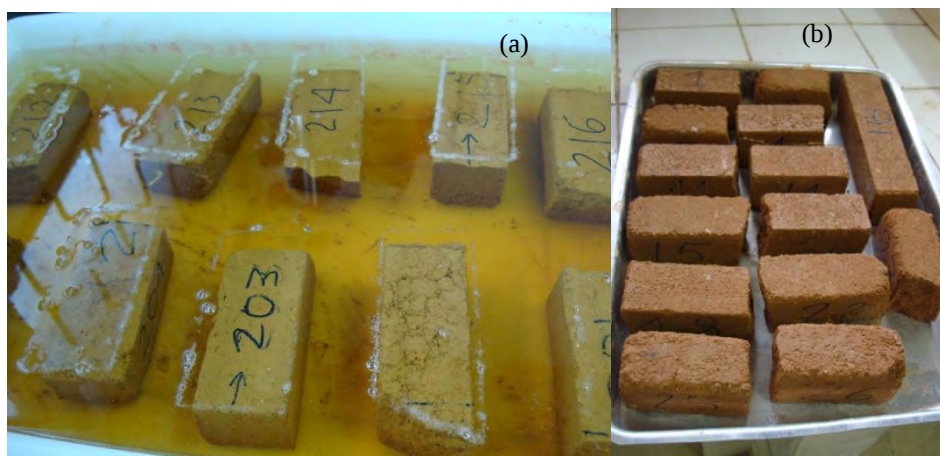


Figura 3.6 – Espécimes imersos em água (a) Aspecto dos corpos de prova após ensaio de absorção (b)

3.6.7 Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi feito utilizando-se como base a norma da ABNT (NBR-9779).

Os corpos de prova foram secos em estufa durante 7 dias a temperatura de 55°C, para garantir que a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%. Ao fim desse período foi determinada a massa inicial m_0 de cada amostra.

Em seguida, as amostras foram cobertas com borracha de silicone na superfície inferior lateral, para garantir que a absorção de água se verificasse unicamente pela face inferior do corpo de prova.

Os corpos de prova foram colocados em recipientes, mantendo a face inferior em contato com a água numa altura de 5 ± 1 mm. As amostras ficaram firmemente posicionadas sobre círculos de plásticos de altura de 5 ± 1 mm, estas foram extraídas das garrafas pet, conforme se pode ver na Fig. 3.7.

Após os intervalos de tempos (t_i) especificados na norma (3, 6, 24, 48, 72, 96 e 120 horas), fizeram-se pesagens de controle, em balança com aproximação de 0,1 g. Durante a duração do ensaio (120 horas), dentro do mesmo reservatório foi colocado um dispositivo

para garantir a manutenção de um nível de água constante, para tal foi utilizada uma garrafa pet cheia de água, tampada superiormente e com abertura na parte inferior (a uma altura de 10 mm da base).



Figura 3.7 – Ensaio de capilaridade.

Para efetuar as medições, os corpos de prova foram retirados dos reservatórios, permitindo que a água escorresse numa superfície não absorvente, durante 60 segundos. Em seguida foram pesados, obtendo-se a massa m_i .

Na absorção por capilaridade determina-se a quantidade de água que entrou na amostra por unidade de área, sendo este valor medido em g/cm^2 . O Cálculo é dado pela Eq.(3.4).

$$A = \frac{m_i - m_o}{\text{Área}_{\text{face inferior}}} \quad (3.4)$$

Onde:

m_i = massa da amostra nos tempos t_i .

m_o = massa inicial da amostra em tempo $t_i = 0$.

$\text{Área}_{\text{face inferior}}$ = área da face inferior da amostra que esteve em contato com a água.

3.6.8 Durabilidade

Este ensaio tem a finalidade verificar o desgaste na superfície da amostra através de ciclos de molhagem e de secagem.

Utilizou-se o método de ensaio proposto pela ABCP para o solo-cimento, Método SC-3 como base para o teste de durabilidade. Este verifica a perda de massa devido a ciclos de molhagem e secagem. Em geral são utilizados dois métodos:

Método A – são realizados 12 ciclos de 48 horas, sendo cada um deles com 5 horas de imersão em água, 43 horas de secagem em estufa e escovação no 12º ciclo.

Método B – com 12 ciclos de 48 horas e com escovação após cada ciclo.

Nesta pesquisa foi utilizado apenas o método B, por ser o mais agressivo.

Após 43 horas de secagem em estufa, seguia-se o período de resfriamento correspondente a uma hora antes da pesagem. Observou-se que neste período começava haver ganho de peso, em consequência da absorção da umidade do ar pelos corpos de prova, então eliminou-se este intervalo de tempo e a pesagem foi feita logo após a retirada do bloco da estufa, no início de cada ciclo.

A temperatura da estufa considerada foi a de 55°C durante os doze ciclos.

No final do 12º ciclo as amostras foram colocada sem estufa a 110°C, durante 24 horas e depois pesadas, esta pesagem foi utilizada para se verificar a perda final do peso do bloco.

As escovações foram feitas com escova de cerdas metálicas, aplicando-se movimento de vai-vem, de modo que, toda a área do espécime fosse coberta. A escovação pode ser vista na Fig. 3.8.



Figura 3.8- Escovação do corpo de prova

Para o ensaio de durabilidade foram utilizados seis corpos de prova para cada mistura. A cura foi feita apenas no período de 3 dias, por ser o menor período entre 3 e 28 dias, considerando a condição mais desfavorável. Este teste foi feito apenas nas misturas com teores 3%, 6% e 22% de ativadores: geopolímero, geopolímero com resíduo líquido de biodiesel e cimento.

Após a cura os corpos de prova foram identificados com giz de cera ou marcador para retroprojektor, como medida de segurança, já que os blocos passavam por períodos de molhagem e secagem necessitando de identificações resistentes para evitar uma possível mistura entre eles. Na Fig. 3.9 e na Fig. 3.10 são mostrados os corpos de prova submersos em água e secando em estufa a 55° C, respectivamente. Para as pesagens utilizou-se uma balança digital com carga máxima de 5000g.



Figura 3.9 - Ciclo de molhagem dos corpos de prova no ensaio de durabilidade



Figura 3.10 - Secagem em estufa a 55°C dos corpos de prova submetidos à secagem.

Perda de massa parcial (PMP) em cada ciclo, expresso em percentagem, foi calculada pela Eq. (3.5):

$$\text{PMP \%} = \frac{\text{MSI} - \text{MSAE}}{\text{MSI}} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

MSI = Massa seca inicial, em g.

MSAE = Massa seca antes da escovação, em g.

Perda de massa final (PMF) em cada ciclo, expresso em percentagem, foi calculada pela Eq.(3.6):

$$\text{PMF \%} = \frac{\text{MSI} - \text{MSAC}}{\text{MSI}} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

MSI = Massa seca inicial, em g.

MSAC = Massa seca após o 12º ciclo de escovação, em g.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.0 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados ao longo da pesquisa, que foram descritos no capítulo III.

Primeiramente são mostrados os resultados da caracterização de cada material que compõem o solo, o geopolímero e o resíduo do biodiesel, posteriormente os resultados dos ensaios dos materiais já sinterizados.

São apresentados os resultados da caracterização química dos materiais precursores, solo, caulim, metacaulim que participaram da sinterização do geopolímero. Também são apresentados os resultados obtidos do pH do resíduo líquido do biodiesel, com intuito de averiguar a sua potencialidade como coadjuvante na reação de geopolimerização.

Os resultados das propriedades mecânicas em corpos de prova prismáticos dos sistemas geopoliméricos, dos geopoliméricos com resíduo líquido de biodiesel e do cimento foram apresentados. Foram avaliados os efeitos dos ativadores alcalinos na síntese de geopolimerização dos corpos de prova através dos ensaios de resistência à compressão simples e a resistência à tração.

Os resultados de ensaios de absorção em imersão em água, por capilaridade e testes durabilidade foram apresentados e analisados.

Também foi avaliado o efeito do geopolímero, do resíduo líquido do biodiesel+geopolímero e do cimento na microestrutura das amostras através a microscopia eletrônica de varredura.

4.1 SOLO

4.1.1– Caracterização do Solo: curva granulométrica, limites de Atterberg e composição química.

A Fig. 4.1 mostra o gráfico resultante do ensaio de composição granulométrica do solo.

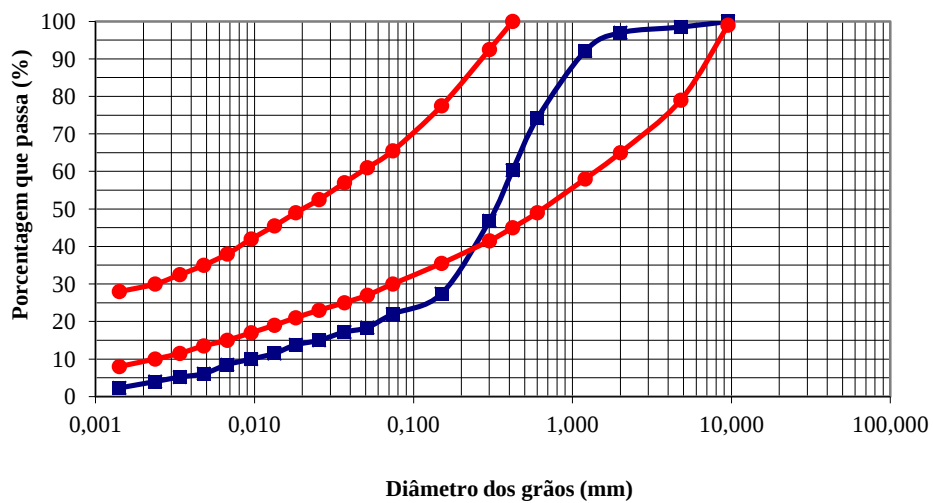


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo.

Na curva granulométrica observa-se que o solo não está completamente dentro da faixa granulométrica recomendada, pelo CRATerra – EAG (Le Centre International de La Construction en Terre – Ecole d'Architecture de Grenoble), para fabricação de blocos prensados (RIGASSI, 1995).

Tabela 4.1 - Caracterização do solo

Granulometria do solo natural (%)	
Pedregulho acima de 4,8mm	1,49
Areia (50 µm a 4,8mm)	80,11
Silte (5 a 50 µm)	12,3
Argila (<5 µm)	6,1
Silte + Argila	18,4
Limites de Atterberg (%)	
Limite de Liquidez	44
Limite de Plasticidade	29,5
Índice de Plasticidade	14,5
Composição química (%)	
SiO ₂	61,204
Al ₂ O ₃	27,401
Fe ₂ O ₃	7,427
TiO ₂	3,115
CaO	0,218
SO ₃	0,177
ZrO ₂	0,144
K ₂ O	0,092
MgO	0,075
Outros compostos	0,147

Observa-se na Tabela 4.1, que apesar da quantidade de areia ser de 80,11% e a quantidade de silte+argila de apenas 18,4%, o solo possui plasticidade necessária para moldagem de corpos de prova. O CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (1999) recomenda para o caso de solo-cimento um limite de liquidez $\leq 45\%$ e índice de plasticidade de 18%, foi obtido para este solo o valor de 44% para o limite de liquidez e um índice plasticidade igual a 14,5% bem próximo do ideal.

Como pode ser visto na composição química mostrada na Tab. 4.1, o solo é uma fonte de silício e alumínio, sendo importante para a geopolimerização.

4.1.2 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca Máxima

A Fig. 4.2 mostra a curva de compactação obtida.

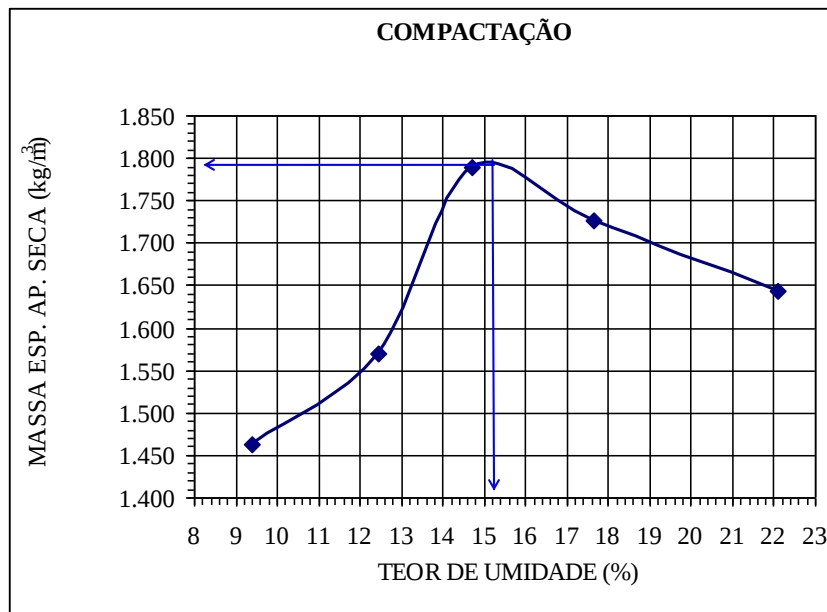


Figura 4.2 – Curva de compactação do solo.

Na Fig. 4.2 observa-se que o valor de umidade ótima foi da ordem de 15,2%, e o valor da massa específica aparente seca máxima obtida foi de 1.790 kg/m³. Para a confecção dos corpos de prova foi, então, utilizada a umidade de 14 ± 1%, próxima à umidade ótima. Considerou-se esta variação devido ao tempo em que decorria da mistura pronta até a colocação da massa nos compartimentos do molde, levando-se em consideração a evaporação da água moldagem e a mudança de temperatura no decorrer do dia.

4.2 CAULIM

4.2.1 Massa Específica e Área Específica pelo Método de Blaine

A massa específica para o caulim foi de $2,58 \text{ g/cm}^3$. A área específica foi de $21.297 \text{ cm}^2/\text{g}$

4.2.2 Análise por Difração de Raio X (DRX)

Na Fig. 4.3 são mostrados os picos característicos da caulinita obtidos no DRX.

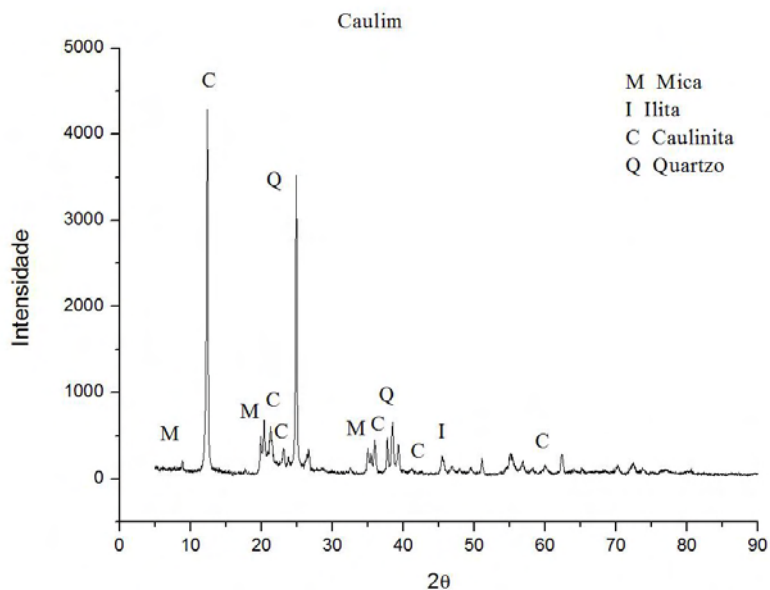


Figura 4.3 - Difração de raio X do caulim da marca Caulisa

A análise de Difração de Raios X (DRX), evidenciam os picos característicos da caulinita ($\text{ângulos } 2\theta = 23,3-23,9-35,5-35,8$). São visíveis alguns picos característicos de mica, de quartzo e illita.

4.2.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A Tab. 4.2 mostra a composição química do caulim.

Na Tab. 4.2 pode-se observar os resultados da composição química do caulim da marca Caulisa, obtidos através da análise por fluorescência de raio X, no Laboratório de Solidificação Rápida (LRS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Tabela 4.2 – Composição química do caulim.

Composição Química	%
SiO ₂	68,054
Al ₂ O ₃	30,383
K ₂ O	0,580
Fe ₂ O ₃	0,470
MgO	0,102
P ₂ O ₅	0,087
CaO	0,063
Na ₂ O	0,059
Outros Compostos	0,203

4.3 METACAULIM

4.3.1 Massa Específica e Área Específica pelo Método de Blaine

A massa específica do metacaulim foi de 2,398 g/cm³. A área específica encontrada foi de 19.391 cm²/g

4.3.2 Análise por Difração de Raio X (DRX)

Na Fig. 4.4 são mostrados os picos característicos da metacaulinita obtidos no DRX.

Na análise de Difração de Raios X (DRX) são visíveis alguns picos característicos de quartzo e de ilita.

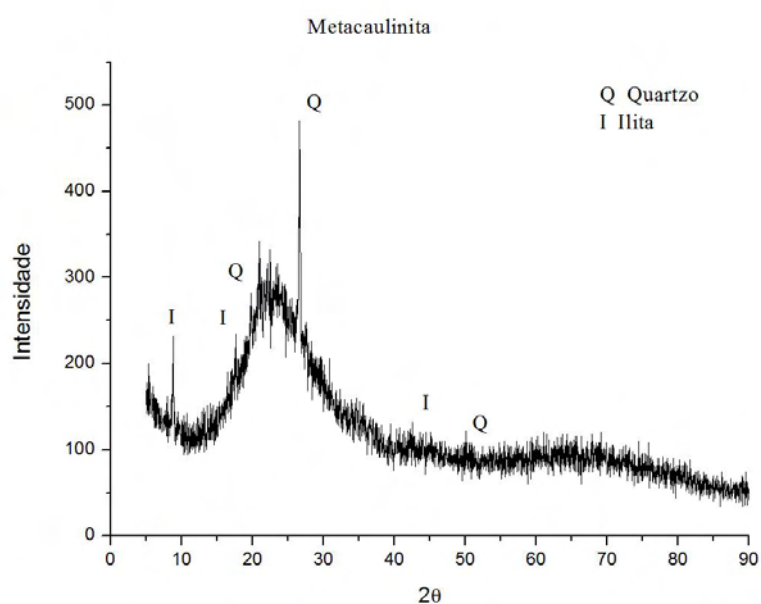


Figura 4.4 - Difração de raio X do metacaulim

4.3.3 Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A Tab. 4.3 apresenta composição química do metacaulim.

Tabela 4.3 – Composição química do metacaulim

Composição Química	%
SiO ₂	67,337
Al ₂ O ₃	31,236
K ₂ O	0,559
Fe ₂ O ₃	0,451
MgO	0,085
P ₂ O ₅	0,084
Na ₂ O	0,059
CaO	0,047
Outros compostos	0,142

Na Tabela 4.3, observa-se os resultados da composição química do metacaulim proveniente da calcinação do caulim, obtidos através de análise por fluorescência de raio X, no LRS, da UFPB.

4.4 RESÍDUO LÍQUIDO DE BIODIESEL (ÁGUA DE LAVAGEM)

Foi feita a determinação de pH de diversos resíduos de biodiesel cujos resultados são apresentados na Fig. 4.5

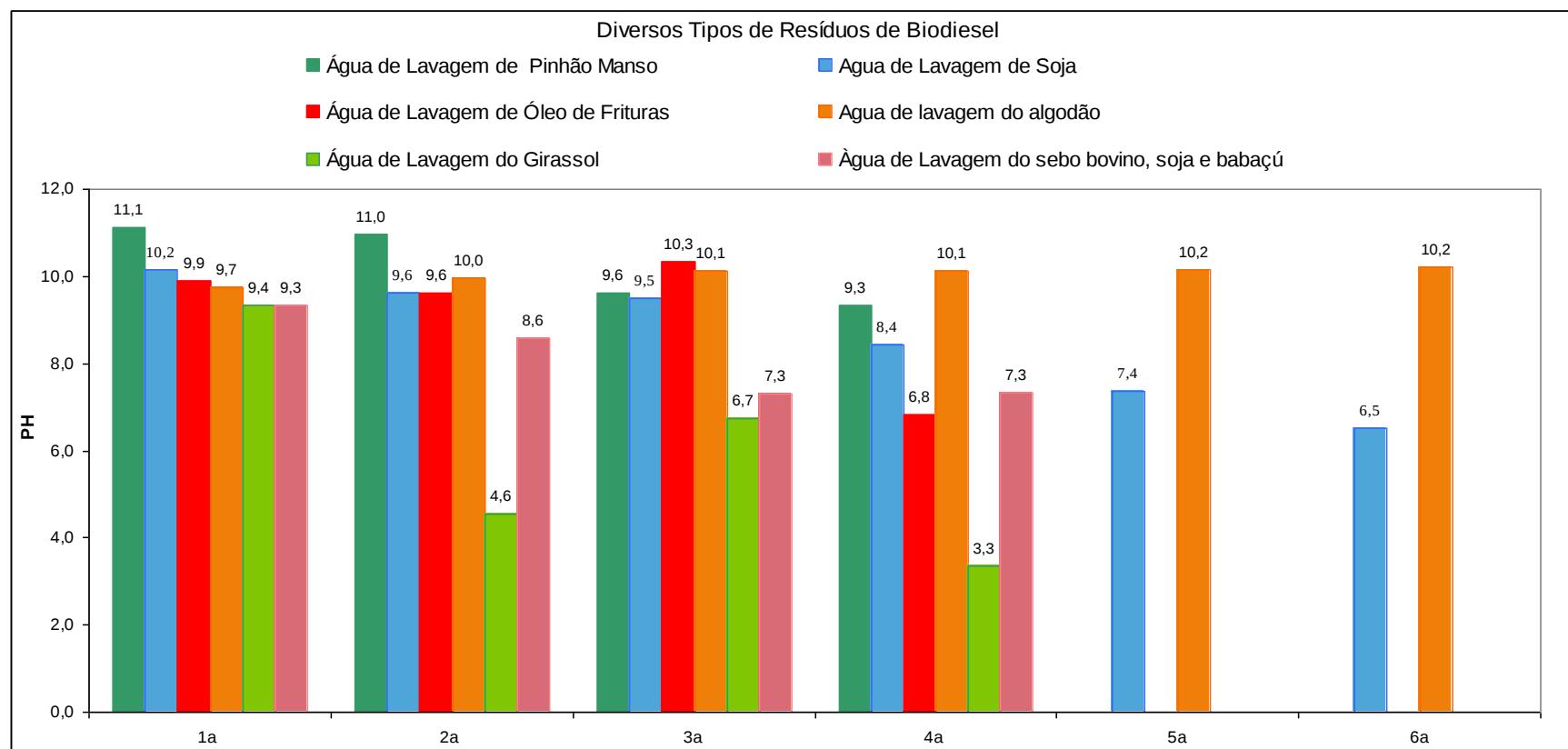


Figura 4.5 – pH de diversos tipos de resíduos líquidos de biodiesel (Água de lavagem)

Percebe-se na Fig. 4.5 que os maiores valores de pH foram obtidos nas primeira e segunda lavagens.

