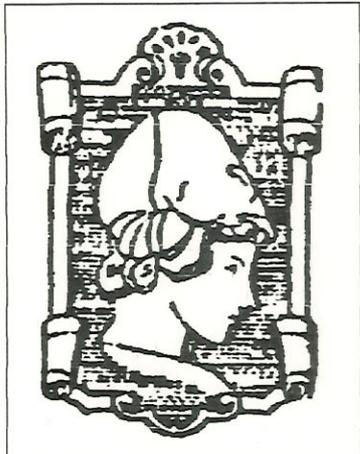


USP UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE
SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE
ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ARQUITETURA

ÁREA DE TECNOLOGIA DO
AMBIENTE CONSTRUÍDO



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ARGAMASSAS POLIMÉRICAS
CELULARES DE POLIURETANA DE
ORIGEM VEGETAL**

AUTOR:

FLÁVIO CESAR MIRABELLI MARCHESONI

ORIENTADOR:

PROF. DR. OSNY PELLEGRINO FERREIRA



SÃO CARLOS, ABRIL DE 2000.

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 12/6/2000

Ass.: *[Signature]*

*Ricardo
(41) 264-5369 casa*

Class. TESE-EESC

Cutt. 3328

Tombo 0117/00

31100008624

1084164

ESCOLA DE ENGENHARIA DE
SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE
ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ARQUITETURA

ÁREA DE TECNOLOGIA DO
AMBIENTE CONSTRUÍDO



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
ARGAMASSAS POLIMÉRICAS
CELULARES DE POLIURETANA DE
ORIGEM VEGETAL

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da
Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

M316a Marchesoni, Flávio Cesar Mirabelli
Argamassas poliméricas celulares de poliuretana de
origem vegetal / Flávio Cesar Mirabelli Marchesoni. --
São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Tecnologia do Ambiente Construído.
Orientador: Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira.

1. Argamassa. 2. Celular. 3. Poliuretana.
I. Título.

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

Data de entrada no Serviço de Informação: 10/10/2000

Ass.: _____

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Arquiteto **FLÁVIO CESAR MIRABELLI MARCHESONI**

Dissertação defendida e aprovada em 07.04.2000
pela Comissão Julgadora:



Prof. Doutor **OSNY PELLEGRINO FERREIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **LAÉRCIO FERREIRA E SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **SALVADOR CLARO NETO**
(Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Assoc. **CARLOS ALBERTO FERREIRA MARTINS**
Coordenador da Área de Tecnologia do Ambiente Construído



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira, pela dedicação e pela disponibilidade que, sem ela, não seria possível a realização dessa dissertação.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil e do Laboratório de Análises Químicas e Tecnologia dos Polímeros pela pronta e inestimável ajuda em tudo que necessitei.

Aos colegas e professores da pós-graduação do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos pela atenção e orientação.

Ao grande amigo Paulo Ceneviva pelas inúmeras vezes que me socorreu com as imagens.

Ao Marcelo, secretário da pós do SAP, pela dedicação e pela ajuda irrestrita.

Ao Vicente, pela ajuda no preparo dos corpos de prova e dos ensaios laboratoriais.

Ao Isac, pela ajuda em tudo que necessitei.

Ao meu irmão Marcelo, pelo apoio com as figuras e gráficos e por ter mantido meu computador sempre funcionando, mesmo que isso significasse perder muitas horas de sono.

Em particular, os docentes do Departamento de Estatística da Universidade Federal de São Carlos, Profs. Vera Lúcia Damasceno Tomazella e José Carlos Fogo e à minha esposa, Elisa, pela orientação na abordagem estatística dos dados desse trabalho.

Ao Prof. Deusdedit Menezes pela sua revisão.

Finalmente, ao meu sobrinho Paulo, no auxílio do último esforço de tornar este trabalho uma realidade.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Elisa, aos meus filhos, Mariana e Pedro, e à minha família, que muito contribuíram para minha formação e para o desenvolvimento desse trabalho.

Dedico também a todos que porventura a utilizam para suas próprias pesquisas e que este possa servir de apoio para o aprimoramento dos materiais, sistemas e componentes da Construção Civil.

SUMÁRIO:

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA	1
1.2	IMPORTÂNCIA DO TEMA PROPOSTO	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	NOÇÕES GERAIS SOBRE POLÍMEROS.....	5
2.2	POLÍMEROS COMO MODIFICADORES OU COMO AGLOMERANTES EM ARGAMASSAS E CONCRETOS	8
2.2.1	Concretos Impregnados com Polímeros	10
2.2.2	Concreto Modificado (Concreto de Cimento e Polímero).....	12
2.2.3	Concreto de Resina	16
2.3	O USO DE NOVOS MATERIAIS E NOVAS TECNOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	19
2.4	MATERIAIS PROVENIENTES DE RECURSOS RENOVÁVEIS	20
2.5	BIOPOLÍMEROS.....	23
2.6	A MAMONA (<i>RICINUS COMMUNIS L.</i>)	27
2.7	O ÓLEO DE MAMONA E SEUS DERIVADOS.....	29
2.7.1.1	Poliuretanas de Petróleo	35
2.7.1.2	Poliuretanas vegetais.....	36
2.7.2	Poliuretanas de alta densidade	40
2.7.3	Poliuretanas de baixa densidade.....	41
3.	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	43
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS ENVOLVIDOS:.....	43
3.1.1	Poliuretana de baixa densidade de óleo vegetal	44

3.2	ARGAMASSAS DE POLIURETANA DE MAMONA	45
3.2.1	Notações dos traços constados no trabalho.....	46
3.2.2	Cargas minerais.....	47
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.3.1	Os calcários dolomíticos	55
3.4	MÉTODOS DESENVOLVIDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES.....	58
3.4.1	Método para preparação das amostras	66
3.4.2	Dosagens dos componentes	67
3.4.3	Preparo dos moldes.....	68
3.4.4	Mistura	69
3.4.4.1	Métodos mecânicos de dosagem, mistura e lançamento.....	72
3.4.5	Tipos de traços pesquisados	74
3.4.5.1	Traços com variação na relação polioli/prepolímero	76
3.4.5.2	Traços com variação na densidade	76
3.4.5.3	Traços com variação na relação carga-polímero	78
3.5	APARELHOS DE MEDIÇÃO	78
3.6	DESCONTINUIDADES DA ARGAMASSA ENCONTRADAS NOS CORPOS DE PROVA.....	78
3.7	ABORDAGEM ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS.....	80
3.7.1	Desvio relativo máximo.....	81
3.7.2	Análise crítica dos resultados obtidos.....	82
3.7.3	Limite inferior e limite superior de confiança.....	83
4.	ANÁLISES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS.....	86
4.1	COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS	86

4.2	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS LEVANTADAS	86
4.2.1	Resistência a compressão.....	87
4.2.1.1	Varição da relação polioli/prepolímero	87
4.2.1.2	Varição na densidade das argamassas	92
4.2.1.3	Varição no teor de polímero no compósito.....	95
4.2.2	Resistência a tração por compressão diametral.....	98
4.2.3	Módulo de elasticidade	99
4.2.4	Comentários sobre os resultados mecânicos obtidos.....	102
4.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS LEVANTADAS	102
4.3.1	Retração às primeiras idades (até 30 dias)	103
4.3.2	Absorção de água	108
4.3.3	Comentários sobre os resultados físicos obtidos.....	112
4.4	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	112
5.	COMENTÁRIOS FINAIS	113
5.1	PROBLEMAS ENFRENTADOS NA REALIZAÇÃO DESSE ESTUDO	113
5.2	POTENCIALIDADES DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES	113
5.2.1	Viabilidade dos compósitos poliméricos para a obtenção de peças pré-moldadas ou moldadas <i>in situ</i>	114
5.2.2	Comportamento com relação a transmissão de calor.....	117
5.3	COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS	120
5.4	CONCLUSÕES.....	123
5.4.1	Resultados.....	123
6.	BIBLIOGRAFIA	125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Comparação do desempenho das características químicas das argamassas de cimento ensaiadas.....	37
Tabela 2	Resistência a compressão das argamassas após ataque químico.....	38
Tabela 3	Comparação do desempenho das características físicas das argamassas de cimento ensaiadas.....	40
Tabela 4	Algumas propriedades físico-químicas de espumas de poliuretanas de mamona para uso em isolamento térmico.....	45
Tabela 5	Exemplo da notação dos traços pesquisados.....	47
Tabela 6	Diferentes cargas e seus desempenhos.....	54
Tabela 7	Resultados dos primeiros ensaios exploratórios.....	60
Tabela 8	Desempenhos comparativos das argamassas com 200,0g de calcário dolomítico e 20% de polímero.....	63
Tabela 9	Resultados dos desempenhos com diferentes cargas.....	64
	Relação polioli/prepolímero de 1:2.....	64
Tabela 10	Quantidades de carga possíveis de serem moldadas (REC-02).....	78
Tabela 11	Desempenho a compressão das argamassas poliméricas c/ variação na relação entre polioli e prepolímero.....	88
Tabela 12	Desempenhos comparativos das argamassas de relação de polímero de 1:2.....	90
Tabela 13	Desempenhos comparativos das argamassas de relação de polímero de 1:1,5.....	91
Tabela 14	Desempenhos comparativos das argamassas de relação de polímero de 1:1.....	91
Tabela 15	Desempenho a compressão das argamassas poliméricas c/ variação na massa específica aparente.....	93
Tabela 16	Desempenho a compressão das argamassas poliméricas c/ variação na massa específica aparente - formulação REC-02.....	94

Tabela 17	Desempenho a compressão c/ variação no teor de polímero nas argamassas.....	96
Tabela 18	Desempenhos comparativos das argamassas com 200,0g de calcário dolomítico e taxas de polímero diferenciadas	97
Tabela 19	Desempenho a tração por compressão diametral dos corpos de prova de argamassas poliméricas celulares	98
Tabela 20	Módulo de elasticidade das argamassas de relação de polímero diferentes	100
Tabela 21	Módulo de elasticidade das argamassas de densidades diferentes	101
Tabela 22	Retração das argamassas poliméricas celulares com relação de polímero de 1:2.....	105
Tabela 23	Valores de retração de alguns materiais da Construção civil.....	108
Tabela 24	Absorção de água das argamassas poliméricas celulares.....	109
Tabela 25	Teor de umidade das argamassas.....	110
Tabela 26	Absorção de água das argamassas poliméricas celulares com variação na densidade e nas porcentagens de polímeros (REC-02)	111
Tabela 27	Comparação das resistências a compressão das argamassas celulares e concretos celulares convencionais.....	116

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Avaliação da resistência a compressão das argamassas submetidas ao ataque químico.....	39
Gráfico 2	TGA do calcário dolomítico	55
Gráfico 3	Comparação entre as primeiras argamassas experimentais.....	61
Gráfico 4	Comparação entre as argamassas com fibra e sem fibra.....	61
Gráfico 5	Comparação entre as argamassas com relações polioli/prepolímero diferentes	62
Gráfico 6	Comparação entre cargas diferentes.....	65
Gráfico 7	Resultados de resistência a compressão.....	85
Gráfico 8	Desempenho a compressão com relações dos componentes do polímero e idades diferentes.....	89
Gráfico 9	Desempenho a compressão com relações dos componentes do polímero e idades diferentes.....	92
Gráfico 10	Desempenho a compressão das argamassas poliméricas de densidades diferentes	93
Gráfico 11	Desempenho a compressão das argamassas poliméricas de densidades diferentes (REC-02)	95
Gráfico 12	Desempenho com variação no teor de polímero.....	97
Gráfico 13	Desempenho da resistência a tração da argamassa	99
Gráfico 14	Desempenho do módulo de elasticidade das argamassas padrão com relações de polímero diferentes.....	101
Gráfico 15	Desempenho do módulo de elasticidade das argamassas de densidades diferentes	102
Gráfico 16	Curvas de retração das argamassas de densidades e porcentagens de polímero diferentes	106
Gráfico 17	Curvas de retração das argamassas de densidades e porcentagens de polímero diferentes	106