Para o resíduo de pinhão manso o valor de pH foi de 11 nas primeira e segunda lavagens. Nas terceira e quarta lavagens seu pH ainda é alcalino e ficou em torno de 9,6 como se pode ver na Fig. 4.6. O valor do pH do resíduo de algodão permaneceu praticamente o mesmo até a nona lavagem, com um pH igual a 10, um pouco menor do que o pH do resíduo de pinhão manso nas duas primeiras lavagens, Fig. 4.7.

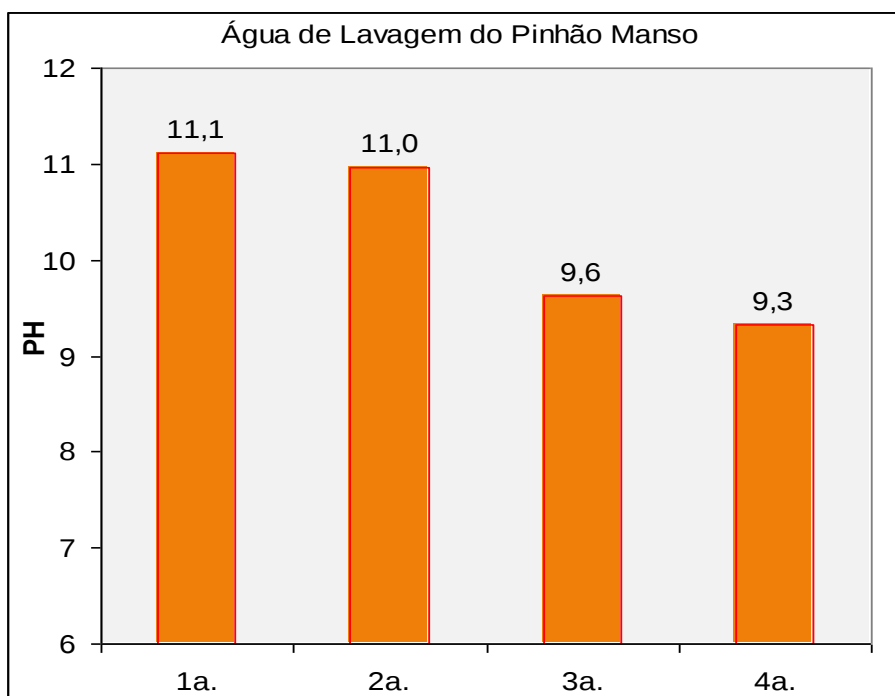


Figura 4.6 – Valores de pH da água residual do Pinhão Manso da 1ª a 4ª lavagem.

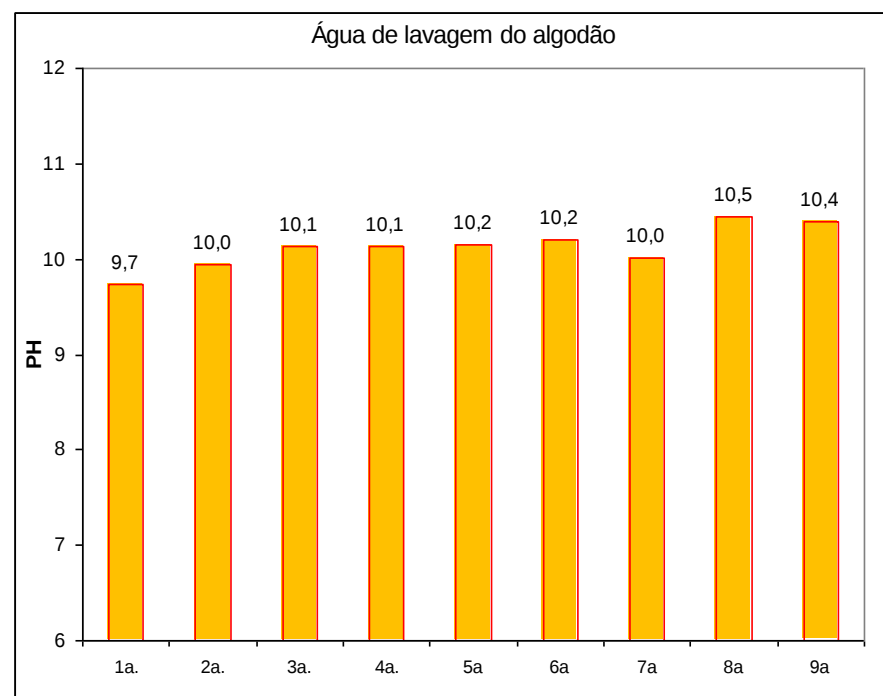


Figura 4.7 – Valores de pH da água residual do algodão da 1ª a 9ª lavagem

O óleo de girassol apresentou pH de 9,4 na primeira lavagem e caiu para 4,6 logo na segunda lavagem, Fig. 4.8.

O resíduo líquido de biodiesel formado pela mistura de óleo bovino, de soja e de babaçu, Fig. 4.9, apresentou pH alcalino nas primeira e segunda lavagens, com valores de 9,3 e 8,6 respectivamente, tornando-se praticamente neutra nas terceira e quarta lavagens com valor de pH de 7,3.

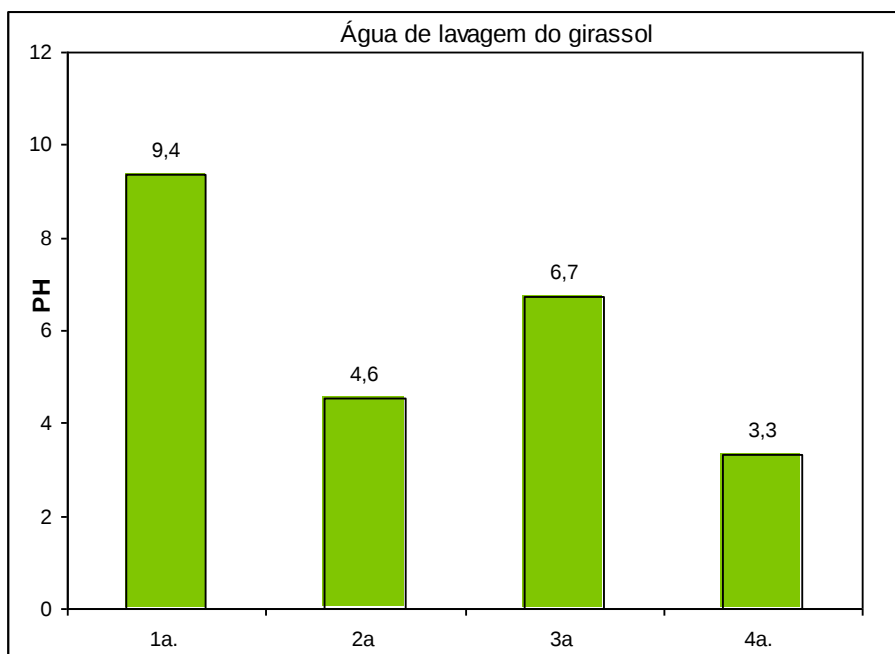


Figura 4.8 – Valores de pH da água de lavagem de girassol.

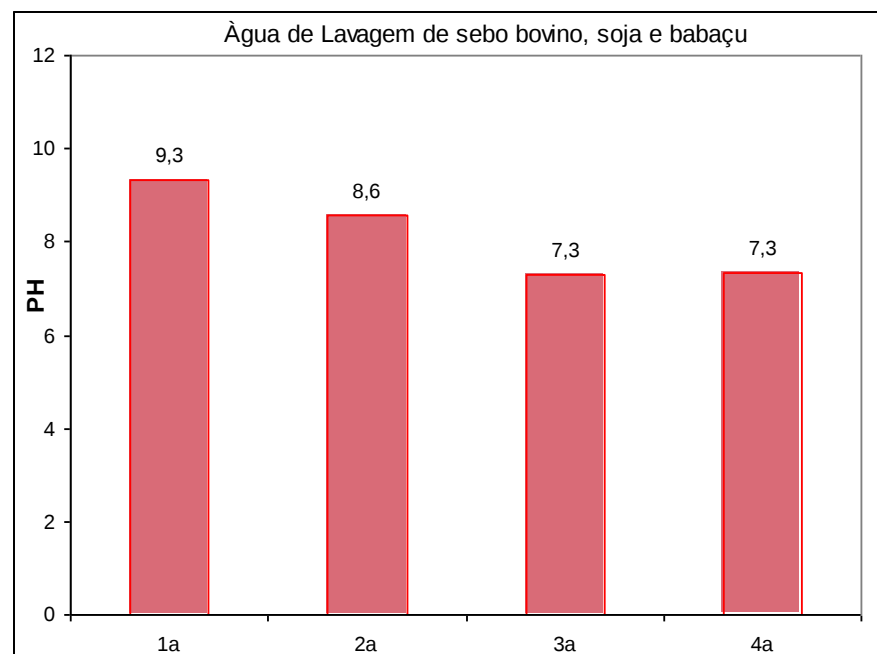


Figura 4.9 – Valores de pH da água de lavagem de sebo bovino, soja e babaçu.

A água de lavagem de soja não variou muito até a terceira lavagem, ficando com pH em torno de 9,6. A partir daí o pH foi se reduzindo com as subsequentes lavagens, caindo para 8,4 na quarta lavagem, 7,4 na quinta, passando a um pH ácido de 6,5 na sexta, Fig. 4.10.

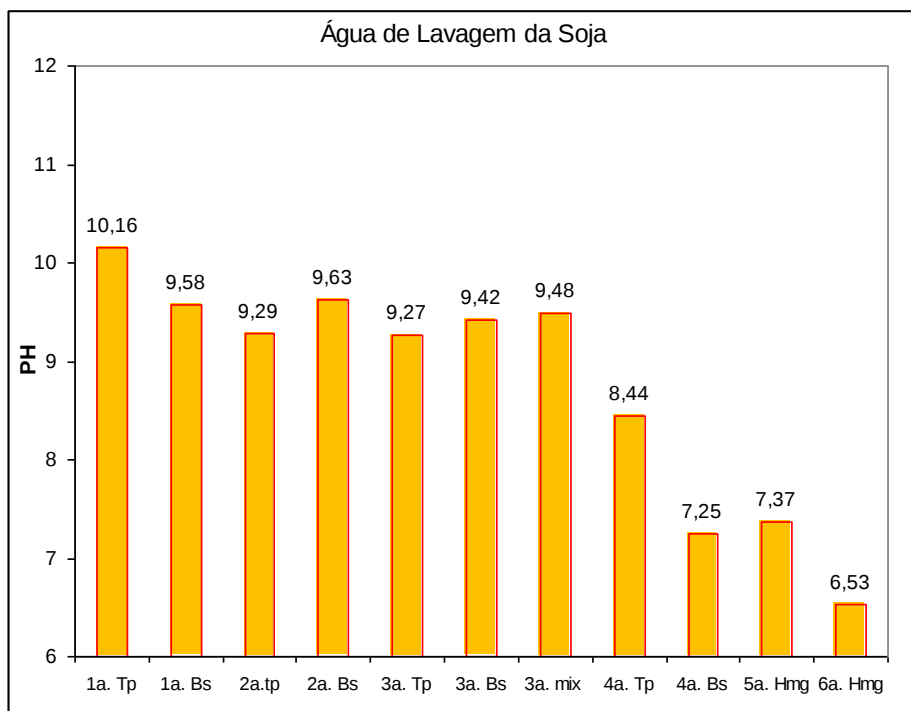


Figura 4.10 - valores de pH da água residual da soja da 1ª a 6ª lavagem, comparando em cada lavagem as fases: topo(Tp), base(Bs), mistura(mix) e Hmg (homogêneo).

O pH da água residual do óleo de fritura permaneceu até a terceira lavagem com o valor de 10, caindo abruptamente para 6,8 na quarta lavagem, Figura 4.11. Esses resultados são coerentes com os obtidos por Grangeiro (2009).

Algumas águas de lavagem mostraram-se heterogêneas, apresentando fases bem distintas. Estas fases aparecem comumente nas primeira e segunda águas de lavagem, onde os resíduos de glicerina e do biodiesel ainda estão presentes. A fase mais leve foi designada de topo (Tp) e a mais densa de base (Bs). Na medida em que as lavagens subsequentes vão sendo feitas, a água vai se tornando mais límpida, de aspecto homogêneo e o pH tende a baixar, como se pode observar na Figura 4.12.

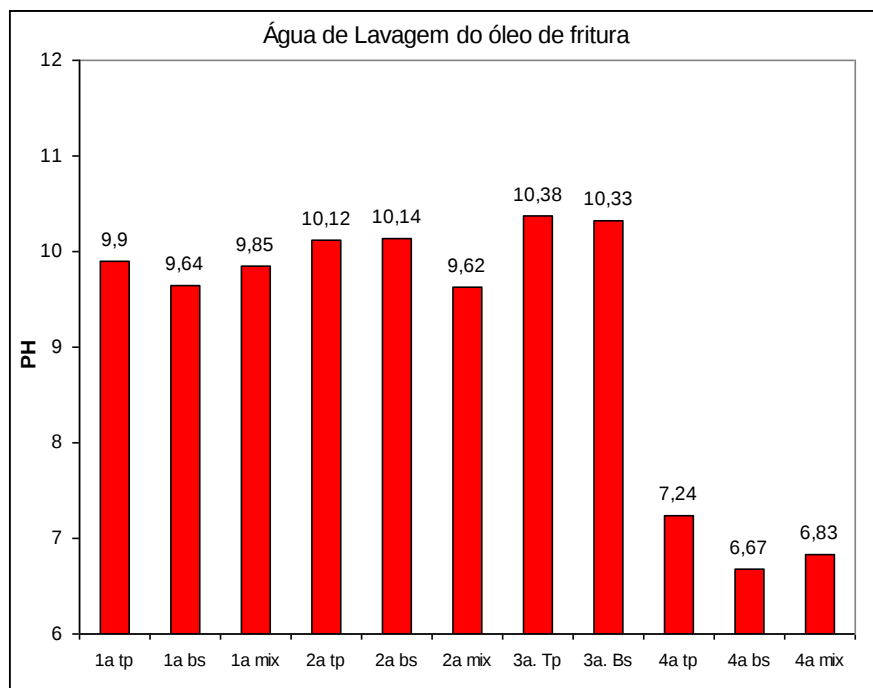


Figura 4.11 - Valores de pH da água residual do óleo de fritura da 1ª. a 4ª. lavagem, comparando em cada lavagem as fases: topo, base e mistura(b).

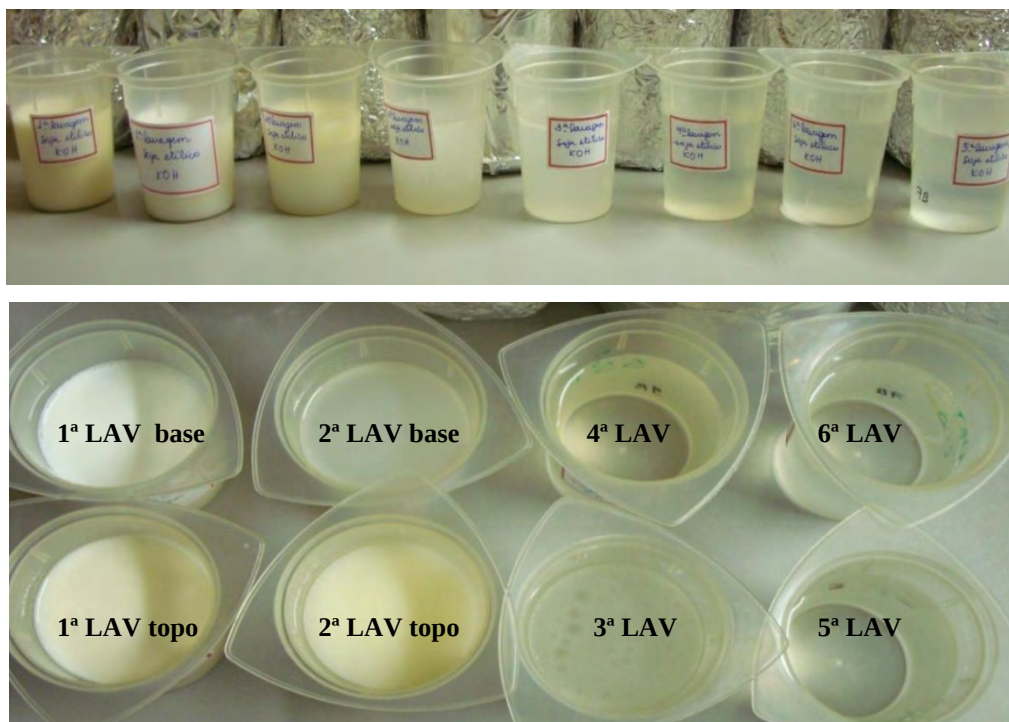


Figura 4.12 - Água de lavagem do óleo de soja na rota etílica com catalisador KOH. Da esquerda para direita e de baixo para cima na ordem crescente da sequencia da lavagem.

Pode-se observar na Figura 4.13 que as fases isoladas apresentam valores de pH praticamente os mesmos, mas quando as fases são misturadas ocorre uma leve queda no pH, esse comportamento também foi observado por Grangeiro (2009).

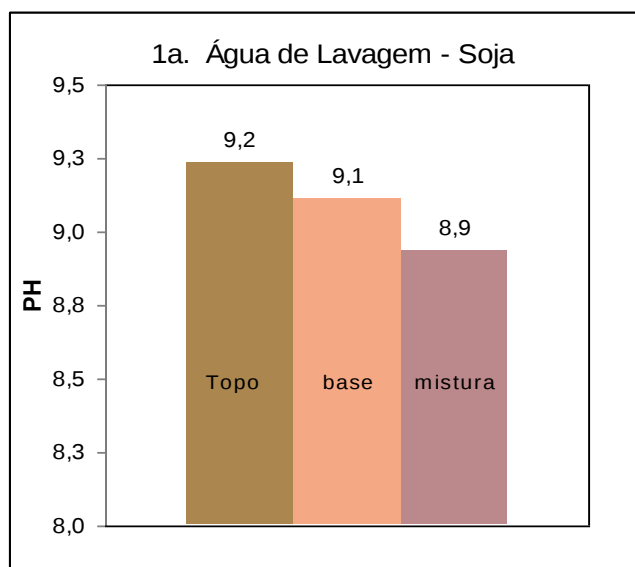


Figura 4.13 – Comparação dos valores do PH nas fases de topo, base e mistura da 1ª. água de lavagem de soja.

Para que ocorra o processo de geopolimerização é necessário que o pH seja fortemente alcalino. Em geral na síntese dos geopolímeros usa-se ativadores com pH maior que 12 (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et* PALOMO, 2005).

Os resíduos de biodiesel embora possuam alcalinidade, principalmente nas primeira e segunda lavagens, apresentam valores de pH inferiores a 12, fazendo-se necessário a complementação com ativadores alcalinos, como hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e silicato de sódio para a formação do geopolímero.

4.4.1 Resíduo Líquido de Biodiesel- Determinação do pH.

O pH obtido foi de 8,7 para o Resíduo Líquido de Biodiesel (óleo de soja+algodão).

4.4.2 Oxidação de Resíduos Líquidos de Biodiesel.

Nesta pesquisa, a degradação do resíduo líquido do biodiesel foi investigada através da determinação do pH. A água residual de biodiesel foi colocada em estufa a 50°C fazendo-se as medições de pH em tempos que variaram de 4 a 9 dias, como pode ser visto na Figura 4.14.

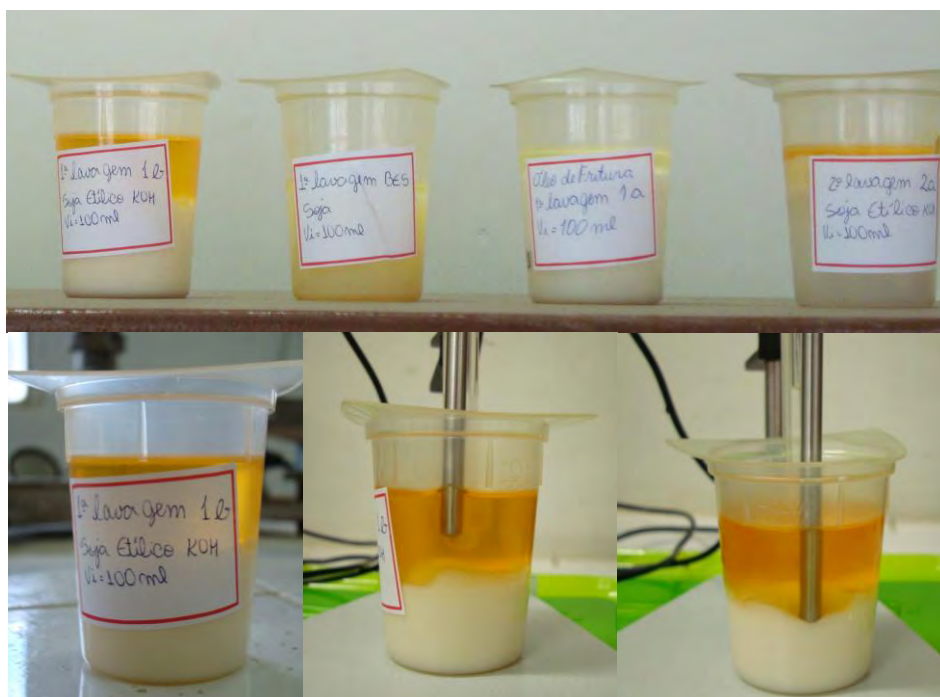


Figura 4.14 - Aspecto visual das amostras de água de lavagem da soja submetidas à temperatura de 50°C e a medição da sua alcalinidade ao longo do tempo.