Gráfico 18 Perda de massa das argamassas durante o ensaio de retração	107
Gráfico 19 Absorção média e umidade média das amostras de argamassa polimérica celular	109
Gráfico 20 Absorção média e umidade média de argamassas com densidades e porcentagens de polímero diferentes.....	111
Gráfico 20 Desempenho dos compósitos celulares.....	116
Gráfico 21 Desempenho de coberturas tratadas com resina poliuretana.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de cadeias carbônicas dos polímeros	6
Figura 2	Modelo idealizado do processo de formação do filme de polímero na partícula de cimento hidratado	14
Figura 3	Modelo idealizado de formação do concreto de cimento e polímero	15
Figura 4	A mamona (<i>Ricinus communis L.</i>) com suas folhas e sementes	28
Figura 5	Esquema do processo de obtenção do óleo da mamona	29
Figura 6	Reação de expansão da poliuretana	32
Figura 7	Aspecto dos corpos de prova após ensaio com agentes agressivos.....	39
Figura 8	Preparação dos moldes para argamassas poliméricas celulares.....	69
Figura 9	Seqüência de adição dos componentes das argamassas	71
Figura 10	Mixer estático para bicomponente	73
Figura 11	Falhas decorrentes da falta de massa fresca suficiente para o preenchimento dos moldes	75
Figura 12	Descontinuidades da argamassa presente nos corpos de prova.....	80
Figura 13	Configuração utilizada para a medição da retração linear das argamassas poliméricas celulares.....	103
Figura 14	Dupla de corpos de prova 50x100mm preparados para ensaio de retração linear	104
Figura 15	Ensaio de desempenho de coberturas	118
Figura 16	Detalhe da telha com espuma na face inferior.....	118

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 Reações da resina PU de alta e baixa densidade	24
Equação 2 O óleo de mamona mostrando seus principais pontos de modificações estruturais.	31
Equação 3 Reação da poliuretana de origem vegetal.....	32
Equação 4 Reações da Cal.....	49
Equação 5 Cálculo do desvio relativo máximo	82
Equação 6 Limite inferior de confiança para a média populacional	84
Equação 7 Desvio padrão da população	84
Equação 8 Limite superior de confiança para a média populacional	84

GLOSSÁRIO DE SIGLAS, ABREVIações E TERMOS TÉCNICOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Aglomerante	Elemento que fornece liga aos compósitos.
ACI	American Concrete Institute.
Área superficial	É o grau de espalhamento que uma determinada quantidade de material possui. Quanto mais fino for um material tanto maior será a área ocupada por ele. Essa medida tem como unidade cm^2/g .
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Biopolímero	Polímeros derivados de matérias primas vegetais.
Blenda	Designa um tipo de mistura de componentes, ou segmentos, que irão compor uma resina. Este é um termo muito empregado em tecnologia de resinas poliuretanas.
Carbonatação	Reação de uma determinada substância com o gás carbônico (CO_2)
Carga	Material geralmente inerte, orgânico ou mineral, que se utiliza nas argamassas aglomerado. A soma da carga com o aglomerante (e aditivos em alguns casos) forma a argamassa.
CEI	Comunidade dos Estados Independentes, grupo de países pertencentes à antiga União Soviética.
CFC	Cloro-Flúor-Carbono, gás utilizado em sistemas de refrigeração e como gerador de espuma em algumas poliuretanas minerais. Comercialmente conhecido por <i>freon</i> .
Compósitos	Materiais heterogêneos formados por elementos distintos. Em Construção Civil é a forma que normalmente se refere às argamassas e concretos.
CP	Sigla para designar <i>corpo de prova</i> , podendo ser apresentada no plural como CPs.
Cura	Designa o processo de polimerização ou policondensação de um polímero a partir de monômero ou espécies co- e pré-reativas, formando uma macromolécula com características previamente definidas.
Densidade	Neste trabalho, designou-se por densidade a massa específica aparente dos compósitos poliméricos celulares.
Elastômeros	Espécie sólida de resina poliuretana que pode ser macia, resiliente ou rígida, podendo ser termoplásticas ou termofixas, usualmente obtidas a partir de misturas bicomponentes de líquidos reativos.
Estequiométrico	Reação química onde os elementos reagem totalmente entre si.
Filler	Materiais pulverulentos, de diâmetro igual ou menor a 0,075mm utilizados em Construção Civil como agregados muito finos para preencher os espaços dos agregados maiores que ele podendo, entretanto, possuir qualidades pozolânicas.

FPIC	Sigla adotada pela ACI para o <i>Concreto Totalmente Impregnado com Polímero</i> .
GQATP	Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros. Grupo de pesquisadores que desenvolvem e estudam o comportamento das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona.
Hidrólise	Reação da água sobre um composto com fixação de íons de hidrogênio ou de radicais hidroxila.
LQATP	Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros, do Departamento de Química e Física dos Materiais do Instituto de Química de São Carlos (DQFM/IQSC-USP).
Matriz	Material base de um compósito, o seu aglomerante ou o que confere estabilidade mecânica aos demais.
-NCO	Radical isocianato, que faz parte de moléculas e compostos orgânicos mono, di, tri e polifuncionais. Em tecnologia PU, são os grupos reativos em relação a grupos -OH
-OH	Radical hidroxila, presente nos polióis.
Polimerização	Processo em que os componentes que irão formar um futuro polímero reagem entre si.
Polímeros	Conhecidos vulgarmente por plásticos são materiais formados por moléculas orgânicas compostas pela repetição longa e ordenada de unidades constituídas de poucos átomos.
Polióis	Substâncias poli-hidroxiladas, funcionalmente ativas, com funcionalidade 1, 2, 3, etc., em dependência do número de moles de radicais -OH por molécula. São éteres ou ésteres com hidroxila n-terminal, cuja estrutura faz parte de resinas poliuretanas, constituindo o segmento flexível.
Poliuretana(o)	Resina sintética, produto da reação de substâncias poli-hidroxiladas com isocianatos ou isocianatos (mono, di, tri ou poliisocianatos) orgânicos puros ou em prepolímeros.
<i>Potlife</i>	Propriedade reológica que caracteriza o tempo máximo de mistura bicomponente, ou o tempo de trabalho de uma resina antes de ser colocada no molde e iniciar sua polimerização.
Pozolânica	Propriedade dos aglomerantes hidráulicos de se hidratarem e posteriormente adquirem uma certa resistência mecânica ao reagirem quimicamente com água. Ex: cimento Portland, sílica ativa.
PPCC	Sigla adotada pela ACI para o <i>Concreto de Cimento e Polímero</i> .
PPIC	Sigla adotada pela ACI para o <i>Concreto Parcialmente Impregnado com Polímero</i> .
Prepolímero	Substância preparada pela reação de isocianatos orgânicos com polióis, apresentando um teor predeterminado (estequiométrico) de radicais -NCO livres. O prepolímero faz parte da estrutura de resinas poliuretanas, caracterizando o segmento rígido.
PU	Sigla internacionalmente empregada para designar as resinas

	poliuretanas minerais ou orgânicas; neste texto aparece também no seu plural como PUs.
REC	Sigla empregada para designar a família de resinas poliuretanas de espuma derivada do óleo da mamona (Resina de Espuma para Construção) utilizada neste estudo.
Reologia	Estudo de um conjunto de parâmetros ou propriedades que variam com o tempo.
Resina	Substância que irá compor um polímero, depois de passar por um processo de cura ou polimerização. O termo pode também ser empregado para designar um grupo de polímeros. Ex: resinas epóxi, resinas furânicas.
TGA	Sigla internacionalmente empregada para Análise termogravimétrica, do inglês <i>Thermo-Gravimetric Analysis</i> .
Trabalhabilidade	Propriedade que uma argamassa, ainda no seu estado fresco, tem em ser moldada. É normalmente medida sob dois aspectos: O <i>tempo de trabalhabilidade</i> é dado pelo tempo possível de se trabalhar com uma argamassa antes que essa comece a endurecer. Já simplesmente <i>trabalhabilidade</i> mede o quão plástica (ou moldável) é uma argamassa; argamassas mais trabalháveis são mais fluidas e normalmente requerem pouco adensamento para preencher corretamente um molde.

RESUMO

Argamassas Poliméricas Celulares são materiais compósitos obtidos da mistura de uma carga qualquer (mineral ou não) com aglomerantes poliméricos que se expandem ao se polimerizarem, formando compostos leves.

Poliuretanas de Origem Vegetal são polímeros provenientes não do petróleo ou de seus subprodutos, mas da exploração vegetal e, em particular neste trabalho, provenientes do óleo de mamona (*Ricinus communis L.*).

O aprimoramento dos materiais compósitos na construção civil tem-se desenvolvido rapidamente nos últimos anos com a introdução dos materiais poliméricos, tanto na forma de polímeros de alta, quanto dos de baixa densidade.

Este trabalho se propõe avaliar a viabilidade de novas aplicações das espumas poliuretanas de óleos vegetais como aglomerantes em argamassas e concretos celulares poliméricos, visando à sua utilização em peças pré-moldadas ou na forma de argamassa projetada, formando elementos leves, de alta resistência mecânica e química, oriundo de recursos renováveis e que impõem um menor custo energético e ambiental.

ABSTRACT

Cellular Polymeric Mortars are composite materials obtained from the mixture of any load (mineral or not) and polymeric agglomerants that expand, if polymerized, forming a light composite Polyurethanes of vegetal origin are not polymers derived from petrol or its by-products, but from vegetal exploration and, in particular from polyurethane from Castor oil (*Ricinus communis L.*), which is the subject of the present paper.

The improvement of composite materials in civil construction has occurred rapidly over the last years with the introduction of polymeric materials in the form of both high-and low-density materials.

This study aims to develop new applications of polyurethane foams from vegetal oils as agglomerants in cellular polymeric mortars and concretes to be used in premoulded pieces and in the form of projected mortar, forming light elements of high mechanical and chemical resistance. Such polymer is originated from renovable resources and makes possible a lower energetic and environmental cost.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho contempla o estudo das principais propriedades mecânicas das argamassas poliméricas de baixa densidade, denominadas por *Argamassas Poliméricas Celulares*. São compósitos formados pela mistura de cargas inertes aglomeradas por resinas poliuretanas de baixa densidade (resinas que geram espuma durante sua polimerização). Neste estudo, analisaram-se particularmente as poliuretanas derivadas do óleo de mamona.

Por ser um aglomerante novo, inédito em Construção Civil, este trabalho se propõe desenvolver um primeiro passo na compreensão do comportamento das características desses compósitos, bem como de alguns de seus processos de obtenção e, com isso, poder indicar possibilidades de uso para essas argamassas.

Dado o imenso volume de ensaios que uma visão completa envolveria, muitas das propriedades físicas e químicas do compósito, bem como algumas das suas propriedades mecânicas não foram contempladas nesse estudo, sobretudo devido ao tempo, volume e especificidades desses ensaios.

Assim, o objetivo principal é promover uma primeira visão geral, sob âmbito das suas principais características mecânicas, de como esse compósito se comportaria sob condições de uso como material de construção.

Este estudo reúne ainda algumas características levantadas por outros pesquisadores e que foram incorporadas neste trabalho para se promover uma visão mais ampla do comportamento e qualidades desse material.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Segundo vários autores, o segmento da Construção Civil, de maneira geral, tem sido nos últimos tempos um setor contemplado com significativas contribuições de outras áreas do conhecimento. Certos produtos, como por exemplo a sílica de fumo ou sílica ativa, tida como rejeito industrial, altamente nociva quando eliminada na atmosfera, apresenta propriedades pozolânicas extremamente relevantes e agora vem sendo empregada como um material praticamente imprescindível para a obtenção dos concretos de elevado desempenho.

Novos materiais, derivados da indústria química e petroquímica também têm contribuído para significativos avanços tecnológicos. O emprego de aditivos, para as mais variadas

finalidades, vem sendo utilizados em concretos e argamassas, com grandes benefícios técnicos na qualidade e na execução das obras.

Vale a pena notar que alguns desses avanços aconteceram quase de forma acidental, não se verificando a real intenção na busca de alternativas inovadoras no âmbito da construção.

Cabe incentivar para que a pesquisa no setor da construção seja direcionada à busca sistemática de soluções, por vezes originais e até inovadoras, e que não provenham de simples decorrências de uma investigação desenvolvida em outra área do conhecimento.

O encaminhamento de pesquisas com vistas ao desenvolvimento de novos materiais para a Construção Civil sofre a influência de inúmeros fatores sociais, econômicos e até culturais e políticos. Assim, cada país, ou mesmo região; apresenta peculiaridades que variam em função das disponibilidades de seus recursos humanos, materiais e energéticos.

Vários parâmetros devem ser considerados para uma correta escolha dos materiais, das técnicas e dos métodos construtivos. Alguns estudiosos, como CHAVES(1985), descrevem as prioridades em matéria de investigação no campo dos materiais de construção, sob os seguintes tópicos:

- a - Utilização de materiais, subprodutos, e mão-de-obra locais ou regionais; conservação de recursos naturais e energia;
- b - Aumento da durabilidade e resistência dos materiais de construção disponíveis;
- c - Tecnologias apropriadas aos padrões sociais, culturais e econômicos;
- d - Aplicação de técnicas de controle de qualidade para o melhor uso dos recursos e do desenvolvimento tecnológico.

Com base nas condições apresentadas, a presente pesquisa visa o estudo de compósitos tendo como aglomerante a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, por este material atender a grande parte dos quesitos dispostos anteriormente.

1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA PROPOSTO

Este polímero, embora provenha de pesquisas desenvolvidas em outra área do conhecimento científico, tem-se revelado de grande potencial para a utilização em diferentes campos da Construção Civil.

Trata-se de uma poliuretana extremamente versátil sob aspecto de suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Sua matéria-prima principal é o óleo de mamona, também

conhecido como óleo de rícino ou, ainda, por *castor oil* nos países de língua inglesa, sendo de fácil obtenção e baixo custo por ser o Brasil um dos maiores produtores mundiais do produto. Esse material já foi alvo de investigações anteriores, como no trabalho de SILVA(1996)¹, referente à impregnação de peças de concreto endurecido com polímero e PEREIRA et alii (1993)², que estudou o comportamento dessa resina poliuretana como aglomerante em tijolos de solo-polímero.

A poliuretana se insere em um grupo de polímeros distintos que encontram um vasto horizonte em Construção Civil. Essas resinas em questão, principalmente as de baixa densidade (ou também conhecidas como *expandidas*), foram estudadas como aglomerantes em compósitos de matrizes *filler-polímero*, em associações ou não com fibras. Também foi investigada sua utilização na forma de espuma rígida simples, com ou sem cargas minerais ou orgânicas.

A princípio, dado o seu *potlife* ser extremamente rápido (menos de 1 minuto), as espumas rígidas de poliuretano de mamona se prestam mais fortemente a aplicações através de processos de injeção em moldes ou aplicações sob a forma de *spray*. Contudo, novas formulações, ou mesmo a adição de certos solventes, tornam seu *potlife* mais amplo, possibilitando outras aplicações.

Normalmente, quando se calcula o custo de um determinado produto, muitas vezes apenas são considerados os aspectos ligados diretamente à sua produção. Na maioria das vezes, os problemas globais do processamento da matéria-prima ou do descarte ocorrido na fase de produção industrial, ou após o término da sua vida útil, são ignorados ou, ao menos, menosprezados.

Com referência às condições ambientais envolvidas no processo de produção, essa resina se mostra extremamente favorável pelo fato de ser de origem vegetal, o que se traduz na não-necessidade de se explorar lavras minerais; ser de fonte renovável tal qual é o caso do álcool usado como combustível; empregar mão-de-obra em larga escala no seu plantio, manejo das lavouras, coleta manual e secagem das sementes. Diferente da produção do álcool, a etapa de colheita da mamona não envolve as queimadas, sendo assim mais favorável que a cultura da cana por ser menos agressiva ao meio ambiente. A mamona também tem por característica fixar nutrientes ao solo, o que eleva ainda mais sua importância.

¹ SILVA, I. - "Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil", Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996, 163p.

² PEREIRA, A.; SILVA, S.; SAKAMOTO, W.; CHIERICE, G. - "Estudo da Dosagem de Solo-Polímero para Construção de Habitações de Interesse Social." In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de Polímeros, São Paulo, ABPol, Outubro de 1993, pgs. 55 a 59.

Como subproduto da extração de seu óleo, a mamona permite fornecer certos rejeitos industriais como a torta de mamona, largamente empregada como ração animal e como fertilizante, e as cascas secas de suas sementes aproveitadas também como fertilizantes e ração e ainda como combustível pelas próprias indústrias extratoras, permitindo assim reduzir ainda mais o custo energético de sua produção.

Do óleo extraído tem-se uma enorme gama de aplicações; muitas delas com grandes potencialidades como substitutas, com grande eficiência, do petróleo e seus derivados como o caso do diesel vegetal, um produto obtido da reação de transesterificação entre o óleo de mamona e o etanol. Esse combustível não é de concepção recente. Na época da Segunda Guerra Mundial, ele foi utilizado como combustível em caminhões e caldeiras.³

Se, em termos atuais, a resina poliuretana derivada do óleo de mamona apresenta ainda custos sensivelmente altos, isso se deve muito ao fato de esta não estar sendo produzida em larga escala. Com o aumento de sua produção e o aperfeiçoamento de suas técnicas produtivas, o seu custo tende a se reduzir, podendo, em pouco tempo, competir com os produtos derivados do petróleo e, conseqüentemente, conseguir uma maior aplicação na Construção Civil.

³ Esse processo foi utilizado na década de 40 na Usina Tamoio, no município de Araraquara, SP, segundo informações levantadas pelo autor com antigos funcionários da usina. Nesta época, devido à escassez de produtos derivados do petróleo causado pelo esforço de guerra, os combustíveis e lubrificantes foram racionados à população e às empresas. Nesta usina desenvolveram-se procedimentos e adaptações que proporcionaram aos automóveis e caminhões da empresa, bem como de muitas outras máquinas e caldeiras funcionarem utilizando combustíveis e lubrificantes alternativos baseados no álcool e no óleo de mamona, este último também produzido pela própria usina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Primeiramente, cabe esclarecer que todas as resinas utilizadas neste estudo fazem parte de um grupo de substâncias conhecidas por polímeros, ou, mais especificamente, de uma categoria conhecida por biopolímeros. Sucintamente os biopolímeros podem ser entendidos como todos os polímeros de origem vegetal. Além da poliuretana utilizada neste estudo, as resinas furânicas seriam um outro exemplo de biopolímeros⁴.

Várias características desses materiais são também encontradas em outros tipos de polímeros; assim, faz-se necessária uma breve explicação para um melhor entendimento do assunto.

2.1 NOÇÕES GERAIS SOBRE POLÍMEROS

A obtenção dos primeiros polímeros iniciou-se nos EUA por volta de 1870. Os irmãos John e Wesley Hyatt conseguiram uma patente no ano de 1869 pelo processo de se combinar nitrato de celulose à cânfora, obtendo uma massa plástica que permitiu a moldagem de objetos⁵.

Essa característica de possuírem uma alta trabalhabilidade e capacidade de moldagem fez com que as resinas poliméricas e os polímeros em geral ficassem sendo conhecidos vulgarmente como *plásticos*.

Os polímeros são substâncias de elevada massa molecular, na grande maioria dos casos formando moléculas orgânicas, constituídas pela repetição contínua e ordenada de unidades constituídas de poucos átomos, chamados de *meros* (do grego: simples). Polímeros são, portanto, segundo MANO(1988), substâncias constituídas de moléculas relativamente grandes, de massas moleculares da ordem de 10^3 a 10^6 u.m.a. (unidade de massa atômica), em cuja estrutura se encontram repetidas essas unidades químicas bastante simples. Ainda do grego temos que *polímero* significa a soma de muitos *meros*.

⁴ Resinas furânicas são polímeros extraídos do milho, muito utilizados pelos países da antiga União Soviética. No Brasil chegou a ser utilizado como uma espécie de verniz para assoalhos nas décadas de 60 e 70 até ser pouco a pouco substituído pelo poliuretano.

⁵ Compilado do trabalho de SANTOS, J. M. V. - "O Uso de Polímeros na Construção Civil; Aplicações, Experimentos e Perspectivas de Uso Futuro". Trabalho Disciplinar para a disciplina SAP 811 - Materiais de Construção. São Carlos, 1996.

Essas substâncias só são conseguidas mediante um processo conhecido por polimerização⁶ e, para que isso ocorra, é necessário que se tenha uma determinada substância conhecida por monômeros (ou, *a que tem apenas um único mero*).

Ainda segundo MANO(1988), os monômeros são moléculas ou compostos químicos de massa molecular relativamente baixa, capazes de serem transformados em polímeros, pela combinação entre si, ou com outros compostos similares, por um processo conhecido por polimerização.

Conforme comenta MANO(1985), muitas vezes um polímero não é formado apenas por um tipo de monômero e sim por dois ou mais. A esses se dá o nome de copolímeros. A quantidade de monômeros disponíveis hoje é extremamente vasta e seu número aumenta dia a dia.

Esse processo de polimerização resulta em polímeros que podem ser divididos em três grupos básicos distintos⁷. A ilustração abaixo exemplifica-os melhor (Figura 1):

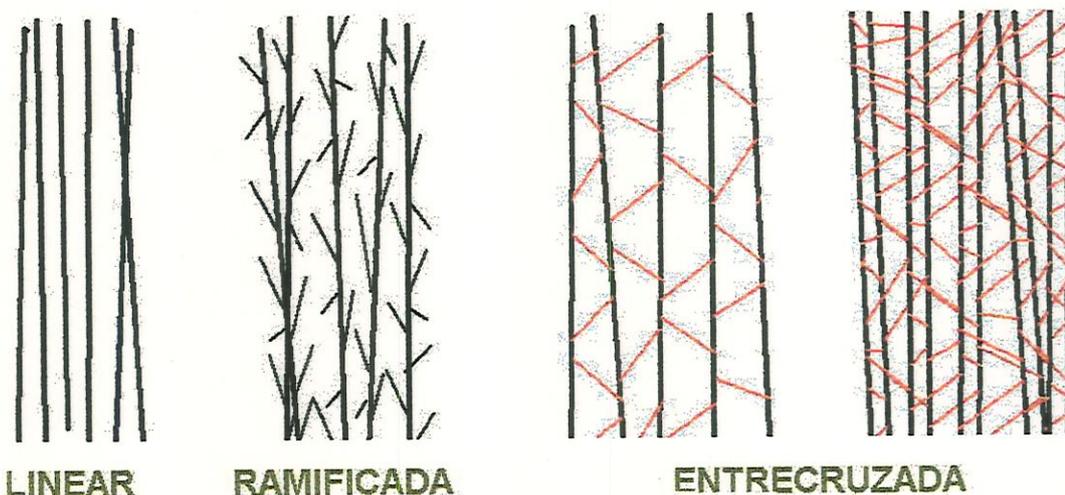


FIGURA 1 TIPOS DE CADEIAS CARBÔNICAS DOS POLÍMEROS

- Os mais simples são formados por uma cadeia muito longa e contínua de monômeros e são conhecidos por **polímeros de cadeias lineares**. Essas cadeias se unem umas às outras, por ligações de hidrogênio formando uma estrutura semelhante a um conjunto de fios.

⁶ Não se pretende se ater, neste trabalho, nas inúmeras formas que os polímeros contribuem para a Construção Civil; no entanto, ROCHA(1990) discorre de forma bastante abrangente sobre esse assunto.

⁷ Conforme comenta ALFREY(1971).

- Um outro tipo é os que apresentam ramificações ao longo de suas cadeias e são conhecidos por **polímeros de cadeias ramificadas**. A união de várias cadeias também se dá por ligações de hidrogênio, porém as ramificações conferem uma maior união entre essas cadeias, embora sejam ligadas apenas a uma macromolécula.
- Um último tipo, os **polímeros de cadeias entrecruzadas**, é os que apresentam estrutura espacial bi ou tri dimensional, onde várias cadeias são unidas por ligações covalentes através de radicais pertencentes a mais de uma cadeia carbônica. Sua estrutura final tanto pode ser fitas largas e contínuas, quanto realmente uma estrutura tridimensional. Este tipo de estrutura espacial é característico dos polímeros termofixos, que será abordado mais adiante.⁸

Em muitos casos, conforme cita CRAWFORD(1987), obtém-se um determinado polímero com mais de um tipo de estrutura de cadeia, como é o caso das poliuretanas de mamona, que formam tanto estruturas ramificadas, quanto entrecruzadas.