Na temperatura de 50°C algumas amostras de água se evaporaram completamente ou o seu pH tornou-se rapidamente ácido, finalizando as tomadas de medida do pH para essas amostras.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 mostram a variação do pH com o tempo, em diferentes águas de lavagem de biodiesel. Esta mudança de pH alcalino para ácido indica a oxidação do resíduo líquido do biodiesel.

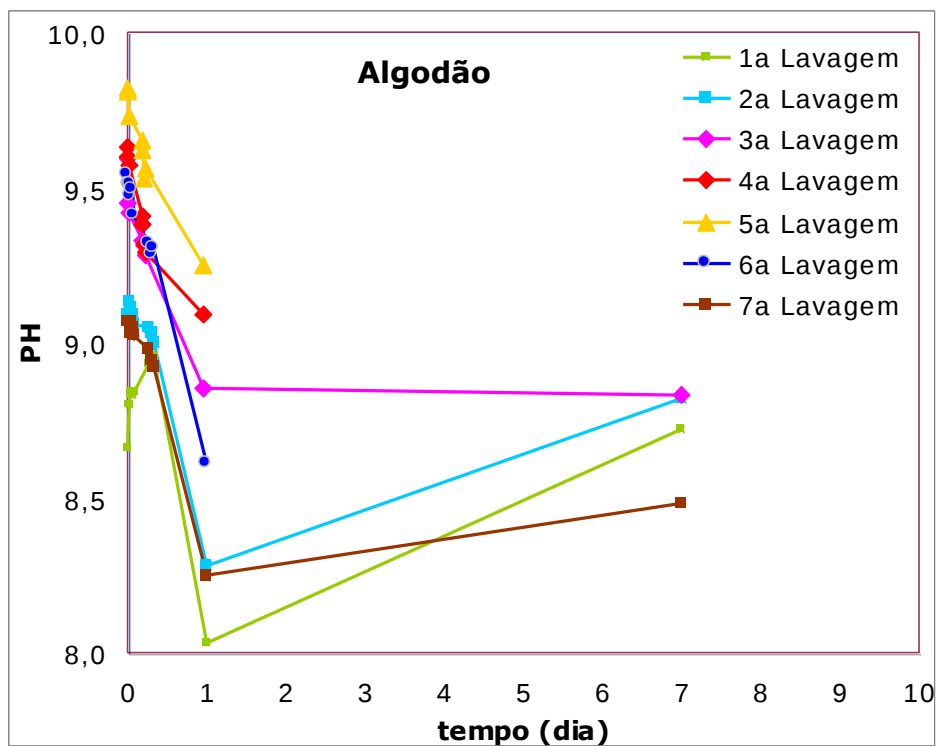


Figura 4.15 – Oxidação da água de lavagem de algodão ao longo do tempo.

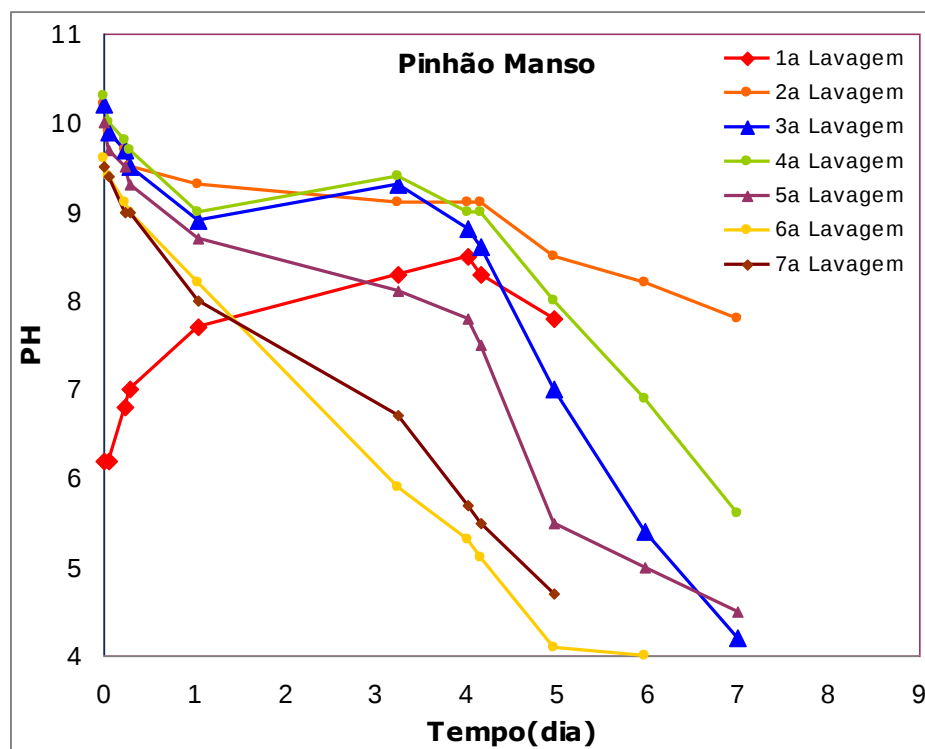


Figura 4.16 – Oxidação da água de lavagem do pinhão Manso ao longo do tempo.

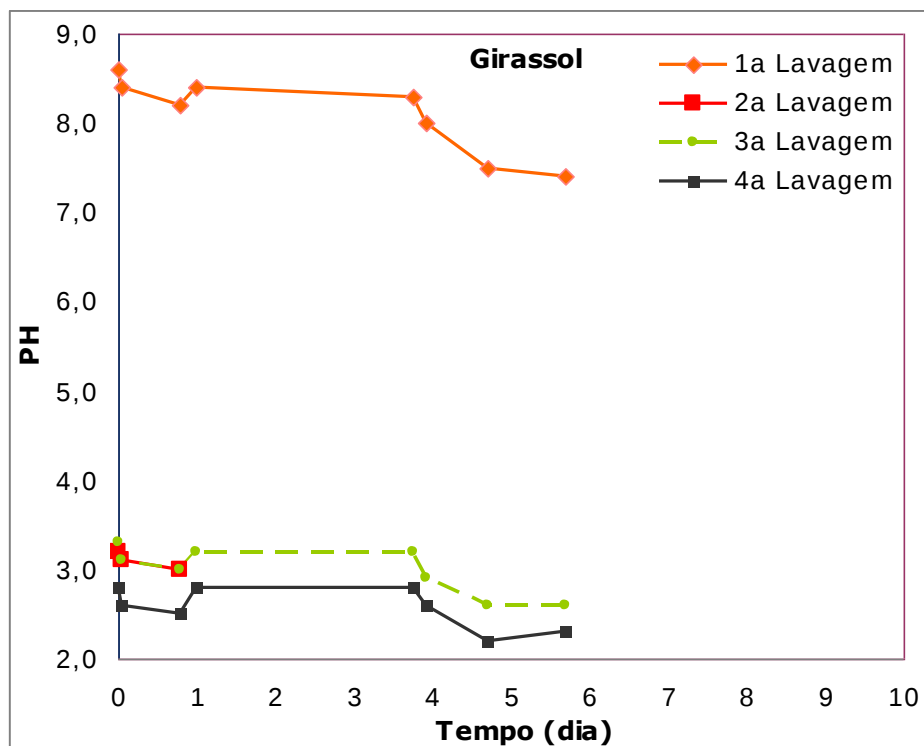


Figura 4.17 – Oxidação da água de lavagem de girassol ao longo do tempo.

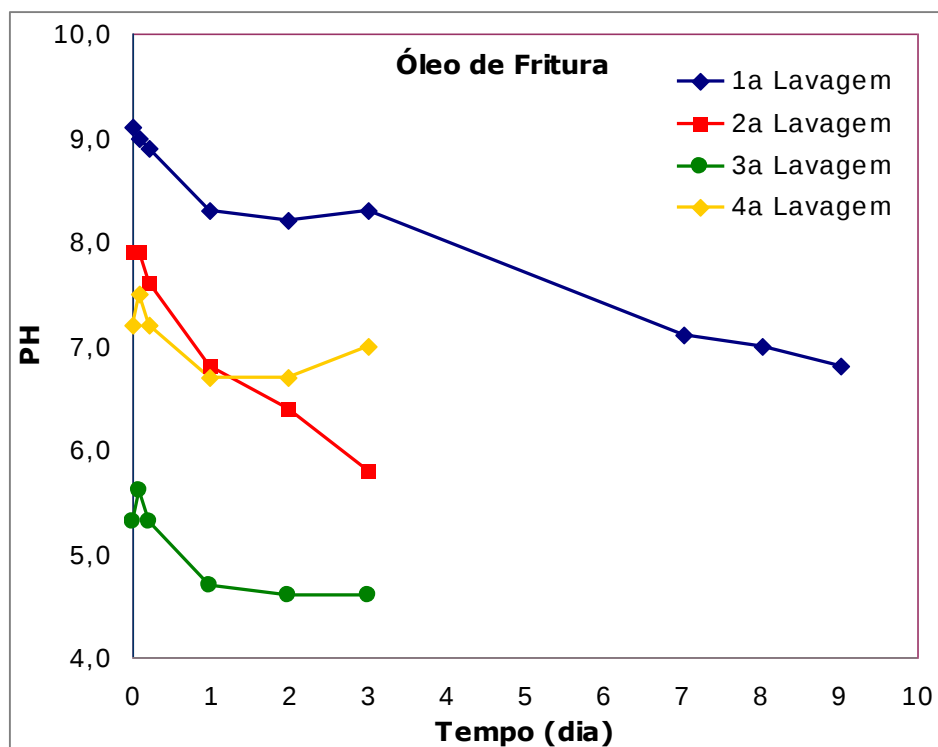


Figura 4.18 – Oxidação e da água de lavagem de óleo de fritura ao longo do tempo.

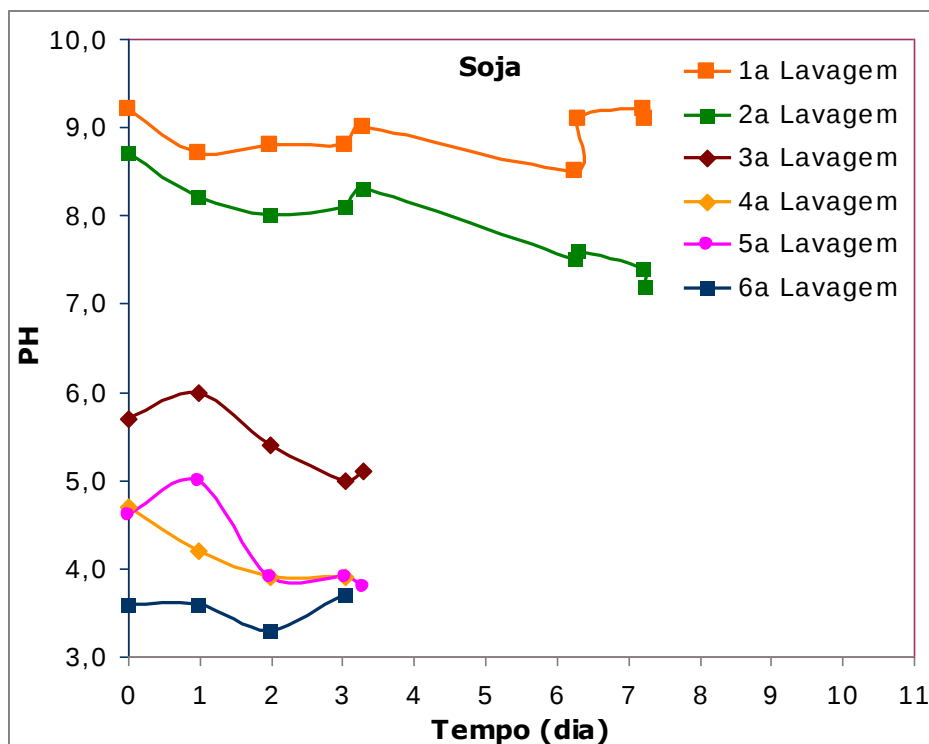


Figura 4.19 – Oxidação da água de lavagem de soja ao longo do tempo.

Nesta pesquisa observou-se uma degradação muito rápida da água de lavagem de biodiesel observada na temperatura de 50°C, no período entre 4 a 9 dias. Este comportamento é similar ao que ocorre com as amostras de biodiesel, segundo os estudos experimentais feitos por Leung *et al.* (2011). Ele que observou uma degradação de aproximadamente 40% para as amostras de biodiesel conservadas na temperatura em torno de 40°C.

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados de resistência à compressão simples das misturas estudadas nas idades de 3 e 28 dias, no regime de temperatura ambiente e secos em estufa à 55°C são apresentados nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23.

Nos sistemas submetidos à temperatura ambiente os compósitos prensados somente obtiveram resistência superiores a 2 MPa, valor mínimo considerado para blocos estruturais em habitações, a partir do teor de 6% de ativador aos 3 dias, sendo o mesmo comportamento observado para o período de 28 dias. A idade contribuiu para o aumento da

resistência, apenas quando foram colocados teores maiores de material alcalinamente ativável nas percentagens de 15% e 22%.

O ganho de resistência foi significativo com a ativação térmica destinada a se obter a energia de reação necessária para a geopolimerização.

As maiores resistências foram obtidas para a idade de 28 dias em cura à 55°C, mesmo para teores de ativador da ordem de 1%. Os valores de resistência foram maiores para os obtidos com o geopolímero usando-se o resíduo de biodiesel, em comparação ao geopolímero puro, nas mesmas condições. Na idade de três dias, com teor de 22% de ligante geopolimérico mais o resíduo de biodiesel, a resistência foi de 17,64 MPa superior ao valor da resistência do compósito usando apenas o geopolímero que foi de 6,52 MPa.

Em relação às misturas de cimento, verificou-se que em temperaturas ambiente entre 20°C e 30°C os valores de resistência são maiores do que temperatura na de 55°C. Embora a temperatura mais alta possa aumentar a resistência nas primeiras idades, essa temperatura pode prejudicar a resistência após o período de 7 dias. A temperatura mais elevada faz com que a hidratação inicial seja mais rápida formando uma estrutura mais porosa, que permanecerá para sempre sem ser preenchida (NEVILLE, 1997).

A resistência dos corpos de prova do cimento depende também da idade e do seu teor. Nos primeiros 3 dias o aumento da resistência não é tão significante quanto aos 28 dias. O valor da resistência à compressão de 7,5 MPa obtido ao terceiro dia aumentou para 17,9 MPa aos 28 dias, sendo um aumento considerável de 137,8%. A resistência aos três dias, na temperatura ambiente, para os teores de 6%, 15% e 22% de cimento, ficou praticamente constante, mas para o período de 28 dias observou-se um ganho de resistência com o aumento do teor de cimento.

Na Figura 4.22 percebe-se a influência da temperatura ambiente e da idade no ganho de resistência dos corpos de prova com cimento. Para o geopolímero com resíduo de biodiesel, observa-se ganho de resistência nas idades de 3 e 28 dias.

Observa-se na Figura 4.23, que a temperatura de 55°C favoreceu o ganho de resistência dos compósitos de geopolímero + resíduo líquido de biodiesel nas idades de 3 e 28 dias. O valor mais alto foi de 18,5 MPa para esse compósito aos 3 dias.

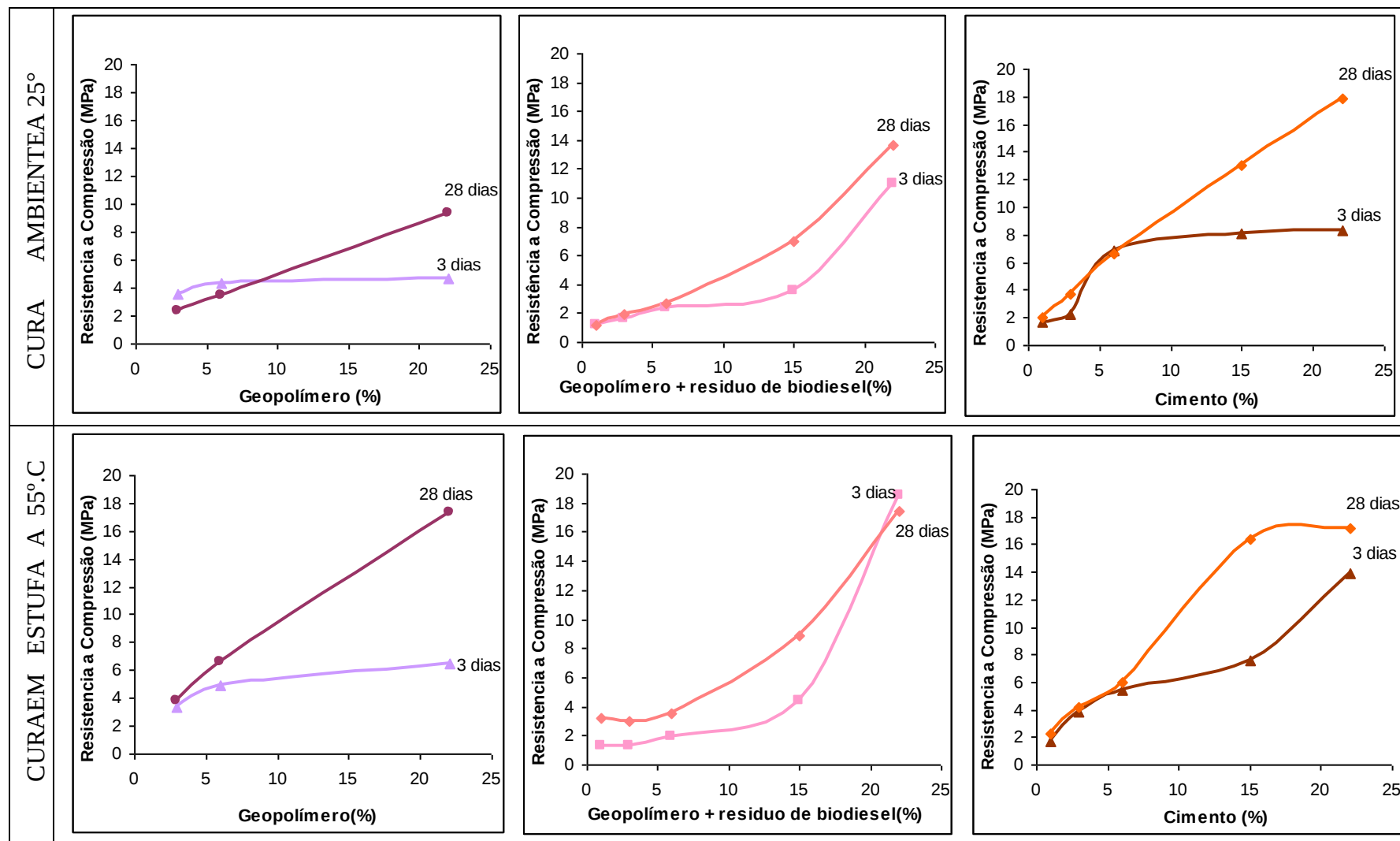


Figura 4.20–Resistência a Compressão Simples de corpos de prova.

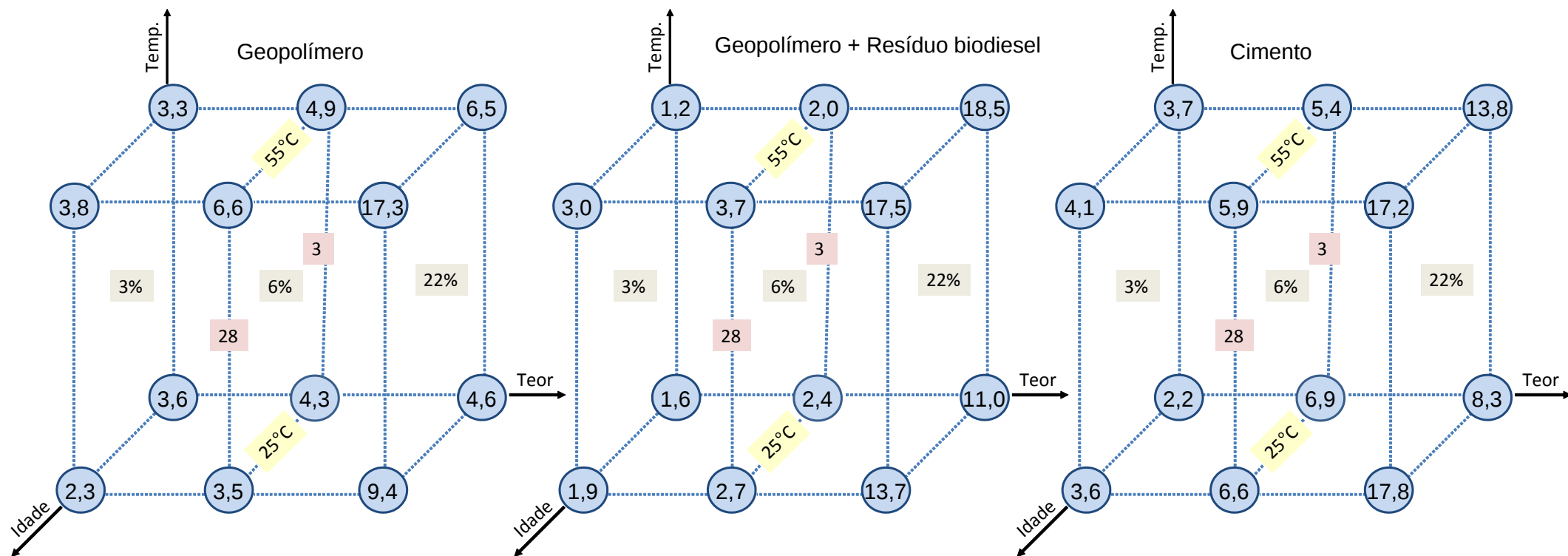


Figura 4.21 – Resistência a Compressão Simples de corpos de prova.

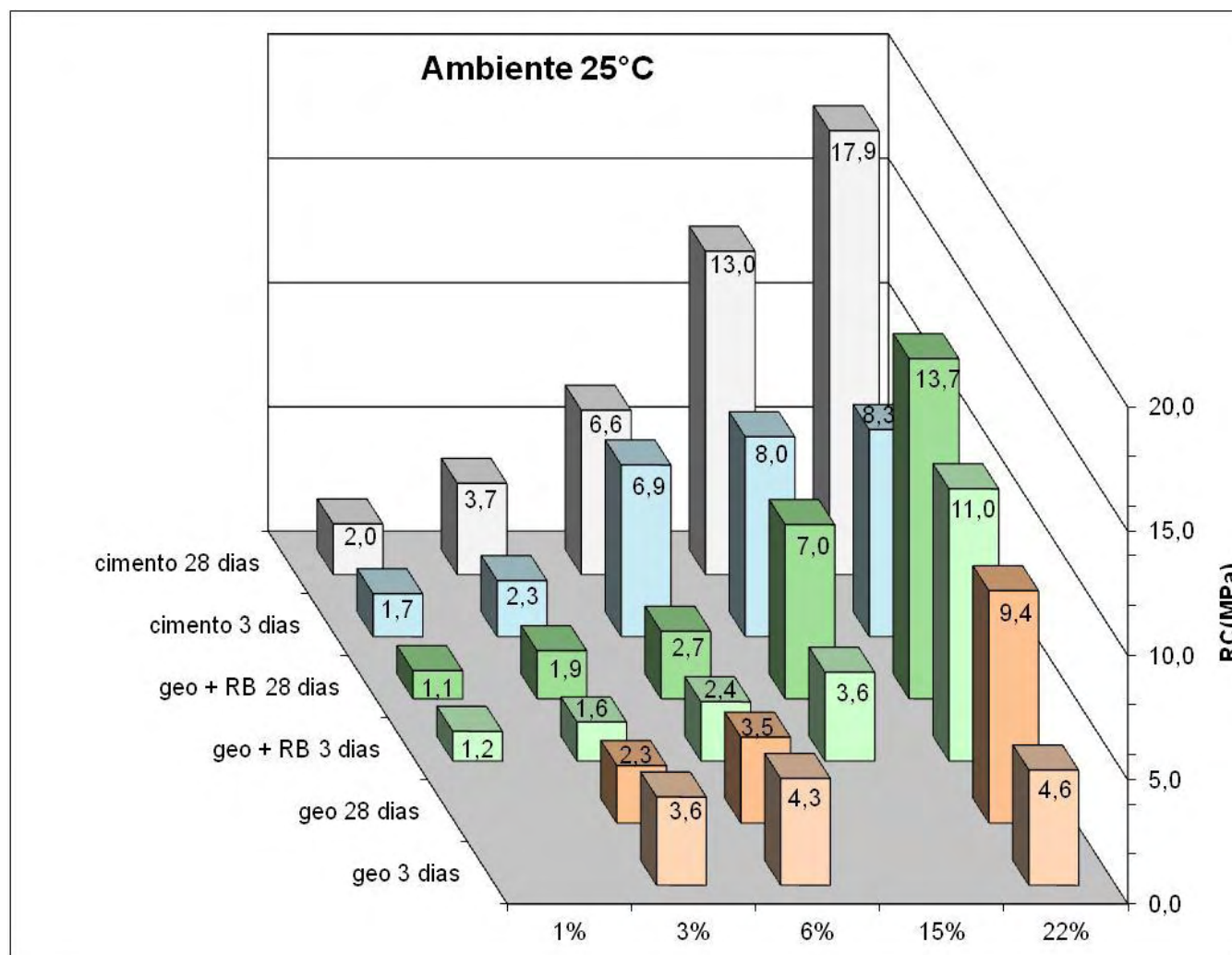


Figura 4.22 – Resistência a Compressão Simples de corpos de prova. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

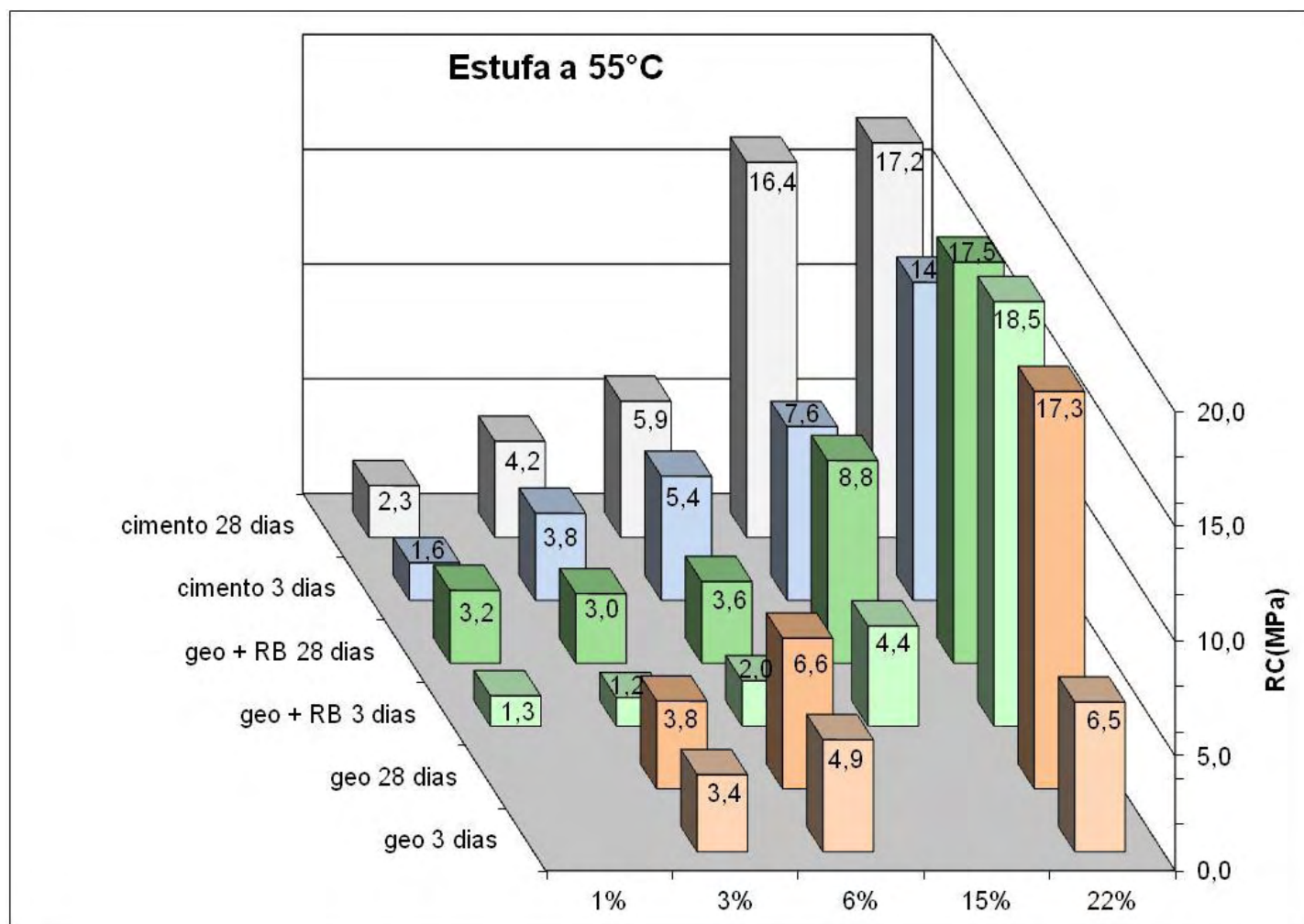


Figura 4.23 – Resistência a Compressão Simples de corpos de prova. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Nas Figuras 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27 observa-se que os valores de resistência à tração no ensaio de flexão (três pontos) foram muito baixos variando de 0,05 MPa a 0,73 MPa para o geopolímero com resíduo de biodiesel nos teores de 1% e 22% respectivamente, a 28 dias, correspondendo a 4,2% da resistência a compressão simples.

Observa-se que os teores de ativadores, a idade de 28 dias e a temperatura em estufa à 55°C influenciou no aumento da resistência a tração para as misturas geopoliméricas.

Nota-se que os valores de resistência para o geopolímero com resíduo do biodiesel para o teor de 22% foram superiores ao geopolímero puro nas mesmas condições de temperatura e tempo de cura. Em relação ao cimento observa-se este mesmo comportamento, salvo para o teor de 22% em cura ambiente a 28 dias, com valor de resistência a tração de 0,78 MPa contra 0,50 MPa do geopolímero com biodiesel com as mesmas características, percebe-se então a influência da temperatura de 55°C no geopolímero que com apenas 3 dias já tem resistência de 0,67 MPa, bem próxima do valor de 0,73 MPa aos 28 dias.

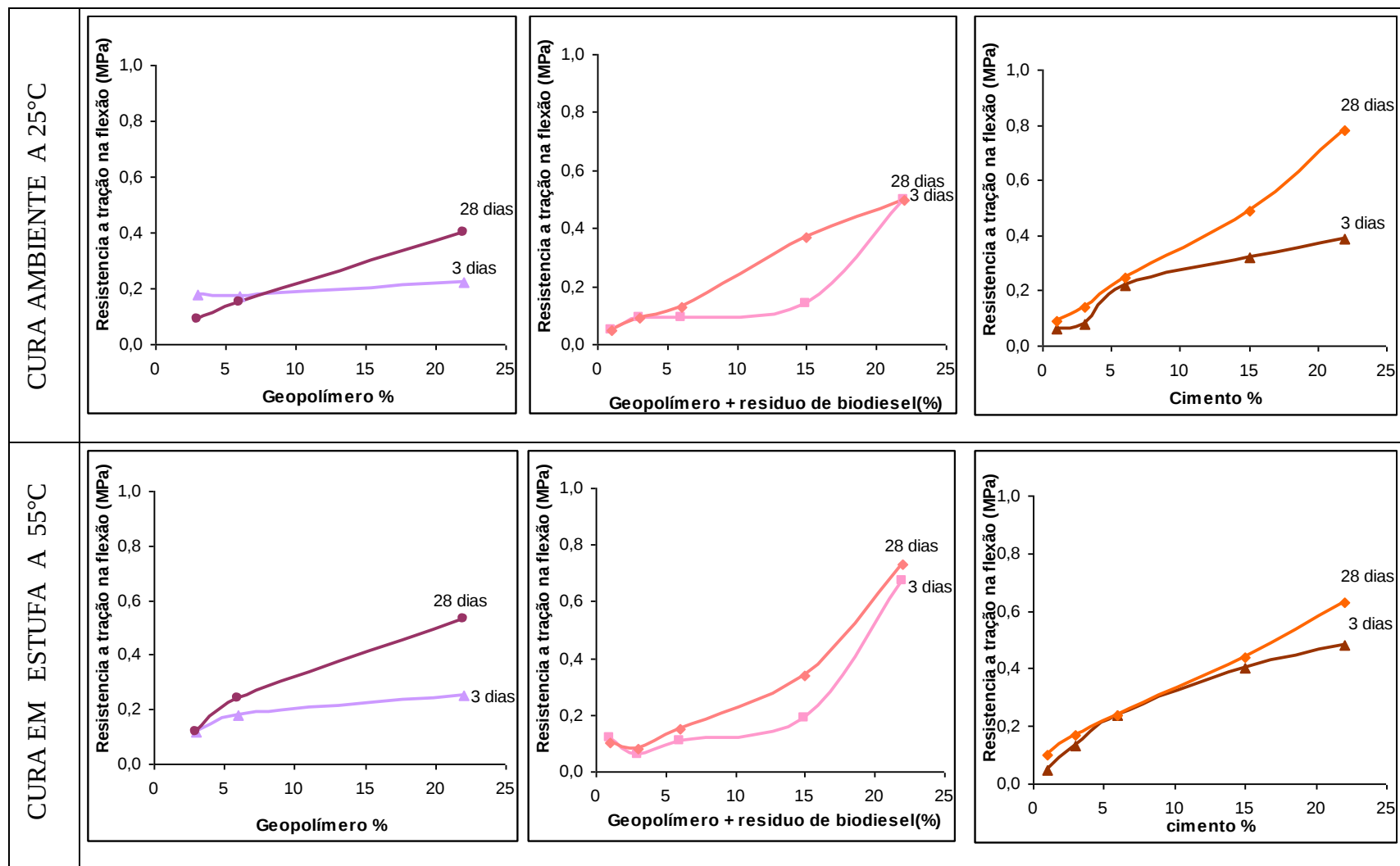


Figura 4.24 – Resistência a tração na flexão de corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias.

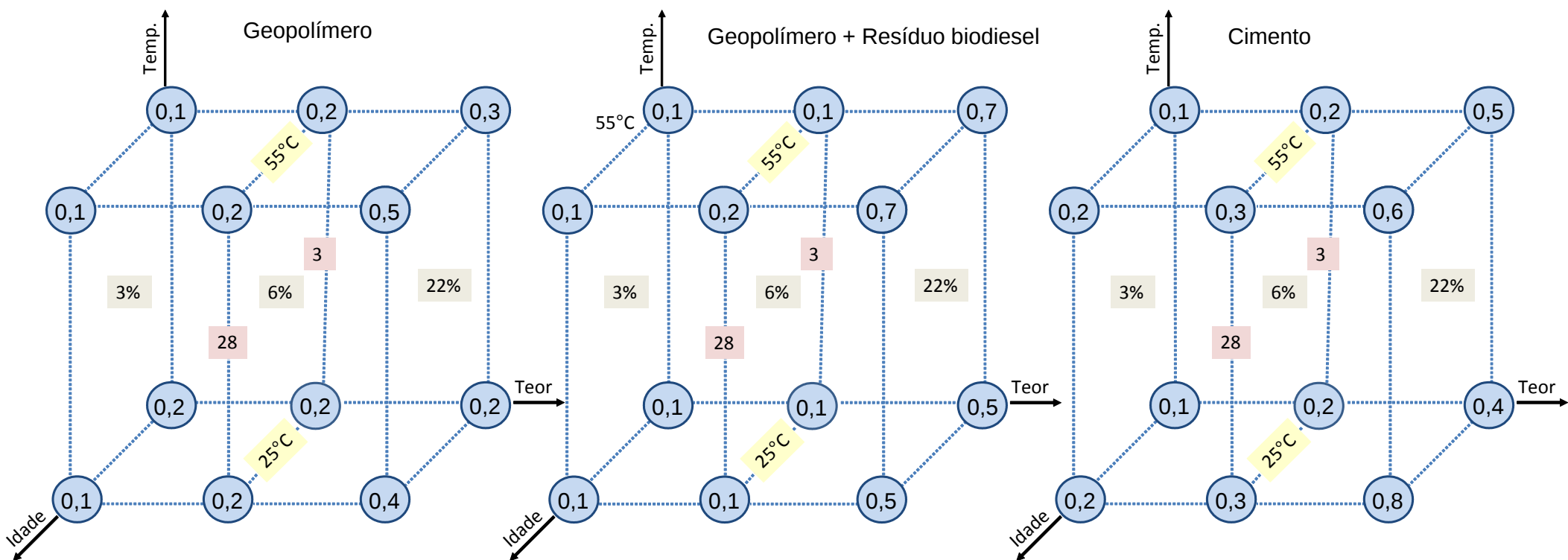


Figura 4.25 – Resistência à tração na flexão de corpos de prova

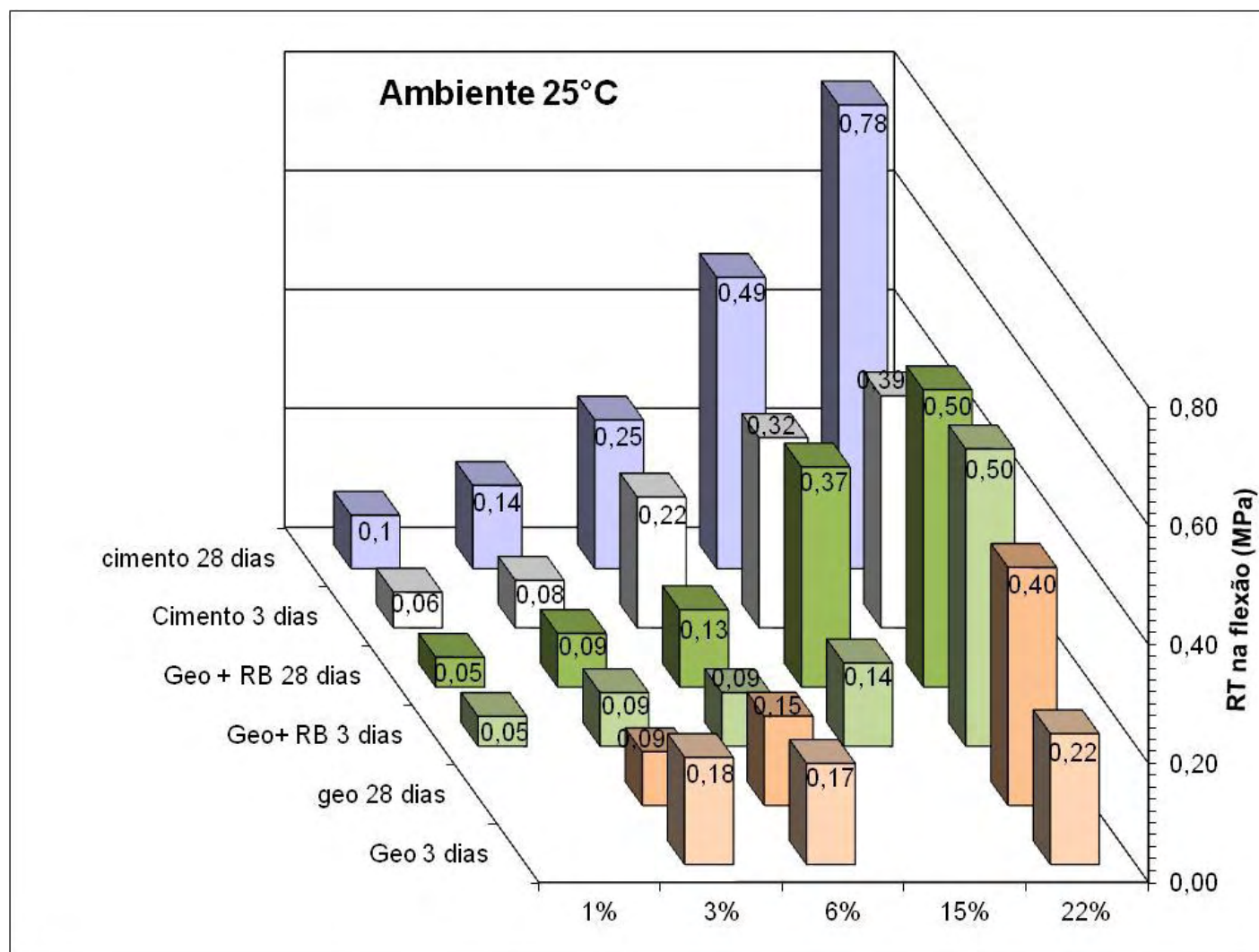


Figura 4.26 – Resistência a tração na flexão de corpos de prova. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

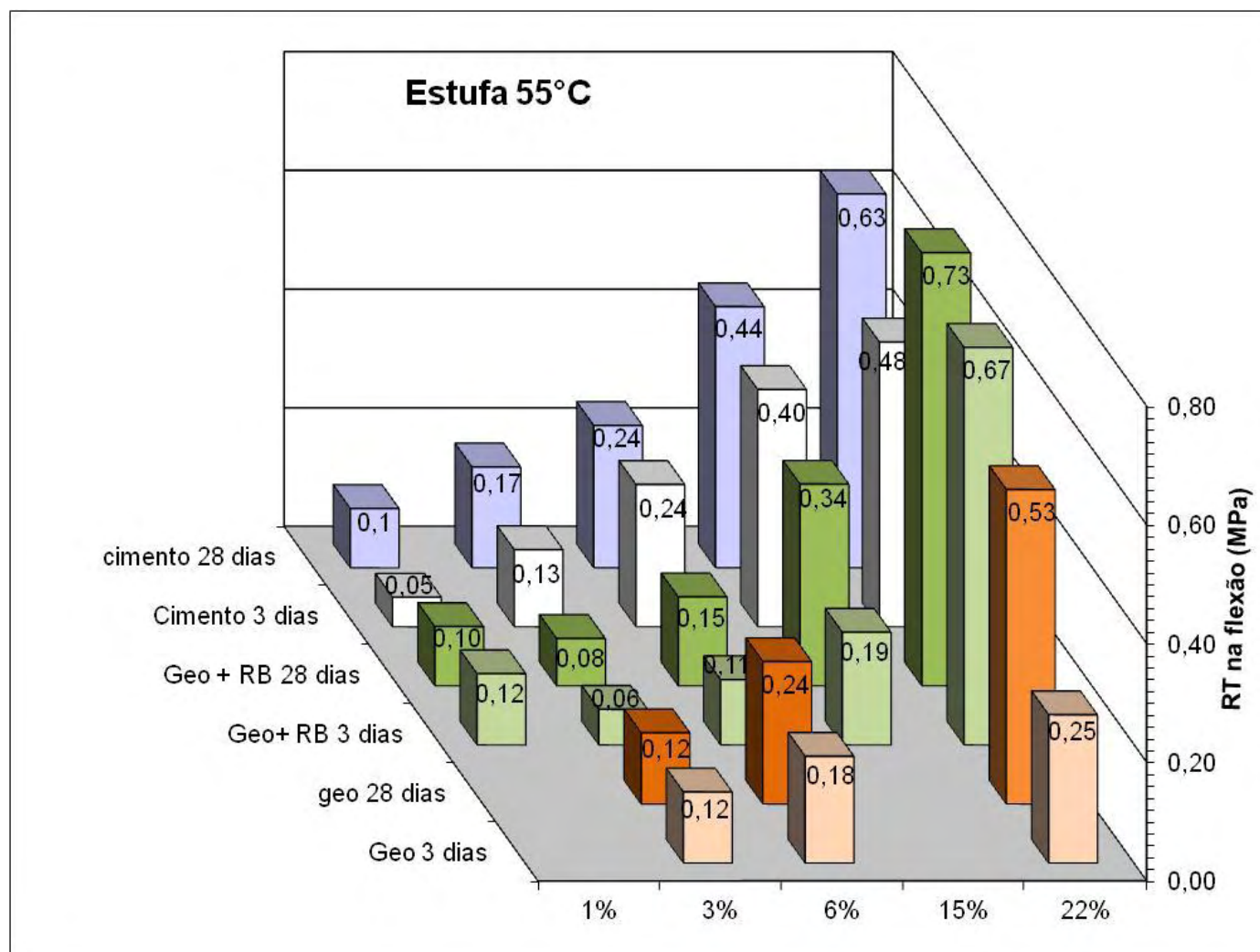


Figura 4.27 – Resistência a tração na flexão de corpos de prova. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

4.7 ABSORÇÃO

Os valores de absorção são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Absorção por imersão de amostras

Ativador	Teor	Ambiente		Estufa 55o.C	
		3d	28d	3d	28d
geopolímero	3%	13,73	15,53	14,53	14,72
	6%	14,21	14,76	14,58	15,02
	22%	16,32	13,67	16,00	13,66
geopolímero+ RB	1%	14,31	17,53	17,47	12,93
	3%	13,19	16,60	14,35	14,09
	6%	14,44	17,01	16,34	13,67
	15%	14,32	13,15	14,19	13,79
	22%	12,55	11,76	12,41	12,31
cimento	1%	15,83	14,58	15,65	14,92
	3%	17,64	14,83	13,72	14,16
	6%	15,54	14,61	16,85	15,25
	15%	16,44	13,46	15,50	14,10
	22%	17,46	12,52	17,72	13,21

RB = Resíduo Líquido de Biodiesel

De acordo com os valores da Tabela 4.4, os resultados de absorção para todas as misturas variaram de 11,76% a 17,72% , estes valores apresentaram-se coerentes com a norma NBR 8491, que recomenda valores inferiores a 20% . Este comportamento também pode ser observado nas Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31.