Existe um número elevadíssimo de polímeros que podem ser produzidos, principalmente se considerarmos a enorme quantidade de radicais diferentes que se pode unir a essas cadeias carbônicas.

Já o processo de polimerização desses monômeros, segundo MANO(1988), pode vir a ocorrer de duas formas distintas:

- **Adição:** São todos os polímeros produzidos pela polimerização de moléculas idênticas ou não de um ou mais monômeros, portadores de uma ou mais ligações duplas. Assim, os polímeros formados por reação de adição são sintetizados por adição de moléculas idênticas de um ou mais monômeros não insaturados para cadeias lineares.

O número de átomos no polímero formado é igual ao número de átomos dos monômeros dos quais o polímero foi sintetizado. Na reação por adição, nenhum tipo de resíduo é despreendido na reação final.

Condensação: Os polímeros de condensação contêm falta de átomos presentes no monômero de que é formado, ou ainda esses podem ser degradados por meio químico quando da formação de suas macromoléculas, a partir de um ou mais compostos e que podem possuir várias funções químicas de natureza idênticas ou diferentes, provocando a eliminação de resíduos. Assim, a fórmula molecular de

⁸ Notadamente, devido à estrutura molecular apresentada por esse tipo de polímero (de cadeias entrecruzadas), eles apresentam uma estrutura mais resistente aos esforços mecânicos e, assim, estão mais propensos, em princípio, a serem utilizados como aglomerantes ou como componentes para uso em Construção Civil. Conceitualmente, quanto maior for o grau de entrecruzamento, tanto maior serão as resistências mecânicas esperadas de um dado polímero.

um polímero de condensação não é um múltiplo integral da fórmula molecular dos monômeros envolvidos devido à eliminação de subprodutos.

Já do ponto de vista de suas propriedades físicas, segundo NEVILLE(1982), os polímeros podem ser classificados globalmente como termoplásticos ou termofixos (ou também chamados de termoestáveis):

- **Polímeros termoplásticos** são aqueles que apresentam estruturas de cadeias longas, lineares e paralelas que não se entrecruzam, exibindo reversibilidade quando da variação de calor ou sob a ação de solventes. Desta forma, quando aquecidos os polímeros termoplásticos amolecem com facilidade e podem ser remoldados repetidas vezes, pois não ocorre nenhuma alteração da constituição química permanente.

Como é lógico deduzir, ao se esfriarem, esses polímeros readquirem suas propriedades iniciais. Evidentemente há uma temperatura limite que se pode aplicar a esses materiais, a partir da qual os polímeros tendem a se degradar, perdendo suas características.

Pelas suas características, essa família de polímeros geralmente não requer agentes de cura e é a grande maioria dos polímeros disponíveis comercialmente no mercado.

- **Polímeros termoestáveis** (ou também **termofixos**) apresentam cadeias orientadas que se entrecruzam (ligação cruzada). Devido a essa característica, eles não apresentam reversibilidade quando da variação de temperatura e são resistentes à grande maioria dos solventes orgânicos; ou seja, não amolecem nem com o calor, nem sob a ação de solventes após sua polimerização, dependendo de uma mudança de sua constituição química para que sejam fundidos ou dissolvidos. Portanto, ao contrário dos termoplásticos, esta família de polímeros perde sua termoplasticidade inicial sob o efeito da reação de entrecruzamento e torna-se progressivamente termoestável. No geral, um polímero termoplástico pode ser convertido em termofixo pela adição de agentes de ligação cruzada.

2.2 POLÍMEROS COMO MODIFICADORES OU COMO AGLOMERANTES EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

Embora os concretos comuns de cimento Portland sejam ótimos materiais de construção principalmente pela sua facilidade de moldagem, apresentam a desvantagem de serem susceptíveis à penetração de água devido à sua natureza porosa. Desta forma, o comportamento dos concretos convencionais frente a solicitações de compressão e tração, e as propriedades como permeabilidade, resistência aos agentes agressivos, entre outras, são afetados. Assim, esse concreto demonstra certas limitações de desempenho quando

empregado em locais ou ambientes de elevada agressividade, onde ele tem sua vida útil reduzida e necessitará de intervenções constantes para sua manutenção, provocando uma elevação no seu custo global⁹.

Considerando-se que nos materiais cerâmicos a diminuição da porosidade é proporcional ao aumento de sua resistência, o mesmo princípio aplicado ao concreto teria os mesmos efeitos neste material e, neste caso, duas ações, não necessariamente distintas devem ocorrer: a redução da água utilizada em sua dosagem e o tamponamento dos poros ou, no mínimo, a descontinuidade de seus capilares.

Na busca dessas soluções de tornar o concreto um material mais impermeável, e por conseqüência menos sujeito à ação de agentes agressivos, uma série de dosagens com polímeros foi feita e ensaiada e, conforme se pode observar por várias publicações, entre elas destaca-se em particular as publicadas pelo ACI¹⁰, que classifica essas intervenções com polímeros em três categorias distintas:

- O concreto convencional de cimento Portland já em seu estado endurecido é impregnado com um sistema de monômero líquido que é em seguida polimerizado. Obtém-se assim, o **Concreto Impregnado com Polímero (PIC)**.
- Um polímero ou monômero atuando como aglomerante é adicionado durante o processo da mistura, ainda fresca, da argamassa ou do concreto de cimento Portland e, em seguida, curado e/ou polimerizado após sua devida moldagem e adensamento. Produz-se assim, o **Concreto de Cimento e Polímero** ou **Concreto Modificado com Polímero (PPCC)**.
- Um polímero atua como aglomerante, em substituição total do cimento Portland ou outro aglomerante mineral, consistindo numa mistura de agregados e polímeros ou monômeros. Após sua moldagem, processa-se a polimerização completa do monômero. Esta forma de compósito é o que se chama de **Concreto Polímero** ou **Concreto de Resina (PC)**.

Nos três casos, uma das finalidades principais do uso dos polímeros é impedir que o concreto apresente porosidade excessiva, mas é bom notar que não há a possibilidade de se obter economicamente um concreto com índice de capilares zero.

No segundo caso, conforme a tese apresentada por TEZUKA(1977), "a associação de um polímero ao concreto de cimento Portland acarreta, pelo tamponamento de seus vazios, a

⁹ Vários autores, entre eles ANDRADE(1992), FOWER(1987), HELENE(1992) E MCGILL(1990), discorrem sobre a problemática da agressividade do meio ambiente em peças de concreto de cimento Portland causando sérios problemas patológicos nesses materiais.

¹⁰ ACI (1987), ACI(1991), ACI(1992), ACI(1993) e ACI(1993b).

redução do ingresso de agentes agressivos ao seu interior, possibilitando um melhor desempenho com relação a durabilidade, e acréscimo da resistência mecânica⁷.

2.2.1 Concretos Impregnados com Polímeros

O concreto convencional é constituído por partículas de agregados graúdos e miúdos dispersos na matriz de pasta de cimento endurecido, sendo que o volume dos agregados é cerca de 65% a 70%, e o restante, ocupado pela pasta de cimento. Considerando-se a porosidade dos agregados como nula, principalmente os agregados de alta densidade, a porosidade pela formação de capilares após a cura do concreto ficaria restrita à pasta de cimento.

Segundo TEZUKA(1988), a porosidade capilar, característica do concreto convencional, aparece na maioria dos casos devido ao uso excessivo da água de amassamento, na maioria das vezes na tentativa de melhorar sua trabalhabilidade. Assim, a porosidade presente depende da relação água/cimento original e do grau de hidratação da pasta de cimento¹¹. Desta forma, para uma pasta hidratada de relação água/cimento da ordem de 0,50¹², tem-se que o volume de porosidade capilar é algo em torno de 0,25 cm³/g de pasta seca. Sabe-se ainda que, além da porosidade capilar, existe a chamada porosidade de gel¹³, que apresenta dimensões sensivelmente menores que a porosidade capilar e que pode estar presente na pasta de cimento na relação de 0,10 cm³/g.

Desta maneira, conclui-se que a porosidade total na pasta de cimento endurecida, em uma relação água/cimento de 0,50, pode ser cerca de 0,35 cm³/g. Logo, para uma pasta de massa específica 1,40 g/cm³, o teor total de poros chega a ser da ordem de 49%.

Nos concretos convencionais, com 30 a 35% de pasta de cimento, o volume de poros chegaria a ser da ordem de 15 a 17%. Sabendo-se que a natureza porosa do concreto é a sua maior limitação à resistência e à durabilidade, se todos esses poros forem preenchidos com a incorporação de um volume relativamente pequeno de polímeros, obter-se-ia um concreto com significativos aumentos nas propriedades mecânicas, tais como resistência a compressão e módulo de deformação, além de proporcionar uma melhor resistência química do compósito.

¹¹ Um estudo mais detalhado dessa característica pode ser visto em MEHTA(1994).

¹² Denomina-se relação água/cimento às proporções desses dois elementos em uma dada mistura. Assim, uma proporção de 0,5 corresponde a uma parte de água para duas partes de cimento. Essa água é necessária para hidratar o cimento e conferir à pasta um certo grau de plasticidade ou, como é denominada em Construção Civil, trabalhabilidade. Quanto maior for a relação água/cimento, tanto maior será a capilaridade apresentada pela pasta curada.

¹³ Segundo alguns autores, entre eles NEVILLE(1982), entende-se por porosidade do gel os espaços intersticiais interligados entre as partículas (ou cristais) do gel do cimento. Os poros do gel correspondem a

As argamassas e concretos impregnados são produzidos pela introdução de uma resina, ainda no estado fresco, em peças já curadas desses materiais. As técnicas empregadas vão desde a simples pintura do compósito com um polímero de alta fluidez, até a impregnação a vácuo, na qual as peças de concreto são colocadas em um recipiente onde é retirado o ar de seu interior, em seguida é introduzida a resina nesta câmara e em seguida volta-se a pressão atmosférica normal. O retorno à pressão ambiente faz com que o polímero, ainda no seu estado fresco seja carregado para o interior da peça. Em seguida, é retirado o excesso superficial e é feita sua polimerização. Dependendo do grau de impregnação conseguido e das características da resina empregada, as peças tratadas apresentam graus diferentes de ganhos de resistências mecânicas e químicas.

Junto com estas melhorias nas propriedades mecânicas, as propriedades de durabilidade são proporcionalmente incrementadas. Essa melhoria está diretamente relacionada ao preenchimento e selagem dos poros e vazios presentes no concreto pelo polímero, que, além de impedir o ingresso de agentes agressivos, substitui esses espaços vazios por um material com propriedades mecânicas intrínsecas.

Comparando-se o concreto impregnado com o concreto convencional, o produto polimerizado tem uma resistência a compressão muito mais elevada, bem como a resistência ao impacto, o módulo de elasticidade, a resistência a tração e possui reduzida deformação lenta e baixa retração por secagem.

Segundo as publicações do ACI¹⁴, o concreto impregnado com polímero apresenta uma elevada resistência à abrasão, ao ataque de agentes agressivos, etc. Algumas dessas melhorias são devidas à baixa porosidade produzida pela impregnação do concreto, embora a extensão da mudança nas propriedades dependa da relação água/cimento e profundidade de impregnação, da eficiência da polimerização e das propriedades mecânicas do polímero utilizado na impregnação.

Ultimamente, segundo YIMPRASERT(1976) e mesmo o que se pode apurar de VERÇOSA(1993), as pesquisas têm dado ênfase ao estudo do concreto parcialmente impregnado, que possui vantagens em comparação com o concreto convencional, bem como em comparação com o concreto totalmente impregnado. Conforme comenta SILVA(1996), além de o concreto parcialmente impregnado (PPIC) consumir menos energia, ele é obtido com muito mais facilidade do que o concreto totalmente impregnado (FPIC), e suas propriedades mecânicas e químicas, embora pouco inferiores às do concreto totalmente impregnado, são significativamente superiores com relação às do concreto convencional.

cerca de 28% do volume total do gel dependendo do tipo de cimento utilizado e é independente da relação água/cimento da mistura e do estágio de hidratação.

¹⁴ ACI(1991) e ACI(1993).