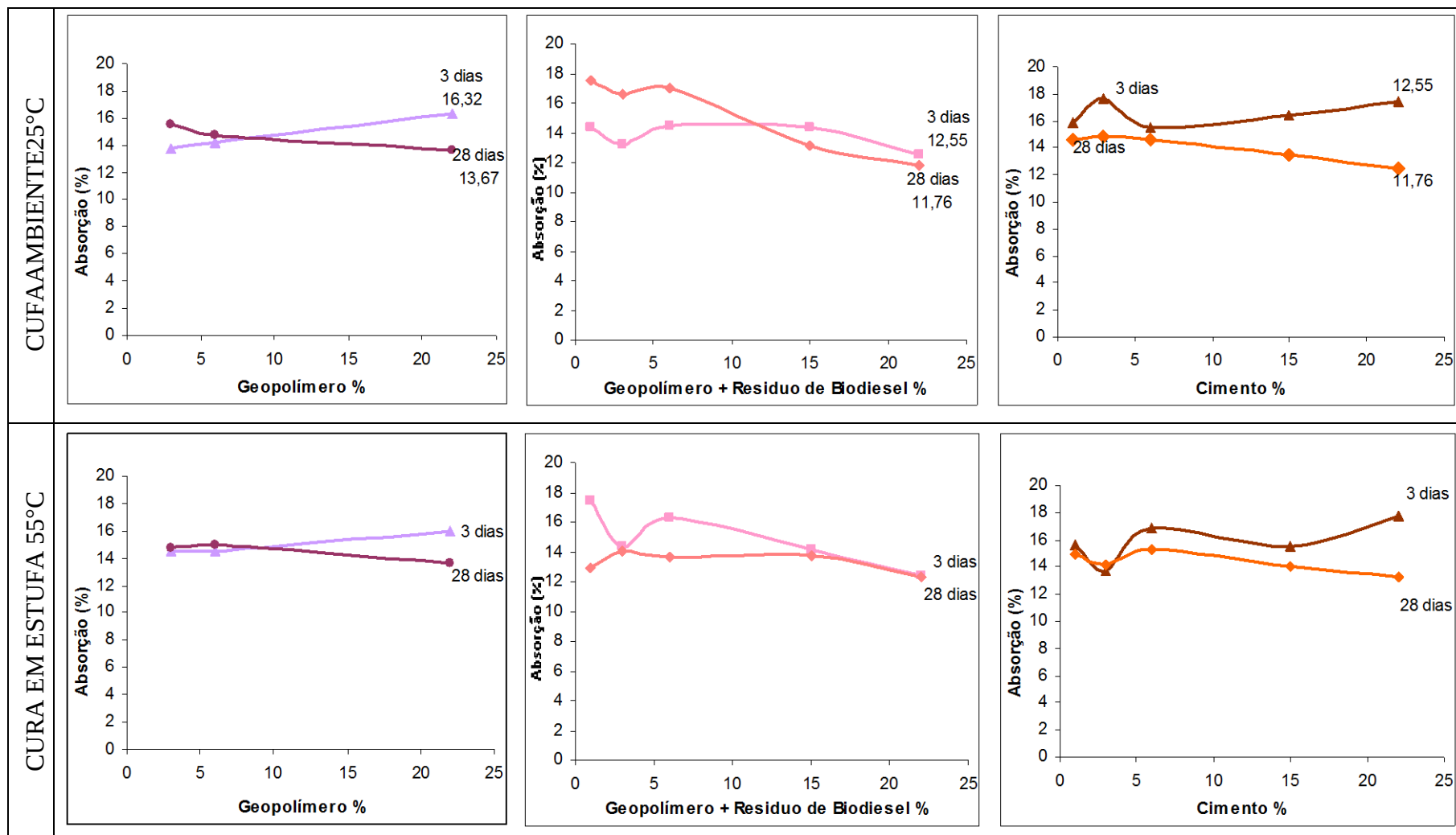


Figura 4.28 – Absorção de corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias.

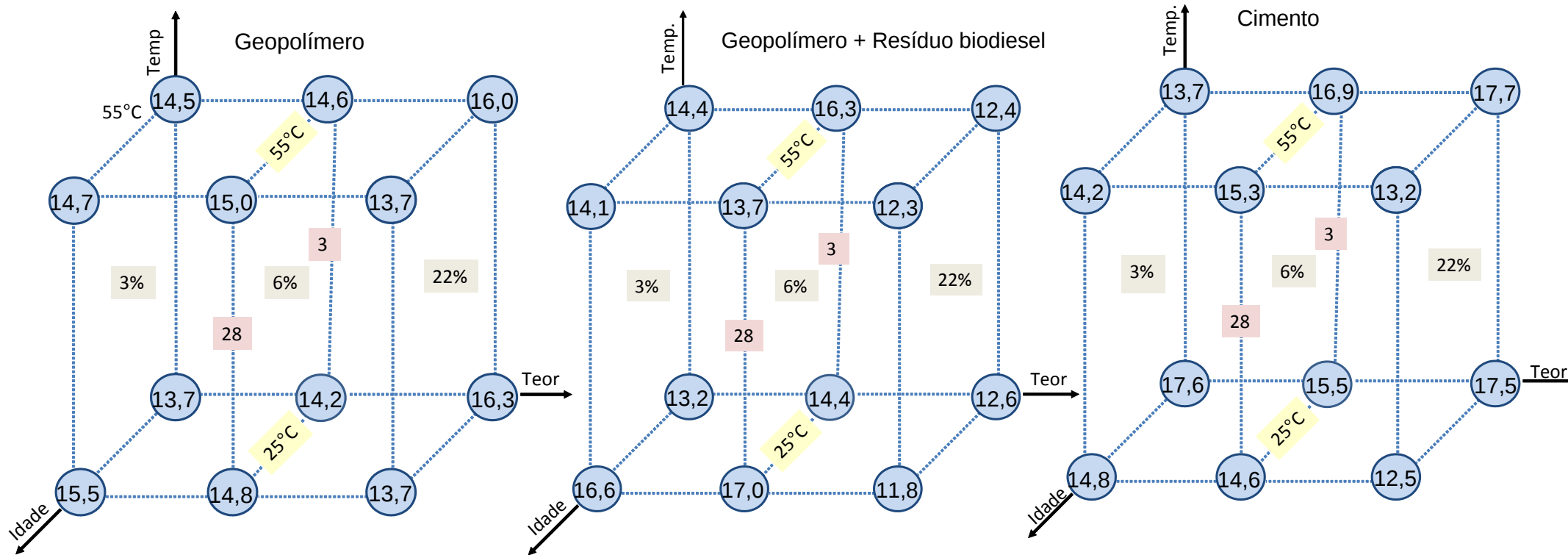


Figura 4.29 – Absorção dos corpos de prova

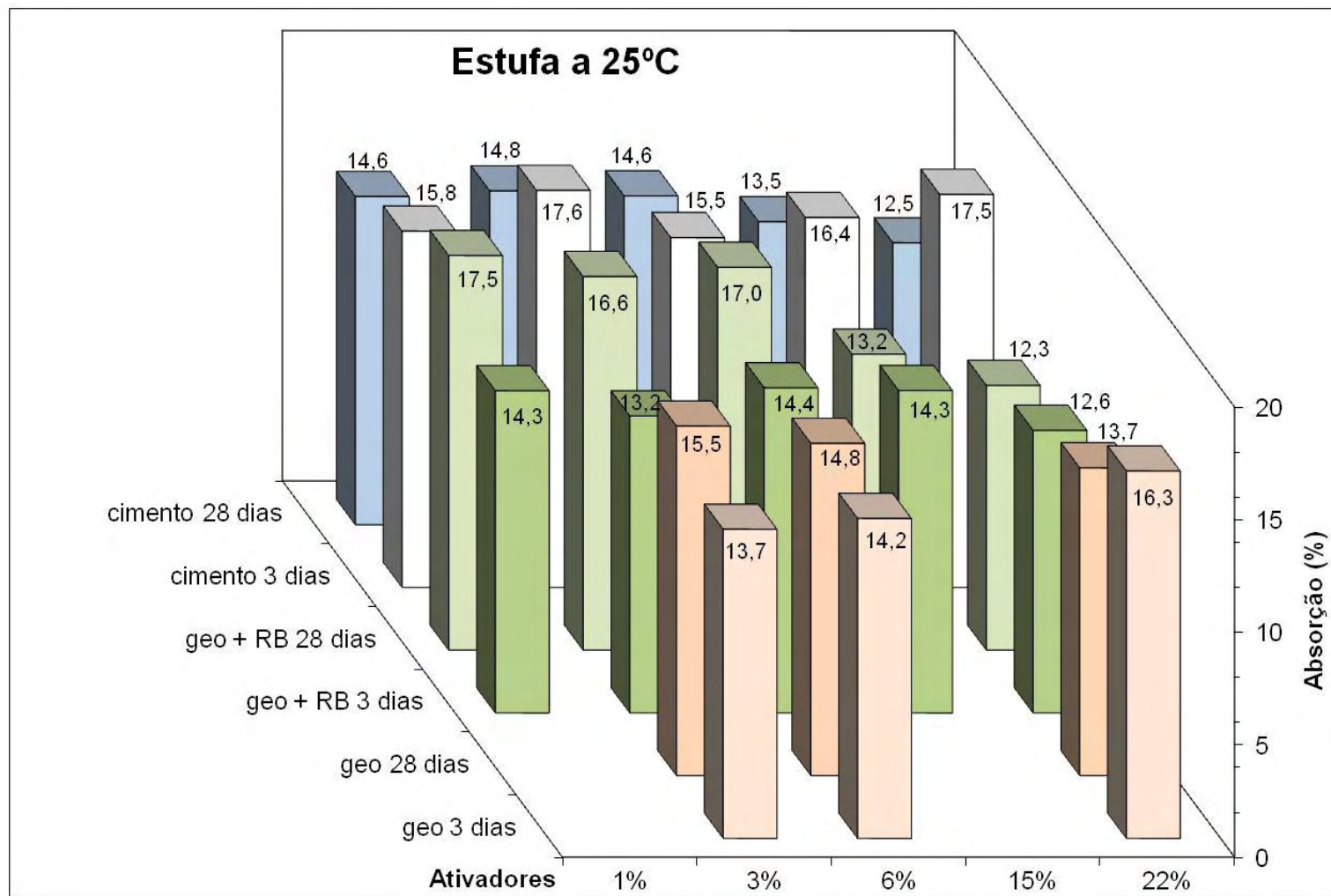


Figura 4.30 – Absorção dos corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias em temperatura ambiente (25°C) . RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

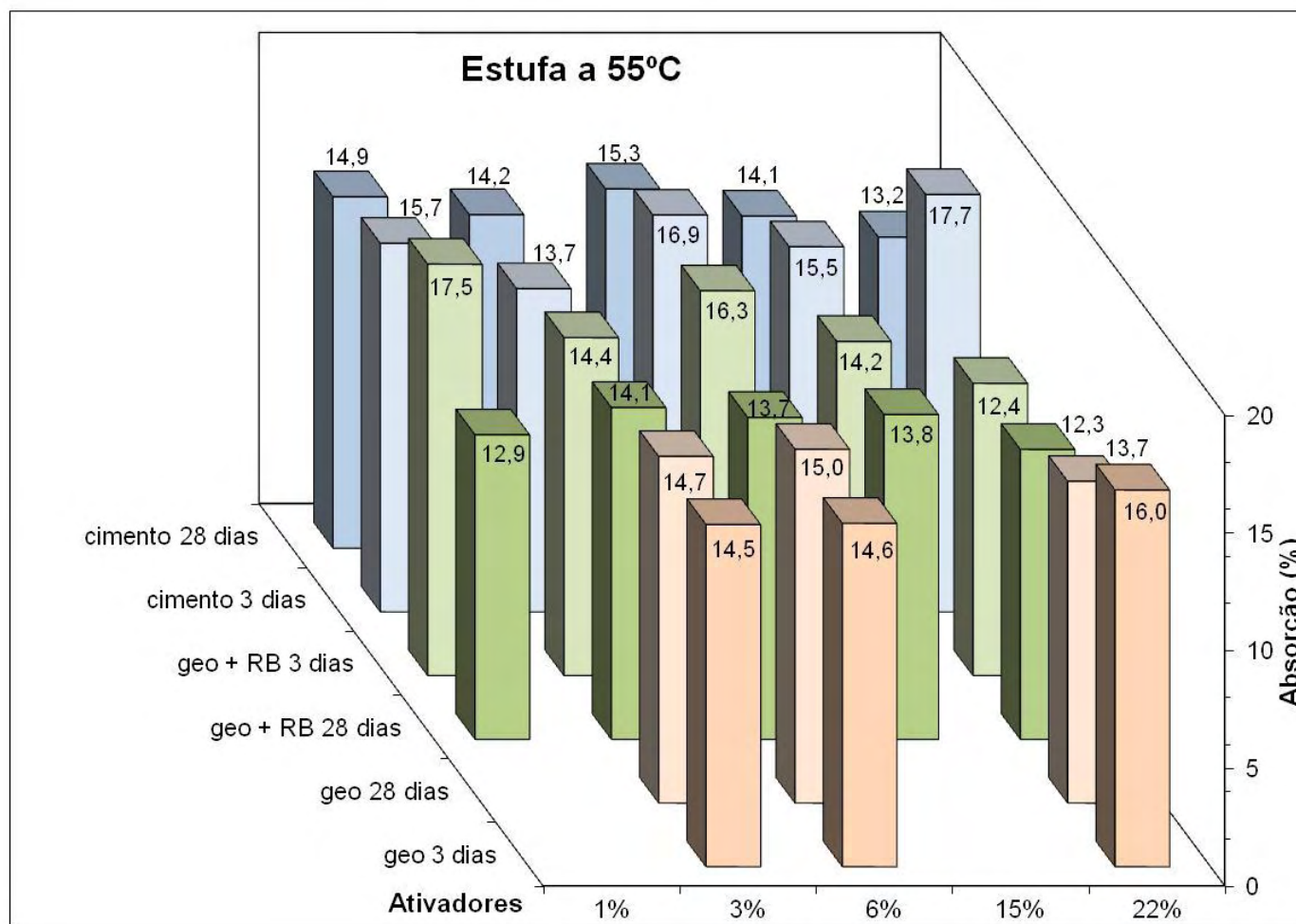


Figura 4.31 – Absorção dos corpos de prova nas idades de 3 e 28 dias em cura em estufa (55°C). RB – Resíduo Líquido de Biodiesel.

4.8 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os valores de absorção estão apresentados na Tabela 4.5 e Fig. 4.32

Tabela 4.5 – Perda de massa por imersão das amostras.

Tipo de Mistura	Porcentagem (%)	Período de Cura (dias)	Absorção (%)	
			Ambiente	Estufa 55°C
Geopolímero	3	3	4,63	2,95
	6		4,62	2,82
	22		2,90	2,63
Geopolímero + Resíduo do Biodiesel	3	3	3,42	3,11
	6		2,98	3,15
	22		2,56	2,78
Cimento	3	3	3,89	4,48
	6		2,95	3,31
	22		1,23	1,38

Os valores da Tabela 4.5 mostram que com o aumento do teor ligante ocorre a redução da absorção de água dos corpos de prova

O material apresenta facilidade para a penetração de fluidos por capilaridade, o processo parece ser influenciado pelas condições de cura, em particular a temperatura e o grau de umidade relativa a que a amostra foi curada (TEIXEIRA PINTO, 2004)

Percebe-se na Figura 4.32, que na medida em que se aumenta o teor de ligantes ocorre a diminuição da absorção para todos os sistemas.

No sistema geopolimérico, em cura ambiente, verifica-se uma grande variação dos valores da absorção, de 4,63% a 2,9%, correspondendo a uma redução de 159,65%. O menor valor de absorção de água obtida para este sistema foi de 2,9% para o teor de 22%. Observa-se a influência da cura em estufa em comparação a cura ambiente, na redução da absorção de água do corpo de prova, com valores mais baixos na ordem de 2,95%, 2,82% e 2,63%, para os teores de 3%, 6% e 22% respectivamente.

Para o sistema com resíduo líquido de biodiesel, observa-se uma pequena redução da absorção, entre os teores de 6% e 22% nos dois tipos de cura, apresentando uma curva praticamente constante. Para os dois tipos de cura os valores em variaram em torno de 3,42% a 2,52%.

No sistema com o cimento a redução da absorção de água ocorreu com o teor de 22% de ligante, sendo de 1,23% para cura ambiente e 1,38% para cura em estufa. Esses valores foram menores do que todos os outros sistemas. A curva da cura em estufa seguiu a mesma tendência da cura ambiente.

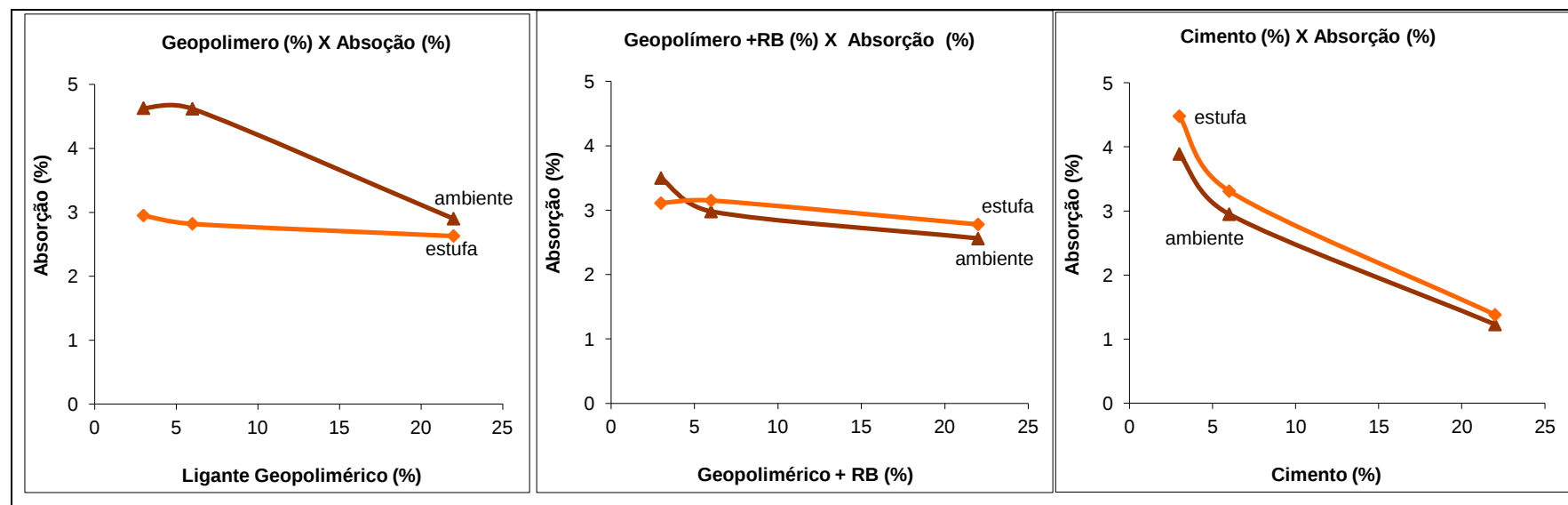


Figura 4.32- Absorção por capilaridade dos sistemas geopolimérico, geopolimérico com resíduos de biodiesel e de cimento.

RB= Resíduo Líquido de Biodiesel

4.9 DURABILIDADE

Os valores de perda de massa dos corpos de prova são mostrados na Tabela 4.6 e Figuras 4.33, 4.34 e 4.35. As amostras após o 12º ciclo podem ser vistas nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.6 – Perda de massa por imersão das amostras.

Tipo de Mistura	Percentagem (%)	Período de Cura (dias)	Perda de Massa no 12º Ciclo (%)	
			Ambiente	Estufa 55°C
Geopolímero	3	3	12,7	16,4
	6		6,7	5,5
	22		2,2	2,1
Geopolímero + Resíduo do Biodiesel	3	3	16,9	18,1
	6		6,2	5,5
	22		3,6	3,4
Cimento	3	3	24,4	25,6
	6		10,3	9,9
	22		5,5	6,9

Percebe-se na Tabela 4.6 que os sistemas com ligantes geopoliméricos obtiveram os melhores resultados com valores na faixa compreendida entre 6,7 % a 2,1 % para os teores de 6% e 22% de ligantes, tanto em cura ambiente e quanto em estufa. O sistema com cimento apresentou valores mais elevados em relação aos sistemas geopoliméricos para todos os teores. Observa-se também, que em todos os sistemas as perdas de massa foram menores com o aumento do teor de ligantes.

Nas Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 pode-se observar que a perda de massa decresce com o aumento da percentagem dos ligantes.

Os sistemas alcalinamente ativados perdem menos massa do que no de solo-cimento para maiores teores de ligante, tanto na cura em estufa, quanto na cura ambiente, como se pode ver na Figuras 4.33, 4.34 e 4.35.