Nota-se também que o concreto impregnado parcialmente, além de produzir melhorias na durabilidade, a partir da colmatação e selagem dos poros, promove também, acréscimo nas propriedades mecânicas. Observa-se, ainda, que a resistência a compressão do concreto impregnado com polímero aumenta com o ganho de polímero; assim como o módulo de elasticidade do concreto impregnado é maior que a matriz de concreto convencional, e, obviamente, a porosidade é diminuída.

2.2.2 Concreto Modificado (Concreto de Cimento e Polímero)

Os concretos de cimento e polímero são um material onde o aglomerante é formado por dois tipos de componentes ativos, o cimento Portland e a dispersão de monômero ou polímero em água. O polímero, na forma de látex, pode ser disperso em água sem maiores problemas e entra no processo de mistura tal qual um aditivo convencional.

Normalmente, segundo TESUKA(1988), o monômero ou polímero é trabalhado sob a forma de dispersão ou emulsão, sendo adicionado durante o processo de mistura da argamassa ou concreto de cimento Portland, e subseqüentemente curado. Caso necessário, o monômero presente na argamassa ou concreto é polimerizado "*in situ*". Dentre as formas de emprego de polímeros no concreto, pode-se dizer que o concreto de cimento e polímero (PPCC), apresenta uma grande vantagem em relação aos outros tipos de concretos polímeros devido ao fato de não requerer, na sua produção, mudanças significativas na tecnologia do processo do concreto de cimento Portland, nem em equipamentos especiais, evitando investimentos elevados de capital, mas melhorando significativamente as propriedades originais do concreto convencional.

Ainda segundo a mesma autora, o conteúdo de polímero utilizado na formulação dos concretos ou argamassas de cimento e polímero varia de 5 a até 30% de polímeros em relação à massa de cimento, porém os consumos mais utilizados encontram-se entre 10 e 25% e as dosagens de cimento empregados para concretos de cimento e polímero situam-se num intervalo de 300 kg/m^3 a 480 kg/m^3 , sendo este conteúdo adotado de acordo com as aplicações desejadas. É importante lembrar que o simples fato de se estar adicionando um polímero na mistura não irá, de forma alguma, compensar uma eventual dosagem inadequada ou deficiente de cimento, que, de forma geral, não deverá ser inferior a 300 kg/m^3 .¹⁵

Conforme comenta OHAMA(1987), a modificação da argamassa ou concreto é conseqüência da hidratação do cimento e da coalescência das partículas de polímero formando um filme contínuo de polímero. A hidratação do cimento geralmente precede o

¹⁵ Diz-se que um determinado concreto possui dosagens de, por exemplo, 350 kg/m^3 quando, para a produção de 1 m^3 de concreto fresco, se utiliza 350kg de cimento em pó na sua composição.

processo de formação do filme de polímero. A matriz (cimento/polímero) é basicamente formada em três etapas distintas:

- *Etapa inicial:* Imediatamente após a mistura do polímero com a argamassa ou o concreto de cimento ainda frescos, as partículas do polímero ainda estão dispersas uniformemente na pasta de cimento. Nesta pasta de cimento e polímero, o gel de cimento é gradualmente formado pela hidratação do cimento, e a fase líquida é saturada com hidróxido de cálcio formado durante a hidratação, enquanto as partículas do polímero depositam-se parcialmente na superfície do gel já formado e dos grãos ainda não hidratados de cimento.
- *Etapa intermediária:* Com o desenvolvimento da estrutura do gel de cimento Portland, as partículas do polímero são gradualmente confinadas nos poros capilares. A crescente hidratação do cimento reduz a água capilar, as partículas do polímero floculam formando uma camada contínua e compacta de polímero sobre a superfície do gel de cimento e também de seus grãos não hidratados, aderindo simultaneamente a estes e à camada de silicato de cálcio formada sobre a superfície dos agregados. Neste caso, os poros maiores presentes na mistura são colmatados pelas partículas de polímero.
- *Etapa final:* Com a redução da água combinada através da hidratação do cimento, as partículas do polímero coalescem sobre o cimento hidratado, formando filmes contínuos ou membranas, que se ligam aos géis hidratados do cimento e agregados, constituindo uma cadeia monolítica na qual a fase polímero interpenetra completamente a fase do cimento hidratado.

Normalmente, segundo vários autores pesquisados, os materiais empregados na obtenção de argamassas e concretos de cimento e polímero são exatamente os mesmos que se utilizam para obter concretos de cimento Portland, tanto em qualidade, quanto em quantidades. Assim, desde que não interfiram no polímero empregado, quaisquer agregados (grãos ou miúdos, leves ou não) podem ser empregados da mesma maneira que são utilizados nos concretos de cimento Portland convencionais.

∩ O mesmo se dá para as fases de mistura e adensamento, que seguem o mesmo procedimento usual para o concreto comum; apenas o lançamento requer ser realizado em um espaço de tempo mais curto que o convencional, com um tempo máximo de aproximadamente 30 a 40 minutos; isso devido ao fato de que se estes forem manipulados após a coalescência do polímero, podem ocorrer fissuras.

∩ Com relação à cura, pode-se proceder na forma de cura úmida nas primeiras idades, entre 1 e 3 dias; em idades mais avançadas procede-se com cura ao ar. Esse fator é interessante sob o ponto de vista da Construção Civil já que não há necessidade de maiores cuidados com as peças além desse período curto de cura úmida.

Os resíduos aderidos aos equipamentos, ferramentas e utensílios devem ser lavados simplesmente com água para que os mesmos possam ser reutilizados.

Segue abaixo dois diagramas (Figuras 2 e 3) que elucidam melhor o que ocorre com a massa fresca de cimento quando é incorporada um certa quantidade de polímero:

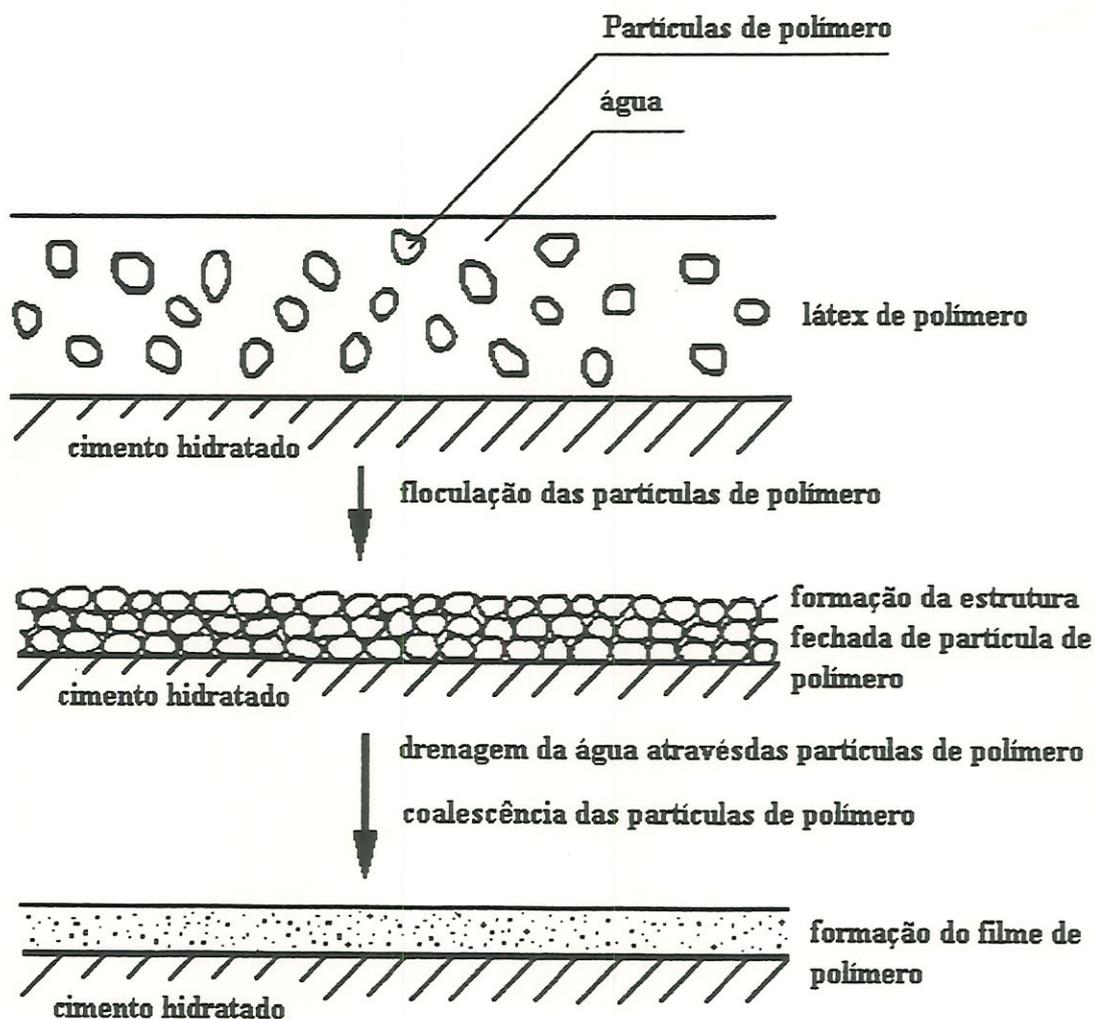


FIGURA 2 MODELO IDEALIZADO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DO FILME DE POLÍMERO NA PARTÍCULA DE CIMENTO HIDRATADO

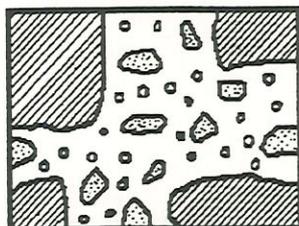
Fonte: OHAMA, YOSHIHIKO – Principle of latex modification and some typical properties of modified-modified mortars and concretes. ACI materials journal, pp. 511-518, n 84, nov/dec 1987.

Neste primeiro caso, temos que o filme formado auxilia na redução da evaporação da água de hidratação do cimento. Isso é particularmente interessante para que as peças de concreto não sofram retração por evaporação dessa água e, conseqüentemente, não apresentem as microfissuras que caracterizam esse processo, conferindo ao produto final uma menor área superficial e, portanto, uma maior resistência a um meio ambiente

agressivo na qual possa estar sendo empregado. Isso é particularmente interessante, pois a superfície das peças de concreto modificado com polímero é muito mais impermeável que as das convencionais.

No esquema abaixo pode-se notar o que ocorre dentro das peças de concreto modificado com polímero, desde sua fase de mistura até a fase já curada.

(a) imediatamente após a mistura

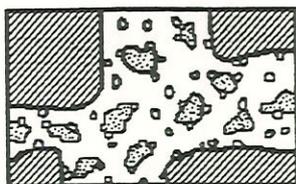


 partículas de cimento não hidratadas

 partículas de polímero

 agregados
(a água ocupa os espaços intersticiais)

(b) primeira passo



 mistura de partículas não hidratadas de cimento, gel de cimento
(nesta fase, ocorre uma decomposição parcial das partículas de polímero)

(c) segundo passo



 mistura de gel de cimento e partículas não hidratadas de cimento envolvidas com uma camada de partículas de polímero

(d) terceiro passo



 partícula de cimento hidratado envolvida com filme de polímero

 ar aprisionado

FIGURA 3 MODELO IDEALIZADO DE FORMAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO E POLÍMERO

Fonte: OHAMA, YOSHIHIKO – Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. ACI materials journal, pp. 511-518, n 84, nov/dec 1987.

Atualmente, concretos de cimento e polímero e, principalmente, argamassas vêm sendo utilizados com alto desempenho como materiais de construção com custo bastante acessível, particularmente essas últimas, em trabalhos de revestimento e reparos, por causa do seu excelente desempenho quanto à aderência e durabilidade.

O polímero mais empregado para esse fim é o látex de estireno-butadieno, de fácil aplicação, extremamente compatível com os materiais empregados no concreto convencional e que não requer maiores cuidados na sua fase de mistura, lançamento e adensamento¹⁶.

Várias argamassas modificadas com polímero estão sendo oferecidas no mercado, principalmente as que possuem aplicação nos revestimentos com peças cerâmicas e são comumente conhecidas por argamassas de cimento e cola.

2.2.3 Concreto de Resina

Há referências a esses compósitos como *Concretos Polímeros* ou também como *Concreto Resina*. O termo *Concreto de Resina* é o mais adotado e vem ao encontro das determinações da ACI.