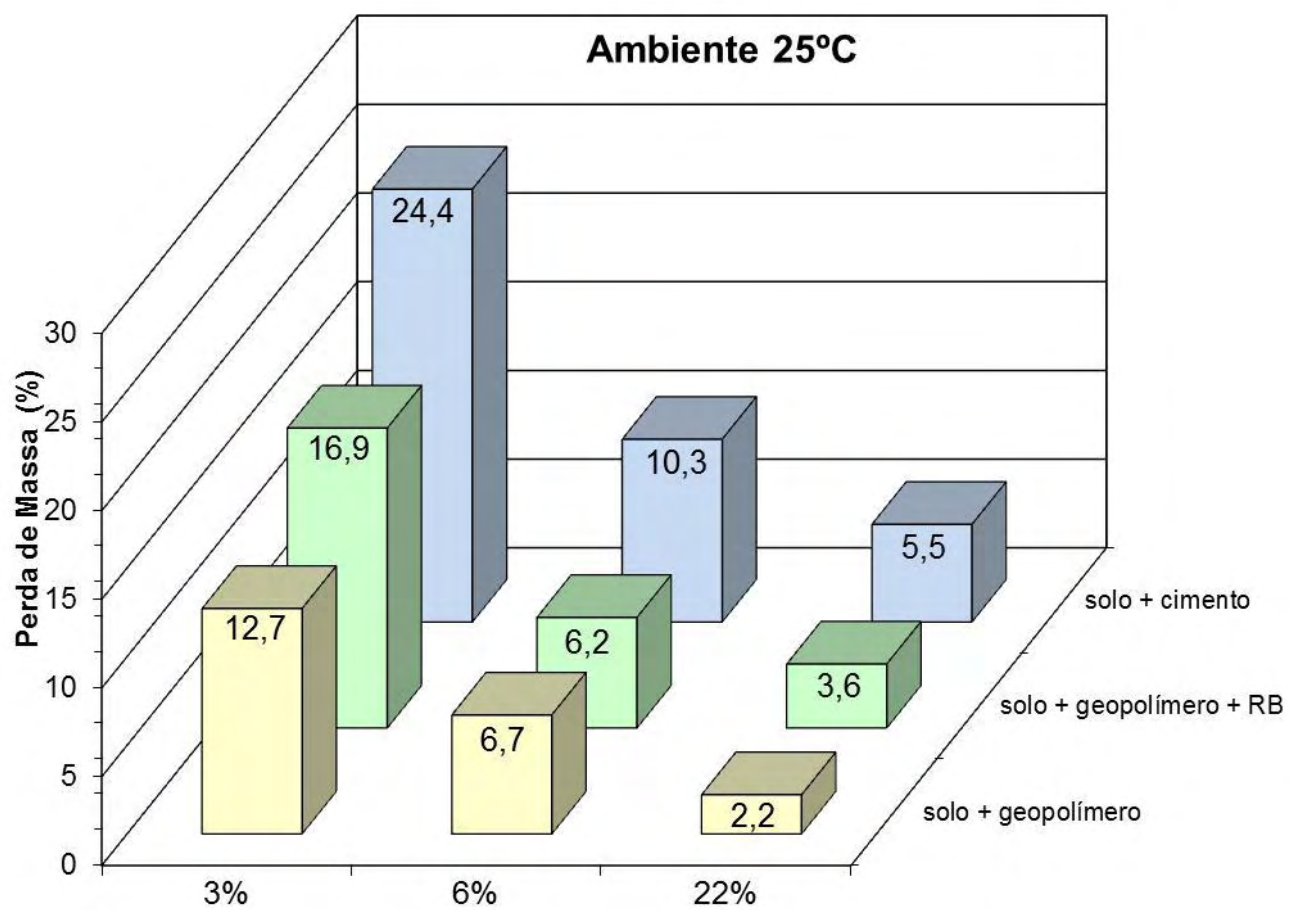


Figura 4.33 – Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

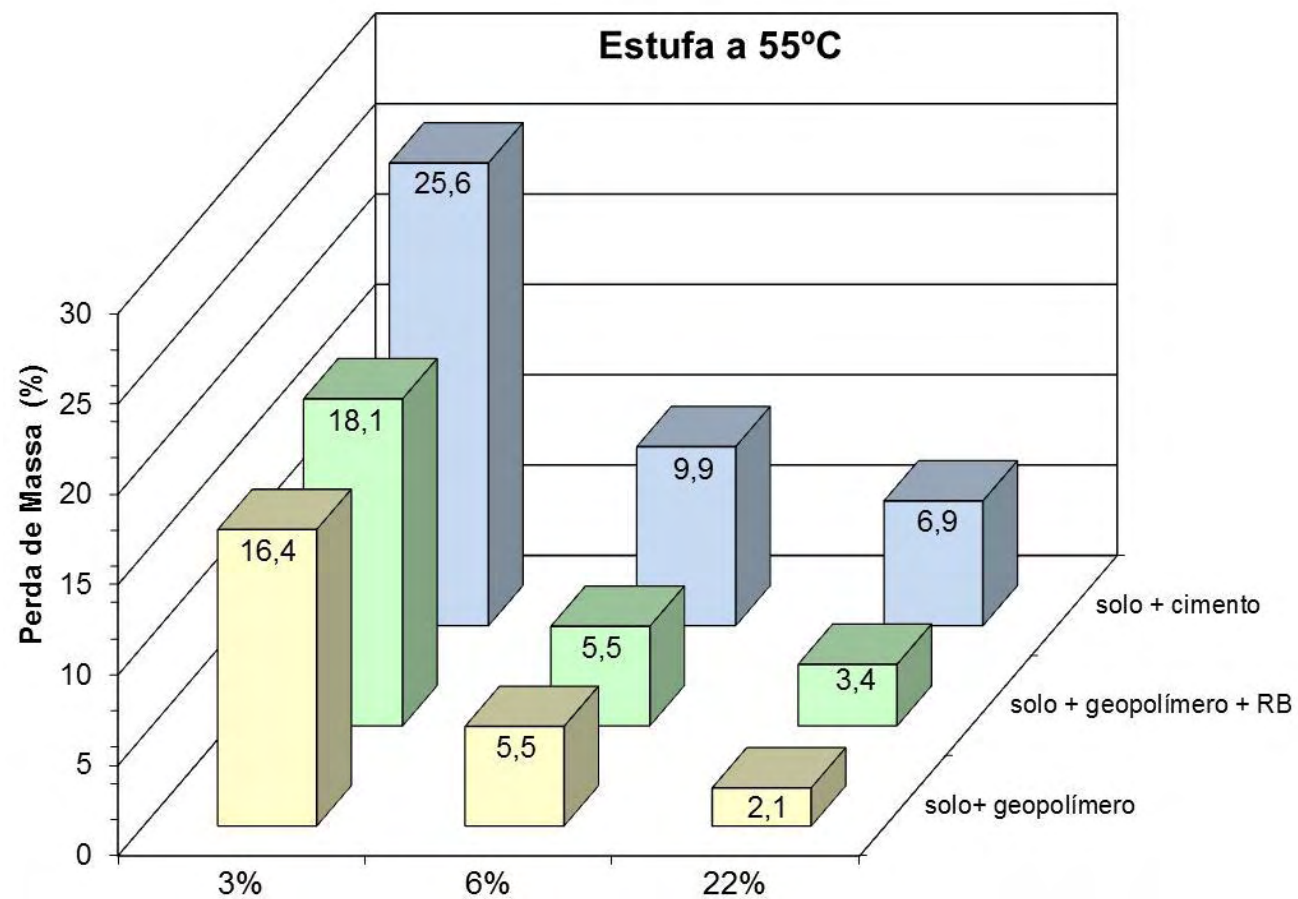


Figura 4.34 – Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

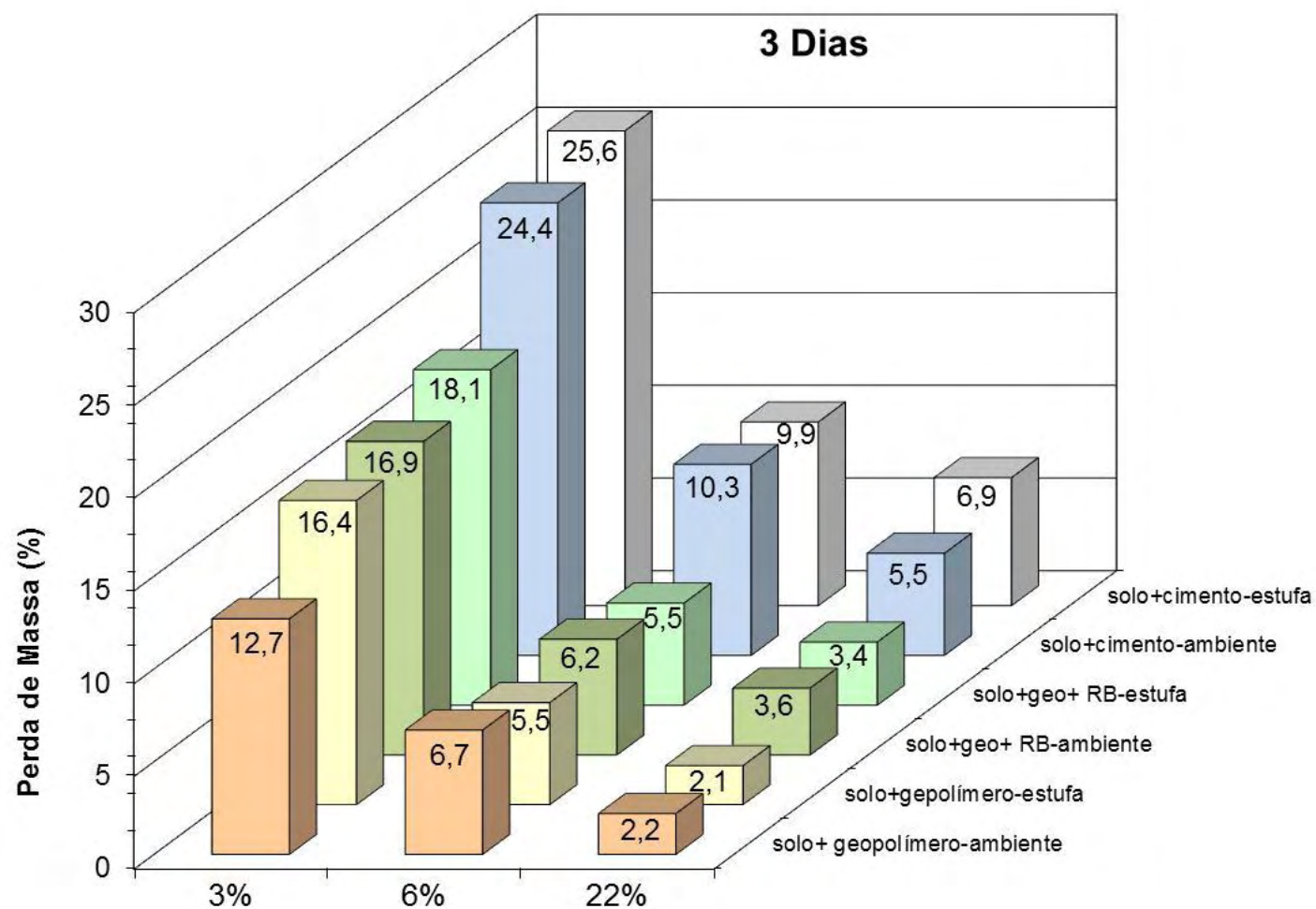


Figura 4.35 – Perda de massa dos corpos de prova no 12º ciclo. RB – Resíduo Líquido de Biodiesel

Tabela 4.7 - Aspecto dos blocos submetidos a ensaio de durabilidade por perda de massa, na temperatura ambiente a 25 °C

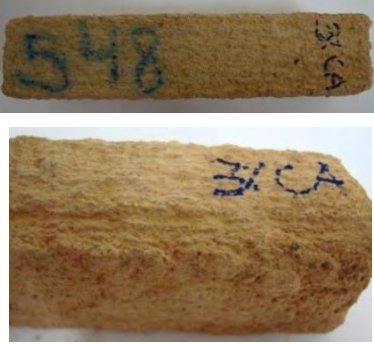
TEOR DE LIGANTE	3%	6%	22%
GEOPOLÍMERO + RESÍDUO LÍQUIDO DE BIODIESEL			
GEOPOLIMERO			
CIMENTO			

Tabela 4.8 -Aspecto dos blocos submetidos a ensaio de durabilidade por perda de massa, na temperatura em estufa a 55 °C

TEOR DE LIGANTE	3%	6%	22%
GEOPOLÍMERO + RESÍDUO LÍQUIDO DE BIODIESEL	 	 	 
GEOPOLÍMERO	 	 	 
CIMENTO	 	 	 

Nas Tabelas 4.7 e 4.8, pode-se observar o aspecto visual dos corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem e escovação do 12º ciclo. Para o teor de 22%, tanto em cura em estufa quanto em ambiente o corpos de prova apresentaram-se bem conservados. Percebe-se uma maior perda de massa com a diminuição do teor de ligante. As superfícies mais desgastadas e as ranhuras mais visíveis foram observadas em corpos de prova com baixos teores de ligantes.

4.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A seguir são apresentadas nas Figuras 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39, as imagens das microestruturas obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura.

Pela análise química pode-se verificar que o grão mostrado na Figura 4.36 é constituído predominantemente de Si e, portanto é um quartzo. Por sua vez a matriz predominantemente constituída por Al (alumínio), Na (sódio) provavelmente Fe (ferro), e traços de K (potássio), Cl (cloro) e S (enxofre).

Na Figura 4.37, no grão constituído de silício e a matriz é predominantemente constituída por Al (alumínio), provavelmente Fe (ferro), Na (sódio), e traços de K (potássio), S(enxofre) e Cl(cloro).

Na Figura 4.38, o grão apresenta-se constituído por silício, logo é um quartzo. A matriz cimentícia observa-se a predominância de alumínio (Al), cálcio (Ca), nódulos de magnésio (Mg), traços de ferro (Fe), potássio (K) sódio (Na) e enxofre (S).

N a Figura 4.39, o grão é predominantemente constituído de silício (Si) e na matriz de cimento vê-se predominância de alumínio (Al), cálcio (Ca), nódulos de magnésio (Mg) e ferro (Fe) e traços de enxofre (S),sódio (Na) e potássio (K).

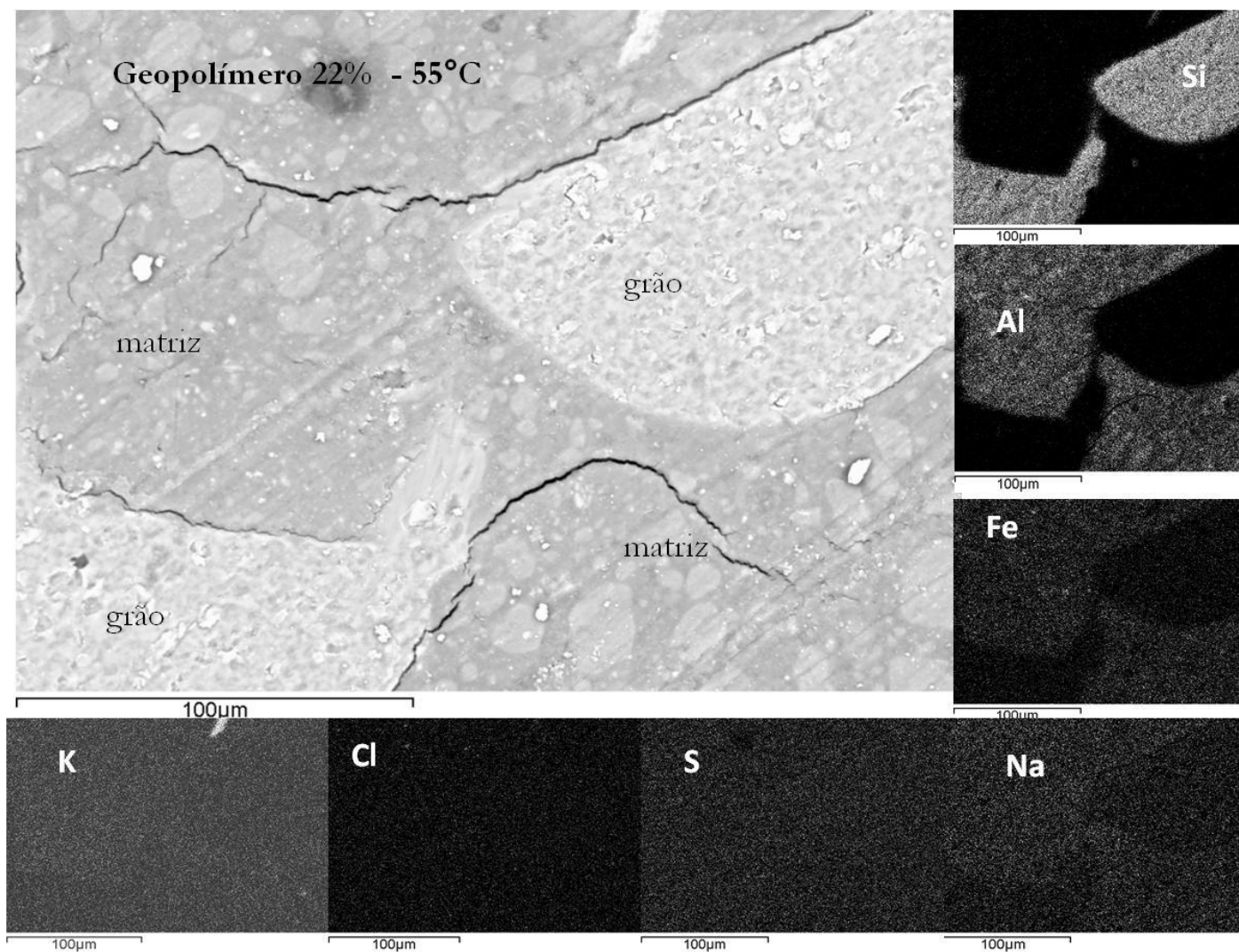


Figura 4.36 - Microscopia da composição formada por solo + geopolímero (22%). Cura em estufa a 55°C

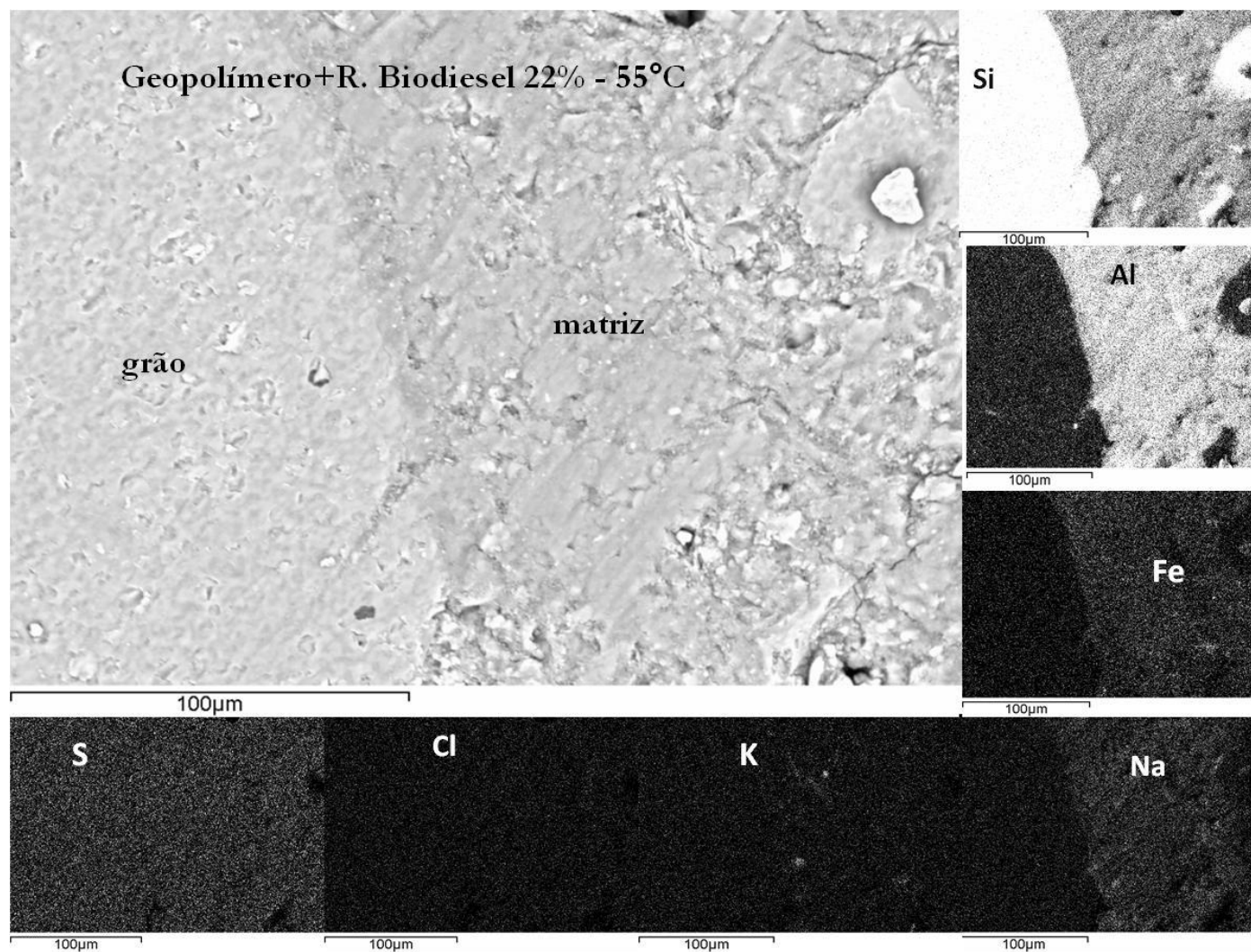


Figura 4.37 – Microscopia da composição formada por solo + geopolímero + resíduo líquido de biodiesel (22%). Cura a 55°C