Independentemente da terminologia adotada, este compósito não contém cimento Portland como aglomerante, embora esse material possa ser empregado como um agregado na forma de *filler*, mas sem que necessariamente tenha características de aglomerante.

Assim, os concretos de resina diferem do concreto impregnado de polímero (PIC) e do concreto de cimento Portland e polímero (PPCC), porque apenas o polímero é utilizado como aglomerante no compósito.

O AMERICAN CONCRETE INSTITUTE¹⁷ define este material como um compósito constituído de uma matriz de polímero e *filler*, preparado com a mistura completa da matriz polimerizável (monômero ou resina) e agregados (grãos e miúdos), seguida de polimerização "*in situ*".

Como no concreto de resina o polímero constitui a fase contínua do compósito, as propriedades deste dependem largamente das propriedades do polímero que está sendo usado como aglomerante e, por conseqüência, da sua quantidade no compósito.

Devido à característica de ser um compósito onde não há a presença de cimento Portland ou qualquer outro aglomerante mineral, este material não apresenta as características de

¹⁶ O artigo de RAY et alii(1994) discorre sobre as propriedades da adição de látex e de superplastificantes nos concretos convencionais.

¹⁷ American Concrete Institute - ACI - State-of-the-art report. ACI committee 548, ACI journal, 1987.

porosidade dos concretos convencionais. Desta forma, o concreto de resina pode ser utilizado sob condições de uso em meios mais agressivos com maior desempenho.

As características deste compósito variam de acordo com a adição do *filler* e agregados, podendo ser consideradas como:

- cura rápida em temperaturas entre -18°C a 40°C;
- alta resistência a tração, flexão e compressão;
- boa aderência à maioria das superfícies;
- boa durabilidade a longo tempo;
- baixa permeabilidade a água e a soluções ácidas e alcalinas.

Excetuando-se o seu aglomerante, os concretos de resina têm em comum com o concreto normal todos os seus outros constituintes, tanto nas quantidades, como nas qualidades normais desses componentes.

Se comparados esses dois sistemas, notar-se-á que as propriedades do concreto de resina em relação ao concreto convencional de cimento Portland são:¹⁸

- redução da permeabilidade a líquidos e soluções agressivas;
- resistência química bastante superior aos concretos convencionais;
- alta resistência ao desgaste por abrasão e ao impacto;
- superfícies altamente regulares e limpas, e,
- cura rápida.

O concreto de resina é formado pela polimerização de um monômero misturado com agregados à temperatura ambiente, usando sistema promotor-catalítico ou outro agente de cura.

A polimerização do concreto resina é usualmente obtida através de um sistema de reação química de um polímero bicomponente, ou ainda, com a utilização de uma fonte de energia externa que pode ser calor ou radiação.

Um dado importante que deve ser levado em conta é que, na maior parte dos polímeros empregados, os agregados utilizados na composição dos concretos de resina devem estar secos, ou, pelo menos, sem umidade superficial; a presença de umidade nesses componentes pode acarretar hidrólise com o polímero, causando sérios problemas na sua polimerização.

¹⁸ Segundo estudo de KRUGER, D. & PENHALL, D. - "Polymers in concrete: a protective measure. Protection of concrete" publicado nos Proceedings of the International Conference University of Dundee Scotland, UK., on 11-13 September, 1993, pp. 653-663.

Segundo TESUKA(1977), se essa umidade, no caso dos agregados finos, exceda valores iguais ou superiores a 2%, existirá grande chance de simplesmente não haver o endurecimento do compósito.

Além do problema de estarem isentos de umidade superficial, a granulometria dos materiais inertes é de importância fundamental no caso do concreto de resina, não só do ponto de vista da resistência, mas principalmente para minimizar o consumo de aglomerantes e auxiliar na sua trabalhabilidade.

Junto com os agregados miúdos e graúdos, normalmente na dosagem dos concretos de resina, são utilizados também certas adições de cimento Portland, pó de sílica, ou outro material micropulverizado como *filler*. Isso, além de ajudar a melhorar a trabalhabilidade da mistura fresca, auxilia no incremento da resistência mecânica do compósito.

É importante ressaltar também que o emprego de *filler* no concreto de resina tem por objetivo impedir a segregação dos materiais constituintes, provocada pela diferença de massas específicas dos inertes e da resina.

A mistura do concreto de resina, segundo TESUKA(1979), pode ser feita de duas maneiras básicas:

- A convencional, onde se adiciona a resina aos agregados secos previamente misturados (*filler*, areia, agregado graúdo), até se conseguir uma massa uniforme e trabalhável. Esta forma de mistura pode resultar, em alguns casos, na formação de excesso de bolhas de ar.
- A segunda maneira consiste em colocar em um molde a resina e depois adicionar gradualmente os agregados (primeiro o *filler*, depois a areia e, a seguir, o agregado graúdo). A mistura é consolidada por vibração mecânica. Este método, em geral, produz peças mais uniformes com um mínimo de ar incorporado.

Devido as resinas empregadas nesses compósitos serem ainda materiais muito dispendiosos, torna-se imprescindível a determinação da quantidade ótima do aglomerante, seleção da quantidade ideal de endurecedor e do método de introduzi-lo na mistura, além da prevenção do efeito danoso da água no processo de endurecimento, bem como a utilização de uma tecnologia adequada para a produção desse material.

A qualidade do concreto de resina depende fundamentalmente do bom proporcionamento dos elementos constituintes. Neste aspecto, o problema da dosagem adquire interesse econômico básico, pois o custo do sistema construtivo feito em concreto de resina depende significativamente do custo do aglomerante.

Vários tipos diferentes de polímero podem ser empregados para a formação de concretos de resina, dentre eles se destacam os concretos de resinas furânicas, os de resina epóxi e

os de resina poliéster. No que se pôde apurar, as poliuretanas são pouco empregadas como aglomerantes nesses concretos.

2.3 O USO DE NOVOS MATERIAIS E NOVAS TECNOLOGIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O rápido avanço da tecnologia no campo dos concretos contendo polímeros vem continuamente produzindo refinamentos em componentes e processos utilizados e, também, possibilitando a compreensão das propriedades e melhoria no desempenho dos compósitos originados.

A aplicação destes materiais em países como Japão, Rússia e EUA teve uma expansão particularmente rápida na década de 70. Atualmente, outros países como: Reino Unido, África do Sul, Índia, Kuwait e China vêm estudando e aplicando estes compósitos em vários campos da Construção Civil.

Desde a década de 70, a tecnologia do concreto polímero é estudada no Brasil, contudo, é fácil notar sua relativa falta de aplicação no setor da Construção Civil, principalmente em sistemas e subsistemas estruturais.¹⁹ Um dos principais fatores que determinam o seu reduzido emprego em nosso país é decorrente do resultado equivocado quando se comparam os custos da aplicação de um concreto utilizando resinas poliméricas com concretos de cimento Portland. Para uma mesma aplicação, se os custos iniciais desses dois concretos forem comparados, nota-se que o concreto de cimento Portland é, sem dúvida menos oneroso que o concreto resina.

Essa comparação se dá em situações nas quais o concreto de cimento Portland apresenta-se ainda com adequado desempenho, tanto mecânico, quanto de durabilidade, em face das pequenas exigências impostas pelo meio onde este se insere. Nestas condições, em que tanto o concreto de cimento Portland, quanto um concreto resina podem ser empregados, é óbvio que no primeiro, tanto o custo, como a tecnologia envolvida, são tremendamente favoráveis²⁰.

Apenas o fato de se poder simplesmente lavar com água os utensílios que foram utilizados para o preparo de um concreto convencional, condição esta que não ocorre em grande parte das vezes quando se utilizam os polímeros, já demonstra um outro nível de

¹⁹ Conforme se pode ver na tese de doutorado de Yasuko TEZUKA apresentada na POLI-USP em 1977. Atualmente há uma grande variedade de compósitos com polímeros disponíveis no mercado; principalmente na forma de argamassas, tanto colantes como impermeabilizantes.

²⁰ FOWER(1988) comenta esse problema

complexidade que esses últimos possuem e que, diretamente, afeta seus custos de produção

Tem-se assim, portanto, que um determinado concreto de polímero só concorrerá com o concreto convencional em situações em que este último já não possa mais atender às características de durabilidade e desempenho exigidas devido ao meio ou às condições às quais estará exposto. Caso contrário, esta será sempre uma solução mais onerosa e de maior dificuldade tecnológica.

2.4 MATERIAIS PROVENIENTES DE RECURSOS RENOVÁVEIS

Um dos pontos mais considerados atualmente é a problemática do emprego de um material qualquer do ponto de vista ambiental, considerando sua produção, ou sua utilização. Trata-se não somente de um novo conceito, o da *Arquitetura Sustentável*²¹, que se insere no epicentro de um amplo contexto, onde se agrega a maioria dos conceitos anteriores com a intenção de se produzir algo menos impactante ao meio ambiente.

Dentro deste conceito de sustentabilidade, estão compreendidas as condições para um uso mais racional da água, o controle climático, a produção de alimentos, o controle e a purificação do ar, o tratamento e a recuperação de resíduos e o aumento da eficiência da energia global utilizada.

Particularmente em termos diretamente ligados à Construção Civil, esta nova visão defende que se deva utilizar materiais locais, os recursos consumidos deverão ser renováveis e deverão estar envolvidos também o uso de materiais passíveis de serem reciclados ou então biodegradáveis preferencialmente.²²

Assim, deve-se sempre ter em conta o gasto energético e mesmo ambiental para a produção deste ou daquele material ou componente. Se ocorre um grande dispêndio energético, esta energia foi produzida, em termos brasileiros, provavelmente a partir de uma usina hidroelétrica que, para ser implantada, ocupou terras de boa produtividade agrícola ou matas ciliares e que, por sua extensão, acarretou alterações ambientais.

Caso essa energia não seja a eletricidade e sim outros meios, como o caso de combustíveis fósseis, esse processo resulta em uma certa tendência a se transformar em

²¹ O termo *Arquitetura Sustentável* engloba não apenas as relações da *Arquitetura Bio-Climática* ou *Arquitetura Solar* (que se norteia pelo aproveitamento da energia solar de forma racional), estas muito mais ligadas à conservação de energia e adequabilidade climática.

²² Compilado de VECCHIA, F. *Conceitos de Arquitetura Sustentável "Desenvolvimento Sustentável no Ambiente Construído"*. Notas de aula, 1999.

fonte de poluentes que, caso não sejam controlados, agridem o meio ambiente em maior ou menor grau.

Deste modo, o aspecto energético de produção de um material deve também ser levado em conta. Qualquer economia de energia vem ao encontro com a necessidade de se preservar as condições ambientais naturais.

Com relação às suas matérias primas, se a extração dessas afetar um determinado local que as produz, uma nova forma de agressão e de custo ambiental se configura. Um exemplo onde estão envolvidos esses dois fatores, gasto energético e fonte de matéria-prima, se vê na produção dos cimentos. Para a sua obtenção, há a necessidade de se explorar uma determinada jazida de calcário para se extrair os minérios que comporão o cimento. Esses minérios passam a seguir por processo de calcinação, onde são consumidas grandes volumes de energia, além de se gerar grandes quantidades de dióxido de carbono.

Se custo atual de um saco de cimento de 50 Kg gira em torno (no início de 2000) de R\$10,50 a unidade²³, quanto seria seu custo total, se for levada em conta a agressão ambiental da extração de seus minérios constituintes, no impacto ambiental das hidroelétricas, de sua difícil reciclagem e nos anos que a natureza demoraria para reincorporá-lo?

O tempo de vida útil desse material de construção corriqueiro é insignificante se for comparado com o tempo gasto para que a natureza se encarregue de reciclá-lo naturalmente.

Outros métodos de se apressar essa etapa envolveriam um maior gasto energético e novos impactos ambientais, o que seria, sob certos aspectos, completamente contraproducente.

Não se pode esquecer que um material que irá, por exemplo, constituir um determinado componente, seja este qual for, possuirá um determinado tempo de vida útil em que suas características físicas, químicas e mecânicas são preservadas ou minimamente degradadas e, ao término deste período, este mesmo componente, ou deverá necessariamente passar por alguma intervenção de vulto, ou será descartado, cabendo neste ponto uma de quatro alternativas possíveis:

²³ Valor médio aproximado colhido pelo autor no comércio de São Carlos, SP em Janeiro de 2000, valor que correspondia a pouco mais de US\$ 5,60 pelo câmbio da época.