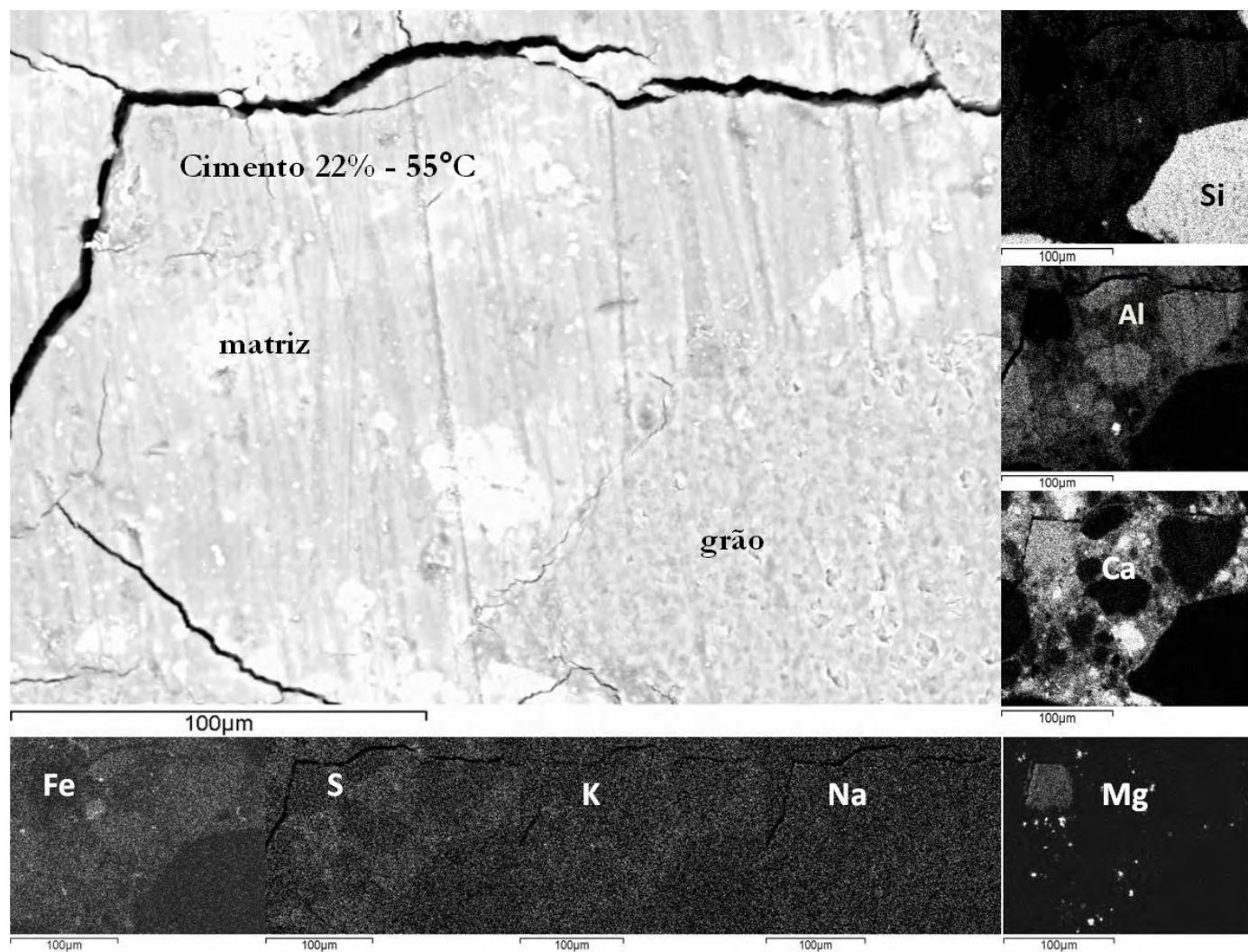


Figura 4.38 - Microscopia da composição formada por solo + cimento (22%). Cura a 55°C

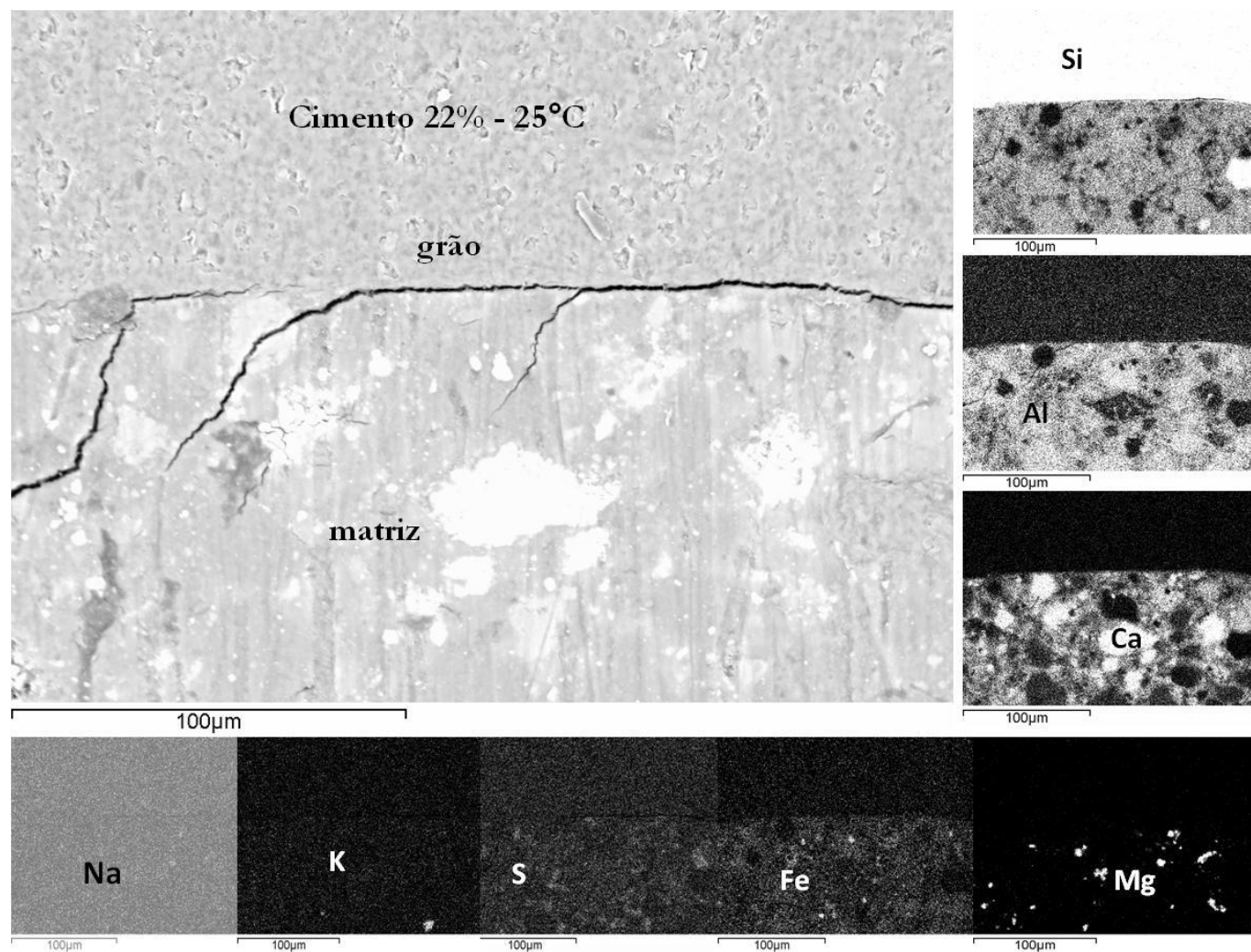


Figura 4.39 - Microscopia da composição formada por solo + cimento (22%). Cura em estufa a 25°C

Na Tab. 4.9, é apresentado o sumário dos aspectos das fissuras na matriz e interface para cada sistema, observado na microscopia eletrônica de varredura. Os constituintes predominantes da matriz e o comportamento das fissuras nas interfaces são mostrados.

Tabela 4.9 – Sumário dos aspectos das fissuras na matriz e interface de cada sistema

SISTEMA	MATRIZ	INTERFACE	FISSURAS
solo + geopolímero (22%), 55°C	Homogênia com predominância da ocorrência dos elementos K, Na, Fe, Al e Si.	Com fissuras em torno do grão	Predominante na interface grão-matriz propagando-se para a matriz.
solo + geopolímero + resíduo líquido de biodiesel (22%), 55°C.	Homogênia com predominância de Al, Si e Na.	Sem fissuras na interface	Leve fissuração e integridade do contato entre grão-matriz
solo + cimento (22%). Cura a 55°C	Heterogenia, caracterizada pela ocorrência de inclusões e grãos na matriz, com predominância de Al, Si, nódulos de Ca e Mg. Há ocorrências de veios de K, S e Fe com depósito uniformes de Na	Poucas fissuras em torno do grão de sílica com concentrações de fases ricas em Ca	Predominante na matriz propagando-se para a interface do grão.
solo + cimento (22%). Cura a 25°C	Homogênia com predominância de Si, Al e nódulos de Ca e Mg	Extensiva fissura ao longo da interface entre o grão e a matriz, com maior concentração da ocorrência de fases ricas em Ca, Al, S e Fe	Predominante na interface grão-matriz propagando-se para a matriz.

Todos os sistemas apresentam microestruturas semelhantes e equivalentes em relação ao comportamento da fissuração. Nos sistemas a base de cimento, na interação grão-matriz, existe a presença de nódulos de fase rica em Ca, enquanto nos sistemas geopoliméricos as matrizes apresentam-se mais homogêneas, com a ocorrência de uma matriz a base de Al e Si.

CONCLUSÕES

As diversas fontes de resíduo líquido de biodiesel são alcalinas e tem potencial para a confecção de compósitos geopoliméricos.

Enquanto as fontes de resíduo líquido de biodiesel provenientes do óleo de algodão, pinhão manso e soja permanecem alcalinas após várias seqüências de lavagem, as de girassol, fritura, sebo bovino+soja+babaçu perdem alcalinidade após dois ciclos de lavagem.

O resíduo de biodiesel de diversas fontes tem o potencial, como ativadores na reação de formação de geopolímeros, para o desenvolvimento de materiais estruturais a base de solos.

As propriedades mecânicas das amostras usando o resíduo líquido do biodiesel são semelhantes àquelas confeccionadas com o cimento Portland.

No tocante a durabilidade os corpos de prova com ativação alcalina obtiveram melhores resultados, evidenciando-se pelos valores encontrados no ensaio de absorção e pela menor perda de massa do que nos corpos de prova com cimento Portland.

Em relação à microestrutura, as matrizes alcalinamente ativadas têm uma interface mais homogenia com o agregado de silício, sendo constituídas por Al (alumínio), Na (sódio), Si (silício), e traços de Fe (ferro), K (potássio), Cl (cloro) e S (enxofre).

A microestrutura dos sistemas a base de cimento Portland, são caracterizadas por uma interface com o agregado de silício, portanto, de quartzo, a matriz é predominantemente constituída de Ca (cálcio), Al (alumínio), nódulos de Mg (magnésio), Fe (ferro) e traços K (potássio) de Cl (cloro) e Mg (magnésio).

Todos os sistemas apresentam microestruturas semelhantes e equivalentes em relação ao comportamento da fissuração. Nos sistemas a base de cimento, na interação grão-matriz, existe a presença de nódulos de fase rica em Ca, enquanto nos sistemas geopoliméricos as matrizes apresentam-se mais homogenias, com a ocorrência de uma matriz a base de Al e Si.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar prosseguimento a este estudo sugere-se:

Estudar outros tipos de composição com solos mais argilosos;

Verificar o efeito da granulometria dos precursores geopoliméricos nas reações de geopolimerização;

Utilizar outras técnicas de construção, como a extrusão, para produzir blocos com solos mais argilosos.

Estudar o desempenho dos blocos alcalinamente ativados em relação ao seu conforto térmico;

Fazer painéis de parede para estabelecer com segurança os limites das paredes estruturais de blocos prensados ativados alcalinamente;

Pesquisar materiais que não necessite de calcinação para substituir a metacaulinita na composição do geopolímero;

Estabelecer um método de ensaio para durabilidade para este tipo de material ativado alcalinamente;

Fazer ensaios de erosão por desgaste da superfície dos blocos utilizando jatos de água;

Estudar materiais como fonte adicional de sílica para a reação de geopolimerização oriundos de resíduos agro-industriais, como a cinza do bagaço de cana de açúcar abundante na região.

Estudar novos aditivos plastificantes para melhorar a trabalhabilidade da mistura do solo com o silicato de sódio, de alta viscosidade, que é um dos constituintes do geopolímero.

Proceder aos ensaios de fluência com a mistura geopolimérica de resíduo de biodiesel e solo.

Estudar o encapsulamento de outros materiais tóxicos provenientes da agro-indústria no geopolímero.

Promover integração de resíduos sólidos e metais alcalinos provenientes de lixões no fabrico de geopolímeros.

Fabricar equipamentos de mistura e compactação que devem ser adaptados para uso com materiais mais viscosos difíceis de homogeneizar.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984- **Ensaio de Granulometria por peneiramento e sedimentação, NBR – 7181.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984 - **Ensaio de limite de liquidez, NBR-6459.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984 - **Ensaio de limite de plasticidade, NBR -7180.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984 - **Determinação da massa específica, NBR – 6508.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984 - **Absorção de água de tijolos não convencionais, NBR– 8492.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1984 -. **Tijolos maciços de solo-cimento, NBR – 8491.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005 -. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – NBR – 1327.**
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Absorção por Capilaridade, NBR 9779.**
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1977 – **Durabilidade por Molhagem e Secagem, Método SC-3.**
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 2008, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 3ª. Edição, Brasília.
- BALAGURU, P.; KURTZ, S.; RUDOLPH, J., 2007, **Geopolymer for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams.** Disponível em: <<http://www.geopolymer.org>>. Acesso em: 01 Setembro 2007.
- BARBOSA, N.P; SOUSA, S.M.T. e MATTONE, R., 1996, **Um Método Construtivo de Casas Populares com Tijolos Prensados de Terra Crua Estabilizados com**

- cimento.** In:Quarto Congresso Brasileiro do Cimento, ABCP, São Paulo, vol. 3, p. 263-276, nov..
- BARBOSA, N.P e MATTONE, R., 1996, **Estudos sobre Tijolos de Terra Crua Desenvolvidas na Universidade Federal da Paraíba e Politécnico di Torino.** Anais do II Congresso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, maio.
- BARBOSA, N.P., 1996, **Construção com Terra Crua do Material à Estrutura.** Monografia para Professor Titular da área de Estruturas do departamento de Tecnologia da Construção Civil da UFPB, João Pessoa, agosto.
- BARBOSA, V. F.F., MACKENZIE, K.J.D., THAUMATURGO C., 2000, **Synthesis and characterization of Materials Base on Inorganic Polymer of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers.** International Journal of Inorganic Materials, vol. 2, pp 309-317.
- BOUTTERIN, C. e DAVIDOVITS, J., 2003, **J. Reticulation Géopolymérique (LTGS) et Matériaux de Construction,** France.
- CANAL LIVRE, 2011, [HTTP://canalivre.dominiotemporario.com/turismo_35html](http://canalivre.dominiotemporario.com/turismo_35html). Acessado 25 de março de 2011.
- CANDEIA, R. A.; ROSENHAIM, R.; CONCEIÇÃO, M.M.; SILVA, M.C.D.; SANTOS, I. M. G., SOUZA, A. B. e CAVALCANTE, E. H. S., 2011. **Acompanhamento da Estabilidade Oxidativa do Biodiesel através da Calorimetria Exploratória Diferencial Pressurizada (PDSC) Durante o Processo de Estocagem.** Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/armazenamento/8.pdf>. Acessado em 12 de março de 2011.
- CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), 1999, **Manual de Construção com Solo-cimento.** 116 p. Camaçari, Bahia.
- CLEANE COSTA, 2011, **Governador Consegue Apoio para Projetos do Setor Energético na PB.** Governo da Paraíba - Notícias. Em 13 de janeiro de 2010.Disponível em: http://www.paraiba.pb.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=34476&Itemid=2. Acesso em 07 de março de 2011.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) resolução 357/2005, 2009. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/praias/res_conama_375_05.pdf . Acessado em 08 de maio de 2009.

- DAVIDOVITS, J., 1991, **Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials**. Journal of Thermal Analysis. In: Institute Géopolymère. v. 37, pp. 1633-1656, Saint-Quentin, France.
- DAVIDOVITS, J., 1994, **Properties of Geopolymeric Cements**, Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, pp. 131-149. Kiev, Ukraine.
- DAVIDOVITS, J., 1999a, **Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology**, proceedings of the Second International Conference Geopolymère'99, pp 9-40.
- DAVIDOVITS, J., 2002, **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications**. In: Geopolymer 2002 Conference, 28 a 29 de outubro, Melbourne, Australia.
- DAVIDOVITS, J., 2008, **Geopolymer: Chemistry e Applications**. Institute Géopolymère. Saint-Quentin, France.
- DAVIDOVITS, J., 2010, **La Brique Géopolymère L.T.G.S.** CORDI-GÉOPOLYMÈRE S.A., Coordination et Développement International des Géopolymères, Saint-Quentin, France. Disponível em: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/ltgs-fr.pdf. Acessado em 25 de março de 2010.
- DE BARROS, S.; GOMES, K. C.; DE SOUZA J. D. R.; BARBOSA, N. P. e TORRES, S. M., 2010, **Geopolymeric Adhesives for Aluminium Joints**. Materials Science Fórum Vol. 643 pp 143-146, Suécia.
- DE BONI, L.A.B.; GOLDANI, E.; MILCHAREK, C.D. e SANTOS, F.A., 2007, **Tratamento Físico-químico da Água Lavagem Proveniente da Purificação do Biodiesel**. Periódico Tchê Química, vol. 4, Porto Alegre, RS.
- DE SOUZA, J. D. R. B., 2009, **Adesivos Alcalinamente Ativados: Ativação Alcalina com Silicato de Sódio e Silicato de Potássio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- DETHIER, J, 1982, **Des Architectures de Terre ou L'avenir d'une Tradition Milénaire**. Centre George Pompidou. Paris, France.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. PALOMO, 2005, **Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash binder: Effect of the Activator**. Eduardo Torroja Institute, Madrid, Spain.

- DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ; PROVIS, J.L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A; VAN DEVENTER, J. S. J., 2007, **Geopolymer Technology the Current: State of the Art**.
- GOMES, K. C., 2008, **Potencial de Ativação Alcalina de Materiais Residuais Aluminosilicosos no Desenvolvimento de Matrizes Cimentícias**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica– Universidade Federal da Paraíba-CT, João Pessoa, Paraíba.
- GOVERNO DA PARAÍBA, 2011, Notícias. Disponível em: http://paraiba.pb.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=3456&Itemid=2. Acesso em 7 de março de 2011.
- GRANGEIRO, R.V.T., 2009, **Caracterização da Água de Lavagem Proveniente da Purificação do Biodiesel**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba/CCEN, João Pessoa, Paraíba.
- JALALI, S. e REIS, R. E., 2011, **Inovações Científicas de Construção em Terra Crua**, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, Portugal. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9104/1/Eires_CN_1_2008%20%28artigo%29.pdf. Acessado em: 28 de março de 2011.
- JORNAL DA PARAÍBA, 2006, **Pinhão Manso é Aposta Econômica na Paraíba para Produção de Biodiesel..** Disponível em: http://www.pinhaomanso.com.br/noticias/jatropha/pinhao_manso_aposta_economica_pb_producao_biodiesel_24_11_06.html. Acesso em: 28 de março de 2009.
- LEUNG, D. Y.; KOO, B. C.; GUO Y., 2011, **Degradation of biodiesel under Different Storage Conditions**. 2006 Jan;97(2):250-6. Epub 2005 Apr 7. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16171682>. Acessado em 21 de março de 2011.
- MARINHO, E. P., 2004, **Desenvolvimento de Pastas Geopoliméricas para Cimentação de Poços de Petróleo**. Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- MARTIRES, R. A. C. Caulim. DNPM.
- MINKE, G., 2005, **Manual de Construcción para Viviendas Antisísmicas de Tierra**. Universidade de Kassel. Alemanha, Terceira edição, abril.

- MINKE, G., 2007, **Building with Earth: 30 Years of Research and Development at the University of Kassel**. In: International Symposium on Earthen Structures Indian Institute of Science, Bangalore, 22-24, agosto.
- MINKE, G., 2008, **Manual de Construcción en Tierra, La Tierra como Material de Construcción y sua Aplicación en La Arquitectura actual**, Editorial Fin de Siglo, novembro, Uruguay.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), 2009, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2008-2017**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Vol. 2, Rio de Janeiro.
- MOTTA, D., 2009, **Produção de Caulim na Paraíba**, http://informatividade10.blogspot.com/2009/11/producao-de-caulim-na-paraiba_26.html?showComment=1259287143986#c3688617227104177995. Acessado em: dezembro de 2009.
- NEVILLE, A. D. **Propriedades do Concreto**. Editora Pini, São Paulo, 1997.
- NOUREDDINI, H., 2001, **System and Process for Producing Biodiesel Fuel with Reduced Viscosity and a Cloud Point below Thirty-two (32) Degrees Fahrenheit**. USPTO Patent Full. Patent n° 6.174.501. p. 4-14.
- PAULA FELIX, 2010, **Paraíba Investe no Biodiesel da Mamona e do Girassol**. Tendências e Mercado - Panorama Econômico do Nordeste, 30 de novembro de 2009. Disponível em: <http://www.tendenciasmercado.com.br/negocios/paraiba-investe-no-biodiesel-da-mamona-e-do-girassol/>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.
- PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, MT; GRANIZO, M.L; POERTAS, F.; VAZQUEZ, T.; GRUTZECK, M.W., 1999, **Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin**. Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, USA
- RIGASSI, Vincent – **Blocs de Terre Comprimée**. Manuel de Production. Vol. 1. CRATerre – EAG, Grenoble, France, 1995.
- ROWLES, M.R., 2004, **The Structural Nature of Aluminosilicate Inorganic Polymers: a Macro to Nano Scale Study**. Tese de Doutorado, Universidade de Tecnologia Curtin, Perth, Australia.
- SCHUCHARDTAU., SERCHELIA R. e VARGAS, R. M., 1997, **Transesterification of Vegetable Oils: a Review**. J. Braz. Chem. Soc., Vol. 9, No. 1, 199-210.
- Silicatos de Alumínio**, 2007. Disponível em: <http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/applychem/alsilicate.html>

- SILVA, F.J., OLIVEIRA M. C., MACHADO M.V.S., DUARTE F. P. e THAUMATURGO C., 2000. **Cimentos Geopoliméricos**. Instituto Militar de Engenharia (IME) Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais DE/4 Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, N. A., 2009, **Um Estudo das Propriedades Térmicas e Microestrutural dos Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Liga Quasicristalina $Al_{62,2}Cu_{25,5}Fe_{12,3}$** . Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba - CT, João Pessoa, Paraíba.
- SILVA, S. P., 2001, **Caulim**. Balanço Mineral Brasileiro, DNPM 5° DS/DNPM, 23p.
- SOUSA, S.M.T., 1993, **Tijolos de Terra Crua Reforçada com Fibras Vegetais**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, 157 p., Campina Grande, Paraíba.
- SOUSA, S. M. T., 1996a, **Construções com Terra: Adobes, Bloco Prensados e Lajes de Terra-Bambú**. Campina Grande: DEC/CCT/UFPB. Relatório Parcial DCR-CNPq, Fevereiro.
- SOUSA, S.M.T., MAGALHÃES, M. S., BARBOSA, N. P., 1996b, **Experimentação de Painéis de Tijolos Prensados de Terra Crua**, In: Segundo Congresso de Engenharia Civil da UFJF, Juiz de Fora, Minas Gerais, maio.
- SOUSA, S. M. T.; BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K.; FREITAS, C. I. S.; REGIS, J. D. S., 2008, **Potencial do Solo de Juazeiro do Norte para Fabricação de Blocos Prensados de Terra Crua**. VII Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, São Luis, Maranhão, Brasil.
- SOUZA SANTOS, P., 1989, **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2ª. Edição, São Paulo: Ed. Edgard Blücher. Vol.1.
- THAUMATURGO, C.; SILVA, F.J.; PEREIRA, D., 1999a, **Argamassa de Poli(Sialato-Siloxo) Reforçada por Microfibras de Wollastonita**. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise, Santos, São Paulo, Brasil.
- THAUMATURGO, C.; THOMAZ, E. C.; SILVA, F. J. e PEREIRA, D., 1999b, **Cimento Polimérico Inorgânico para Aplicações Cívicas**. Congresso da Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo.
- TEIXEIRA PINTO, A. L. S. Y., 2002, **Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina (Geopolimerização)**. In: Revista Construção nº 3 pp. 16-22. Disponível:

http://home.utad.pt/~ibentes/index_files/Novos%20Materiais.pdf . Acessado em: 17 de fevereiro de 2007.