- O material empregado na sua confecção é biodegradável e em pouco tempo ele é reincorporado à natureza, como os novos "plásticos" feitos de uma espécie de açúcar de amido, que, depois de um certo tempo em contato com umidade e microrganismos, se desfaz;
- O material daquele determinado produto é passível de ser reciclado, formando novamente o mesmo material em condições ótimas de uso, como é o caso do alumínio das latas utilizadas em refrigerantes;
- O material pode ser transformado em outro, como o caso de parte do entulho de construção (formado de restos de tijolo, argamassas e sobras de concreto) que pode ser processado e utilizado depois como agregado.
- O material do qual ele foi feito possui condições extremamente dispendiosas de reciclagem (ou até mesmo virtualmente não as possui), como é o caso dos pneus usados nos automóveis e caminhões.

A razão, então, nos remete a que o tempo de existência de um material deve ser necessariamente maior que a vida útil do componente que é constituído por ele, mas não extremamente maior, o que dificulta sua reincorporação no meio ambiente²⁴. Neste ponto, haveria duas saídas igualmente vantajosas para se solucionar o problema:

- A adição de diferentes compostos, ou a substituição dos atuais por outros que auxiliariam no processo de degradação desses artefatos.
- O uso destes, já tendo cumprido sua função inicial, em novos componentes que os usariam, quer na sua forma original, quer em outras configurações, como matéria-prima ou componentes de outros produtos associados na forma de compósitos.²⁵

Dado o âmbito dessa problemática, qualquer pesquisa de novos materiais ou de novos componentes poderia ser muito mais vantajosa numa esfera global se a procura de soluções para esses problemas for incorporada como uma das diretrizes a serem seguidas.

²⁴ O tempo de vida útil de uma edificação é estipulada em seu projeto. Dependendo das necessidades de segurança, valor envolvido, necessidades de uso, entre outros fatores, esta poderá ser maior ou menor. Um alojamento projetado para atender às necessidades da construção de uma barragem tem um tempo de vida útil por volta de 8 ou 10 anos; já a barragem propriamente dita deverá permanecer íntegra por um período de no mínimo 500 anos. Independentemente de sua vida útil, qualquer edificação, seja ela qual for, deverá sofrer algum tipo de manutenção em maior ou menor grau ao longo do tempo.

Em um mesmo edifício, os diversos sistemas e subsistemas construtivos possuem vidas úteis diferentes entre si. Um elemento estrutural, por exemplo, possui um tempo de vida muito maior que uma pintura das paredes que devem, necessariamente, passar por várias manutenções ao longo do tempo.

Norberto B. LIECHTENSTEIN em sua dissertação de mestrado "Patologia das Construções: Procedimento para formulação do Diagnóstico de falhas e Definição de Conduta Adequada à Recuperação de Edificações", POLI-USP, 1985, aborda com muita propriedade essa problemática.

²⁵ Utilizando-se novamente o exemplo dos pneus, foram realizadas moldagens nas quais se empregou pneus triturados como agregados e a poliuretana como aglomerante, com resultados muito bons, indicando que esse tipo de compósito possui características que podem indicá-lo para uso em pisos ou como bases de máquinas e motores.

Além desse ponto de vista ambiental, pode-se também focar a discussão sócio-econômica que o uso de materiais "mais bem planejados" fornece: Um material de consumo em Construção Civil que viesse ou que dependesse fortemente da produção no campo estaria contribuindo para não elevar a taxa de migração aos centros urbanos; daria apoio a uma economia sustentável, ampliaria a redução do gasto energético envolvido no seu processo de obtenção e poderia ser um fator que contribuísse na redução das desigualdades sociais presentes em nosso país.

No caso particular das resinas poliuretanas de óleo de mamona, esta apresenta grande afinidade com as soluções dos problemas ambientais referentes ao consumo energético, reincorporação não-nociva ao meio-ambiente e com a obtenção das matérias-primas renováveis, além dos problemas sócio-econômicos, levantados nos itens anteriores.

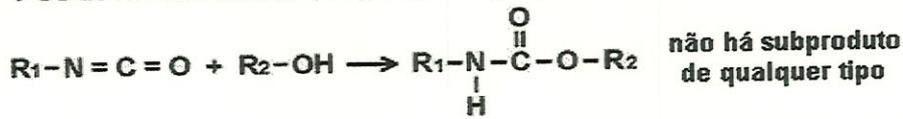
2.5 BIOPOLÍMEROS

Como já foi dito, o termo biopolímero encontra-se conceituado no fato deste polímero ser proveniente de uma produção agrícola renovável e não de um recurso mineral como o caso dos polímeros derivados do petróleo²⁶.

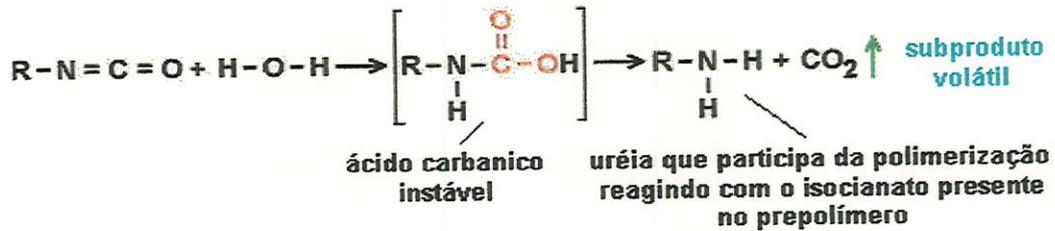
Devido a ser um sistema bicomponente, as resinas poliuretanas possuem muito pouco material volátil que se desprende durante o processo de polimerização; particularmente com relação à poliuretana gerada do óleo de mamona, dependendo do tipo de poliol utilizado para formar a poliuretana, poderá ocorrer uma reação por adição originando poliuretanas de alta densidade (e no caso não haverá nenhum resíduo decorrente desta reação) ou uma reação por condensação, caso esteja presente água na formulação, originando poliuretanas de baixa densidade ou de espuma (e o resíduo formado será o CO₂ que efetivamente irá formar as células de espuma). As reações químicas mostradas na Equação 1 exemplificam melhor cada um desses processos:

²⁶ Esse conceito pode ser mais bem compreendido pelo estudo das obras de ALFREY & GURNEE(1971); MANO(1985);

PU's de alta densidade (reação por adição).



PU's de baixa densidade (reação de condensação)



(1)

EQUAÇÃO 1 REAÇÕES DA RESINA PU DE ALTA E BAIXA DENSIDADE

Fonte: GQATP - IQSC/USP, 1999

No caso das poliuretanas de baixa densidade, é importante frisar que nesta reação não entra em nenhuma etapa qualquer utilização de *freon*²⁷ ou qualquer outro gás expander, como ocorre em algumas das poliuretanas de baixa densidade derivadas do petróleo.

Por outro lado, caso ocorra a adição de alguma parcela de água nas reações das poliuretanas de alta densidade, mesmo que no caso de uma umidade dos agregados empregados, estas, durante o processo de polimerização, irão reagir com a água presente e formando uma certa quantidade de CO₂, que causará a ocorrência de bolhas no polímero.

Assim, para que se garanta um concreto resina de poliuretana de alta densidade, e portanto isento de bolhas, deverá ser tomado um grande cuidado em garantir agregados com o menor grau de umidade possível.

Tendo esses fatores como base para o início dos estudos, estes se desenrolaram visando, inicialmente, o levantamento de várias propriedades da resina poliuretana derivada do óleo de mamona (resina PU), constatando-se quais os aspectos mais favoráveis à sua utilização na Construção Civil em razão das seguintes características já detectadas anteriormente²⁸:

- alto desempenho como isolante térmico e acústico;

²⁷ Composto químico baseado no CFC

²⁸ Características estas já estudadas por ARAÚJO(1992) e por SILVA(1996).

- boas propriedades aglomerantes, adesivas e de recobrimento na forma de membranas de cobertura²⁹;
- alta durabilidade sob exposição a agentes agressivos - ácidos e álcalis - e sob ação de calor e raios ultravioleta;³⁰
- baixíssima absorção de água (nas resinas de alta densidade), podendo perfeitamente ser empregado como impermeabilizante;
- extrema facilidade de moldagem, entre outras.

Verificando-se essas qualidades intrínsecas ao polímero, nota-se que este pode muito bem interagir e complementar vários outros materiais, cujas propriedades são deficientes nesses pontos apresentados.

Desta maneira, a potencialidade de emprego das resinas PU na Construção Civil pode ser resumidamente demonstrada nos exemplos listados abaixo:

- *Adequabilidade às exigências ambientais.* Isso decorre de se tratar de um produto proveniente de recursos naturais renováveis e da sua não-toxicidade, tanto nas fases de manipulação e aplicação, quanto em situações de utilização, associadamente ou não, a outros elementos da construção. Nesta mesma linha, e sob o aspecto da proteção ao meio ambiente, podem ser também buscadas alternativas que privilegiem o emprego de materiais originários de rejeitos ou de resíduos industriais em associações com esta resina PU;
- *Minoração do dispêndio energético* para o condicionamento térmico de edifícios. Essa possibilidade pode ser obtida através da introdução ou associação da PU com diversos componentes e elementos utilizáveis no fechamento desses edifícios. Incluem-se, aí, elementos para cobertura, painéis de paredes tipo sandwich, preenchimento de blocos convencionais de alvenaria, projeção de espuma PU em superfícies de elementos, etc.;

²⁹ Obras como as de FLAUZINO(1983) e de PICCI(1986) abordam as características necessárias para um bom desempenho das membranas de cobertura.

³⁰ Conforme se pode observar pelos resultados de SILVA(1996) e de FERREIRA(1999)

- *Elevada estabilidade física e química* quando sujeita a ambientes ou agentes agressivos. Essa característica foi já avaliada em estudos anteriores para o caso de matrizes de cimento tratadas superficialmente com esta resina PU³¹. Sob o ataque de soluções como de ácido sulfúrico, em concentrações próximas a 25%, elementos de argamassa de cimento impregnados apresentaram baixos níveis de degradação após permanecerem imersos em meio agressivo por um período de 45 dias;
- Como *aglomerante* já se sabe que a resina PU possibilita a confecção e moldagem de elementos pré-fabricados com grande resistência a agentes químicos e satisfatória resistência mecânica; produção de elementos leves visando à utilização em painéis de vedação, e painéis para tratamento térmico e acústico. A resina poliuretana mostrou também ter um comportamento adesivo bastante satisfatório, não só por obturar as fissuras apresentadas pelo concreto, agindo como elemento aderente, preenchendo-as e vedando-as externamente mas, também, servindo como adesivo para elementos de concreto endurecido.
- A *reabilitação de peças deterioradas*, de modo a conseguir o restabelecimento total do monolitismo original pode ser obtida, conforme resultados conseguidos com corpos de prova previamente rompidos e submetidos posteriormente à impregnação, com o polímero;
- Na *constituição de elementos pré-moldados*. Sua facilidade de moldagem possibilita que se façam artefatos pré-moldados para fins diversos, como painéis e paredes hidráulicas, células hidrossanitárias pré-moldadas, pisos especiais, tubulações, etc., principalmente quando estes elementos possam vir a ser empregados sob condições de ambientes agressivos;
- Como *impermeabilizante* utilizável em recintos fechados. Por não apresentar riscos à segurança de quem a manuseia, restrição esta presente na maioria das resinas comerciais, e por ter propriedades impermeabilizantes, esta resina PU é potencialmente indicada para ser empregada nas impermeabilizações em ambientes fechados, como caixas d'água e reservatórios, que poderão ser utilizados logo após a aplicação e cura do polímero sem que se tenha preocupações com desprendimento de substâncias tóxicas na água que irá se consumir.

³¹ Conforme pode ser apreciado no trabalho de FERREIRA, O. P. e ALMEIDA, A. E. F. S. *Revestimentos Poliméricos Para Proteção à Corrosão Bacteriológica do Concreto*. In: ANAIS DO 41º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 1999.