- TEIXEIRA PINTO, A, 2004, **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. Tese de Doutoramento da Universidade do Minho, Portugal,.
- VAN JAARSVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J.; LORENZEN, 1998, L. **Factors Affecting the Immobilization of Metal in Geopolymerized Fly Ash**. Metallurgical and Materials Transactions. 29B, 283.
- VAN JAARSVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J., 1999, **Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash – Based Geopolymers**. Industrial and Engineering Chemistry Research 38, 3932.
- VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C., 2009, **Energia, Meio Ambiente e Economia: O Brasil no Contexto Mundial**. Química Nova, v. 32, no. 3, 757-767.
- WIKIPÉDIA, 2011. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Muralha_da_China
- ZANIER, A.; JACKIE, H. W., 1996, **Thermochimica Acta**, 287: 203.

ANEXO I

As Tabelas: Tab. I.1, Tab. I.2, Tab. I.3 e Tab. I.4, apresentam os resultados de todos os ensaios realizados, mostrando a média de seis determinações com o seu respectivo desvio padrão.

Tabela I.1- Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (25°C), período de cura de 3 dias.

3 DIAS	TEMPERATURA AMBIENTE 25°C								
	GEOPOLÍMERO			GEOPOLÍMERO + RB			CIMENTO		
TEORES	3%	6%	22%	3%	6%	22%	3%	6%	22%
	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv
R.Compressão (MPa)	3,60 - 0,62	4,30 - 0,29	4,60 - 0,75	1,60 - 0,06	2,35 - 0,32	11,0 - 1,21	2,26 - 0,09	6,60 - 0,40	8,33 - 0,74
R.Tração (MPa)	0,18 - 0,01	0,17 - 0,01	0,22 - 0,04	0,09 - 0,01	0,09 - 0,01	0,50 - 0,05	0,08 - 0,01	0,25 - 0,01	0,39 - 0,02
Absorção (%)	13,7 – 0,21	14,2 - 0,23	16,3 – 0,09	13,2 – 0,28	14,4 – 0,17	12,6 – 0,27	17,6 – 0,17	15,5 – 1,01	17,5 – 0,22
Perda Massa (%)	12,70 – 2,22	6,70 – 0,75	2,20 – 0,10	40,0 – 2,22	17,50– 1,11	3,60 – 0,33	24,42 – 3,38	10,3 – 1,14	5,50 – 1,04

M – Média

dv – desvio padrão

RB – Resíduo Líquido de biodiesel

Tabela I.2- Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura ambiente (25°C), período de cura de 28 dias.

28 DIAS	TEMPERATURA AMBIENTE 25°C								
	GEOPOLÍMERO			GEOPOLIMERO + RB			CIMENTO		
TEORES	3%	6%	22%	3%	6%	22%	3%	6%	22%
	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv
R.Compressão (MPa)	2,30 - 0,42	3,50 - 0,46	17,30 - 2,93	1,90 - 0,27	2,70 - 0,36	13,70 - 0,58	3,70 - 0,57	6,60 - 0,40	17,90 - 0,45
R.Tração (MPa)	0,09 - 0,01	0,15 - 0,03	0,25 - 0,03	0,09 - 0,01	0,13 - 0,01	0,50 - 0,03	0,14 - 0,01	0,25 - 0,01	0,78 - 0,03
Absorção (%)	15,5 – 0,27	14,80 – 0,37	13,7 – 0,11	16,6 – 0,50	17,0 – 1,02	11,8 – 0,42	14,8 – 0,86	14,60 – 0,92	12,5 – 0,47

M – Média

dv – desvio padrão

RB – Resíduo Líquido de biodiesel

Tabela I.3.- Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura em estufa (55°C), período de cura de 3 dias.

3 DIAS	TEMPERATURA ESTUFA 55°C								
	GEOPOLÍMERO			GEOPOLIMERO + RB			CIMENTO		
TEORES	3%	6%	22%	3%	6%	22%	3%	6%	22%
	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv
R.Compressão (MPa)	3,40 - 0,59	4,90 - 0,57	6,50 - 0,38	1,20 - 0,35	2,00 - 0,34	18,50 - 0,96	3,80 - 0,34	5,40 - 0,23	13,9 - 0,30
R.Tração (MPa)	0,12 - 0,01	0,18 - 0,90	0,25 - 0,03	0,06 - 0,01	0,11 - 0,03	0,67 - 0,08	0,13 - 0,05	0,24 - 0,01	0,48 - 0,04
Absorção (%)	14,50 – 0,27	14,60 – 0,38	16,00 – 0,22	14,40 – 0,21	16,30– 1,26	12,40– 0,38	13,70 – 0,38	16,90 - 0,14	17,70– 0,10
Perda Massa (%)	16,40 – 1,61	5,50 – 0,72	2,10 – 0,13	23,6 – 1,28	16,90– 1,61	3,40 – 0,27	25,60 – 2,34	9,90 – 2,04	6,90 – 0,30

M – Média

dv – desvio padrão

RB – Resíduo Líquido de biodiesel

Tabela I.4 – Resumo dos resultados de corpos de prova na temperatura em estufa (55°C), período de cura de 28 dias.

28 DIAS	TEMPERATURA ESTUFA 55°C								
	GEOPOLÍMERO			GEOPOLÍMERO + RB			CIMENTO		
TEORES	3%	6%	22%	3%	6%	22%	3%	6%	22%
	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv	M - dv
R.Compressão (MPa)	3,80 - 0,31	6,60 - 0,84	17,30 - 2,93	3,03 - 0,04	3,60 - 0,83	17,50 - 0,71	4,20 - 0,51	5,90 - 0,60	17,2 - 0,71
R.Tração (MPa)	0,12 - 0,01	0,24 - 0,03	0,53 - 0,05	0,08 - 0,00	0,15 - 0,03	0,73 - 0,02	0,17 - 0,00	0,24 - 0,02	0,63 - 0,09
Absorção (%)	14,70 – 0,72	15,00 – 0,54	13,70 – 0,13	14,10 – 0,29	13,70 – 0,14	12,30– 0,26	14,20– 0,28	15,30 -0,54	13,20– 0,23

M – Média

dv – desvio padrão

RB – Resíduo Líquido de biodiesel

ANEXO II



Figura I – Comparação entre uma pelota feita com solo + resíduo líquido de biodiesel de soja e outra usando apenas água potável.

A Fig. I mostra que a pelota feita com resíduo de soja apresentou-se mais performante que a feita usando apenas água potável. Esta se desmanchou completamente quando imersa em água, enquanto a outra permaneceu intacta durante 15 dias. Isso mostra que, o uso do resíduo líquido de biodiesel constitui-se um potencial para a confecção de materiais não convencionais.

ANEXO III



CERTIFICADO DE ANÁLISE

Identificação do Produto:

Produto:	Silicato de Sódio Alcalino PQ-1,65	Número:	008
Cliente:		Nota Fiscal:	
Lote:	100614 T	Quantidade:	
Data Fabricação:	14/06/2010	Validade:	01 ano

Especificações Técnica:

Determinação:	Especificação:	Resultado:
Estado Físico (25°C)	Líquido	Líquido
Coloração	Amarelado	Amarelado
Alcalinidade – Na ₂ O (%)	16,00 – 19,00	17,62
Sílica – SiO ₂ (%)	33,00 – 38,00	35,42
Sólidos Totais (%)	50,00 – 57,00	53,04
Densidade	1,63 – 1,67	1,65

Conclusão:

Produto Conforme

Jaboatão dos Guararapes, 23 de Junho de 2010.

João Carlos Jungmann

Engenheiro Químico

CRQ Nº. 01.302.250 1a Região

Assinatura Eletrônica

Rua Dr. Luiz Regueira, 1829 Prazeres – Jaboatão dos Guararapes/PE

Fone: (0xx81) 2123-1414 Fax: (0xx81) 2123-1422

**CERTIFICADO DE ANÁLISE**Produto: **POTASSIO HIDROXIDO PA**

Fórmula: KOH

Peso Molecular: 56,11

Lote: 38035

Referência: 114120

Nº Análise: 51678

Marca: F.MAIA

Data de

Fabricação

: 29/05/2009

Data de Validade: 29/05/2011

TESTES	ESPECIFICAÇÕES	RESULTADOS
Ensaio (KOH)	Min. 85,0%	88,17%
Calcio (Ca)	Max. 0,005%	0,0005%
Carbonato Potassio (K ₂ CO ₃)	Max. 2,0%	0,49%
Cloreto (Cl)	Max. 0,01%	<0,01%
Comp. nitrogenio (N)	Max. 0,001%	<0,001%
Ferro (Fe)	Max. 0,001%	<0,001%
Fosfato (PO ₄)	Max. 0,0005%	<0,0005%
Magnésio (Mg)	Max. 0,002%	0,0005%
Metais pesados (Pb)	Max. 0,001%	<0,001%
Niquel (Ni)	Max. 0,001%	0,0004%
Sódio (Na)	Max. 0,5%	0,3%
Sulfato (SO ₄)	Max. 0,003%	<0,003%

Metodologia utilizada:

Nº da revisão:

Data da revisão:

Observações:

Chefe de Laboratorio

(X) Aprovado como: Data: 05/06/2009

Miguel Luis Ribeiro - CRQ 4a - 04416706

Fmaia Indústria e Comércio Ltda - Rua Pedro Rodrigues, 19 - Rio Cotia - Cotia - SP -
CEP: 06715770 Telefone: (11) 3598-6531 - Fax: (11) 3598-6510 - www.fmaia.com.br

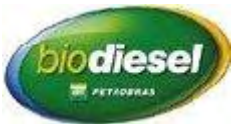
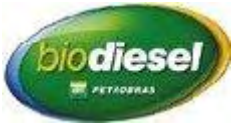
ANEXO IV

A Região Nordeste conta hoje com um total de 37 usinas de biodiesel, entre autorizadas pela ANP (06) e em Construção/Planejamento/Piloto (31). Na Tab. I.5 são mostradas as usinas de biodiesel na região Nordeste.

Tabela I.5 – Usinas localizadas na região Nordeste (http://usinasbr.blogspot.com/2008/04/mapa-do-biodiesel-no-brasil-regio_4810.html)

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
UFAL	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP	10 litros/dia (3 mil litros/ano).			Maceió/Alagoas
Grupo Brastec Biodiesel	Usina em planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP	10 mil litros/dia (3 milhões litros/ano).	Algodão, girassol e soja.		Murici/AL
	Usina em construção - Ainda sem processo de autorização na ANP		Mamona e girassol.		Jeremoabo/BA
Bioclean	Usina em Construção - Ainda sem processo de autorização na ANP	330 mil litros/dia (100 milhões litros/ano).	Algodão, girassol e soja.		Luís Eduardo Magalhães/BA
	Usina em planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP	134 mil litros/dia (40 milhões de litros/ano).	Dendê, mamona, pinhão manso, e gordura animal.	Etílica	Campo Largo/BA

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
	Usina em planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP			Etílica	Salvador/BA
	Usina em planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP	200 mil litros/dia (60 milhões de litros/ano).		Etílica	Una/BA
	Usina Construída e Produzindo - Autorizada pela ANP	360 mil litros/dia (108 milhões litros/ano). Podendo ser 108 milhões litros/ano pela rota metílica, ou 75,6 milhões litros/ano, pela rota etílica. Pedido de aumento de capacidade para: 440 mil litros/dia (132 milhões litros/ano).		Metílica ou Etílica	Iraquara/BA
Candelle	Usina em Planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP	Pendente		Etílica	Barreiras/BA
	Usina Construída - Autorizada pela ANP	335 mil litros/dia (100,5 milhões litros/ano).		Metílica	Simão Filho/BA

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
 SOFIPROTEOL	Usina Em construção - Ainda sem processo de autorização na ANP	43,3 mil litros /dia (13 milhões litros/ano).		Etílica	Luís Eduardo Magalhães/BA
Crow West Company	Usina em Planejamento - Ainda sem processo de autorização na ANP	76.000 t/ano de óleo.	Algodão, soja e sebo animal.		Luis Eduardo Magalhães/BA
	Usina em planejamento - Em processo de Autorização na ANP	157 mil litros/dia (47,1 milhões litros/ano).	Algodão, dendê, soja, amendoim, mamona, entre outras oleaginosas e gordura animal.		Candeias/BA
 FINANCO AGRICOLA S.A.	Usina em construção - Em processo de autorização na ANP	Capacidade de produção: 366 mil litros/dia (109,8 milhões litros/ano).	Algodão, soja e girassol	Etílica	Luis Eduardo Magalhães/BA
 NUTEC	Usina Piloto - Autorizada pela ANP	2,4 mil litros/dia (720 mil litros/ano).		Metílica	Fortaleza/CE
	Usina em planejamento - Em processo de Autorização na ANP	157 mil litros/dia (47,1 milhões litros/ano).	Algodão, amendoim dendê, mamona, soja, entre outras oleaginosas		Quixadá/CE

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
	Usina Construída - Autorizada pela ANP	Capacidade autorizada: 360 mil litros/dia (108 milhões de litros por ano). Capacidade instalada: 396 mil litros/dia (118,8 milhões de litros por ano). Pedido de aumento de produção para 500 mil litros/dia (150 milhões de litros por ano).		Metílica ou Etílica	Crateús/CE
 Usina Piloto 1	Usina Piloto construída em produção - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 2.880 litros/dia (864 mil litros/ano).	Mamona	Metílica	Tauá/CE
 Usina Piloto de Quixeramobim	Usina Piloto construída em produção - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 360 litros/dia (118 mil litros/ano).	Mamona	Metílica	Quixeramobim/CE
 Usina Piloto 2	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 2.866 litros/dia (860 mil litros/ano).		Metílica	Piquet Carneiro/CE

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
 UFMA	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de Produção: 400 l/dia (12 mil litros/ano).	Óleo de babaçu		São Luís/MA
	Usina em construção - Em processo de Autorização na ANP.	Capacidade de produção: 33 milhões de litros/ano .A meta é dobrar no final de 2008.		Etílica	Porto Franco/MA
	Usina Construída - Autorizada pela ANP	Capacidade autorizada: 360 mil litros/dia (108 milhões de litros por ano). Podendo ser 108milhões litros/ano, pela rota metílica, ou 75,6 milhões/ano, pela rota etílica. Pedido de aumento de capacidade para: 440 mil litro/dia (132 milhões de litros por ano).		Metílica ou Etílica	Itaquí/MA
 Bioteo(biotecnologia e agronegócios)	Usina em construção - Ainda sem processo de autorização na ANP	134 mil litros/dia (40 milhões de litros/ano).		Etílica	Campina Grande/PB

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 200 litro/dia (60 mil litros/ano).	Óleos e gorduras residuais, algodão, pinhão manso, mamona e gordura animal		Recife/PE
	Usina em Construção - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 260 mil litros/dia (80 milhões litros/ano)	Mamona, soja e pinhão-manso.		Petrolina/PE
	Usina Piloto em Construção - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de Produção: 6 mil litros/dia (1,8 milhão de litros/ano).	Mamona, caroço de algodão, oiticica, pinhão manso e além de outras oleaginosas adaptadas ao clima da região		Serra Talhada/PE
	Usina Piloto construída - Ainda sem processo de autorização junto à ANP	Capacidade de Produção: 10 mil litros/dia (3 milhões litros/ano).	Mamona		Pesqueira/PE

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
	Usina Piloto em Construção - Em processo de autorização na ANP.	Capacidade de Produção: 4 mil litros/dia (600 mil litros/ano).	Mamona, oiticica, caroço de algodão, pinhão manso além de outras oleaginosas adaptadas ao clima da região.		<u>Caetés/PE</u>
		Capacidade de Produção: 250 mil litros/dia (75 milhões litros/ano).	Mamona, girassol, algodão e pinhão manso.		<u>Pesqueira/PE</u>
	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de Produção: 4,8 mil litros/dia (1,44 milhões de litros/ano).	Óleos de babaçu, tucum, macaúba e soja.	Metílica e etílica	<u>Teresina/PI</u>
	Usina construída e em Produção - Autorizada pela ANP	Capacidade de produção autorizada: 135 mil litros/dia (40,5 milhões litros/ano) Pedido de ampliação para 270 mil litros/dia (81 milhões litros/ano) e para uso da rota etílica.	Mamona, algodão, soja, pinhão manso e girassol.	Metílica	<u>Floriano/PI</u>

Empresa	Situação	Capacidade de Produção	Matéria-Prima	Rota Tecnológica	Cidade/Estado
	Usina Piloto - Em processo de Autorização na ANP.	Capacidade de produção: 20 mil litros/dia (6 milhões litros/ano).	Mamona e soja	Metílica e etílica	Guamaré 1/RN
	Usina Piloto - Ainda sem processo de autorização na ANP.	Capacidade de produção: 5 mil litros/dia (1,5 milhão de litros/ano).	Produz biodiesel diretamente dos grãos das oleaginosas	Etílica com tecnologia desenvolvida pela Petrobras	<u>Guamaré 2/RN</u>
<u>AGROBIO</u>	Usina em planejamento - Em processo de Autorização na ANP.	Pendente	Pendente	Pendente	Estância/SE

ANP (Agência Nacional do Petróleo)

FONTE: http://usinasbr.blogspot.com/2008/04/mapa-do-biodiesel-no-brasil-regio_4810.html

Na Fig. II encontra-se a localização geográfica das usinas de produção de biodiesel, das que já estão autorizadas pela ANP, das que se encontram em processo de autorização pela Agência e das empresas distribuidoras de combustíveis em cada região do país.

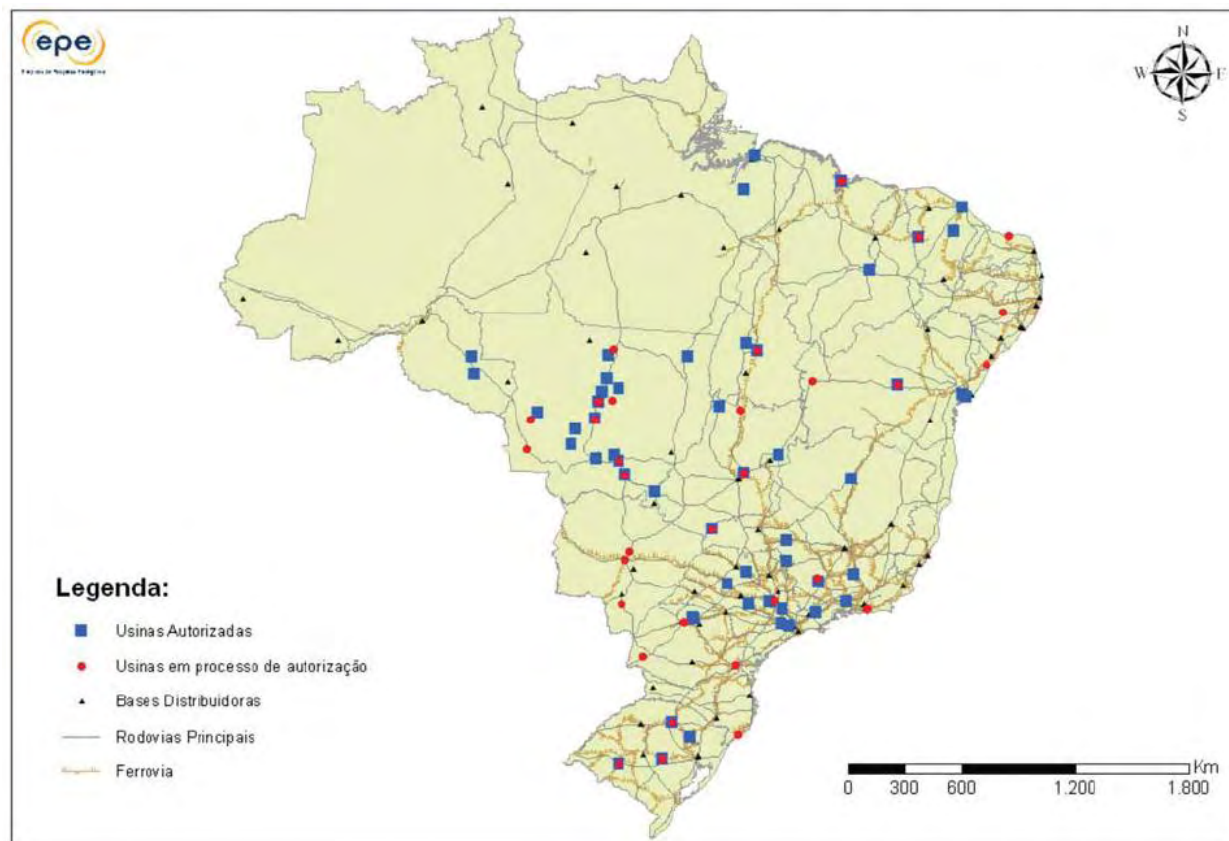


Figura II - Usinas de Biodiesel Autorizadas e em Processo de Autorização e Malha Rodoviária e Ferroviária Atual. Fonte: Elaboração EPE a partir de ANP.