- Como agente responsável *pelo incremento da resistência mecânica* de materiais impregnados. Em ensaios já efetuados, a impregnação de matrizes de cimento com polímero possibilitou o incremento da resistência a compressão, principalmente nos traços de menor conteúdo de cimento. Igual melhoria foi observada com relação à resistência a tração e módulo de deformação.

Além dessas possibilidades, cabe considerar a chamada "resistência específica"³² de um dado material, que consiste na relação entre a resistência e a densidade e é um fator que pode caracterizar a eficiência mecânica do material. Alguns estudos preliminares realizados pelo presente trabalho mostram que no caso de elementos constituídos de pó calcário e espuma de poliuretana derivada do óleo de mamona, chega-se a valores da ordem de 50% abaixo daqueles encontrados para o concreto convencional. Um estudo aprofundado deste, ou de outros compósitos constituídos com resina poliuretana, poderá resultar em elementos de resistências específicas ainda mais promissoras.

2.6 A MAMONA (*RICINUS COMMUNIS L.*)

A mamona (*Ricinus communis L.*), também conhecida como *tártago* ou *higuereta* em muitos países sul-americanos e seu óleo por *Castor Oil* nos Estados Unidos, é um arbusto que pertence à família das Euforbiáceas (ver Figura 4).

É hoje em dia extremamente comum em qualquer tipo de solo em nosso país, embora não seja originária da América do Sul - bagas de mamona de 4000 anos de idade foram encontradas nas pirâmides egípcias, depositadas dentro dos sarcófagos, o que nos faz pensar que auxiliava no processo de preservação das múmias³³ - ela foi introduzida no Brasil, no século XVI, para uso como óleo para iluminação e engraxe dos eixos das carroças em substituição ao óleo de baleia, e pouco a pouco foi se tornando um vegetal tão comum que muitas vezes é considerada uma planta daninha.

- ✓ É um vegetal que se adapta muito bem ao clima tropical e subtropical e que encontra no Brasil excelentes condições de cultivo. Seu óleo essencial, extraído por esmagamento de suas sementes secas, é um triglicéride natural de amplas aplicações industriais; é um óleo não alimentar, mas muito utilizado como laxante, o conhecido óleo de rícino.

³² Essa abordagem pode ser vista nas obras de AGNESINI (1988 e 1988b).

³³ Dados extraídos da reportagem publicada por DIEGUES, F.; AFFINI, M. *Petróleo Verde*. In: REVISTA SUPERINTERESSANTE, ano 5, nº 12, Dezembro de 1991 - Editora Abril, pgs.51 a 54

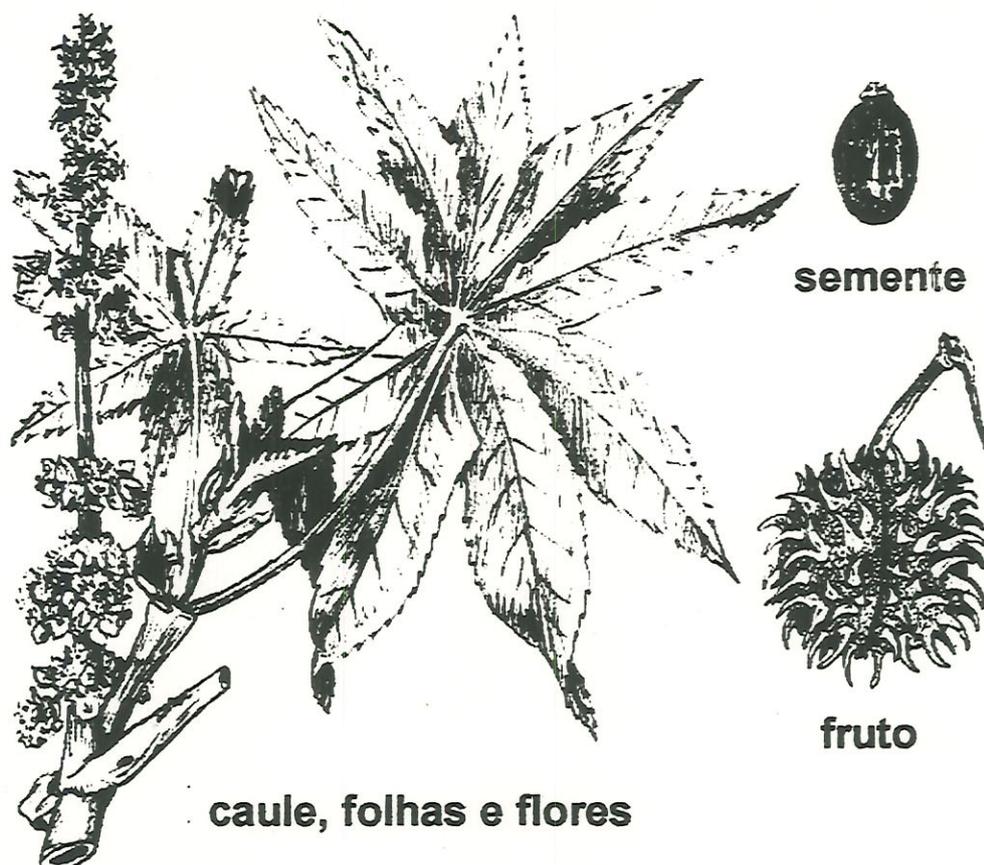


FIGURA 4 A MAMONA (*RICINUS COMMUNIS L.*) COM SUAS FOLHAS E SEMENTES

Fonte: SOLY, A. B. - Botânica - Introdução a Taxionomia Vegetal. Ed. USP, 2ª edição, 1975

Seu cultivo é particularmente interessante pois essa é uma planta bastante rústica, facilmente adaptável a tipos diferentes de solo, aceita regimes climáticos dos mais variados, incluindo os de baixa temperatura e também os de baixa pluviosidade, além de poder ser cultivada em associação com outras espécies de plantas, como a abóbora, a melancia, feijão e outras mais.

Esta última característica é importante para o desenvolvimento agrícola, pois fornece uma melhor oportunidade ao agricultor, que passa a ter renda de cultivos diferentes, ficando assim menos susceptível aos preços de mercado se estivesse operando apenas em regime de monocultura.

A mamona pode ser forte geradora de emprego nas suas fases de plantio e coleta das sementes. No processo de obtenção de seu óleo, como pode ser observado na Figura 5, as usinas compram do agricultor as sementes já secas e sem a casca. Muitas vezes, esse processo de secagem dos bagos com os frutos é feito em terreiros, onde são expostos ao sol em um processo semelhante ao da secagem do café.



FIGURA 5 ESQUEMA DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO ÓLEO DA MAMONA

Esses frutos vão, pouco a pouco, perdendo água até que a casca externa se rompe, expondo as sementes. Estas são separadas da casca, que serve como combustível ou como adubo.

Na usina as sementes são maceradas seguindo um de três processos possíveis: por prensagem a frio, prensagem a quente ou pela utilização de solventes. Desses o que produz o óleo de melhor qualidade é o de prensagem a frio, do qual se obtém, para uma dada massa inicial de sementes, um rendimento de 40 a 50% de óleo puro; os demais processos possuem rendimentos maiores que este, mas produzem óleos de qualidade inferior³⁴. Como subproduto desse processo, o bagaço das sementes pode ser usado tanto como adubo, ração animal ou, na falta de um melhor fim, como combustível vegetal para as caldeiras das próprias usinas.

Para conseguir um lucro maior com seu produto, todo esse processo que vai desde o plantio até a obtenção das sementes já secas pode ser feita pela mesma unidade agrícola, que vende diretamente, ou por intermédio de cooperativas, a produção de suas sementes às usinas.

2.7 O ÓLEO DE MAMONA E SEUS DERIVADOS

As aplicações comerciais do óleo de mamona abrangem os mais variados ramos da indústria e possuem uma enorme versatilidade; são tantos e tão variados que um levantamento abrangente ficaria excessivamente longo. Apenas a título de esclarecimento quanto às áreas em que é empregada, citam-se algumas:

³⁴ Normalmente as indústrias utilizam mais os métodos de prensagem a quente, embora, para fins medicinais, se dê preferência ao óleo obtido por prensagem a frio.

Desde o século XIX, este óleo vem sendo usado, além do uso tradicional em iluminação na substituição ao óleo de baleia, como matéria-prima para a indústria farmacêutica, com o óleo de rícino.

Na indústria de cosméticos, é base de uma infinidade de produtos, incluindo-se aí os batons, cremes e pomadas de vários tipos.

As indústrias químicas o utilizam para obter combustíveis, aditivos e lubrificantes; esses últimos considerados como produto militar estratégico pelos Estados Unidos, pois esse óleo possui a característica de manter suas propriedades lubrificantes em temperaturas de até 30°C negativos, muito aquém da temperatura mínima de trabalho de outros lubrificantes. Usada pela aviação comercial e militar desde a década de 30 é hoje empregada nos modernos jatos e nos ônibus espaciais.

Como curiosidade, no início desta mesma década, primeiro os alemães e, depois de iniciada a guerra, os americanos, influenciaram muito o governo brasileiro para que concretizasse uma política de incentivo ao plantio da mamona e extração do seu óleo, tal o valor estratégico, pelo menos na época, como matéria-prima em substituição ao petróleo. No período da Segunda Guerra Mundial, seu uso foi tão importante que o governo americano conseguiu que produtores tradicionais de café no Brasil mudassem parte de sua cultura para mamona para que o óleo fosse usado como combustível e principalmente como lubrificantes pelo exército americano.³⁵

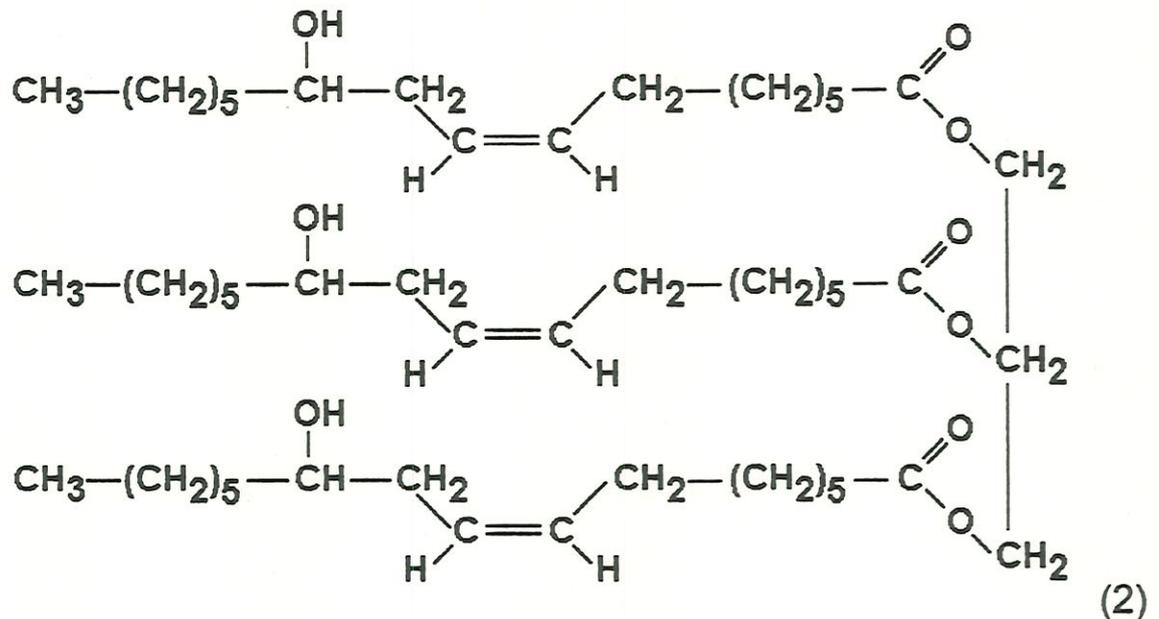
O óleo de mamona após o processamento e síntese, já na forma de um polioli, em associação com um prepolímero, dá origem a um poliuretano com alto grau de confiabilidade e segurança, compatível com as poliuretanas de origem petroquímica, mas com toxicidade quase nula, baixa flamabilidade e, na forma de espuma, não requer agentes expansores externos para se expandir. Por ser de origem vegetal, é 100% renovável, além de ser mais facilmente degradada na natureza ao longo do tempo, se comparadas as de origem mineral.

Essa segurança, principalmente em casos de incêndio comparada à poliuretana de petróleo, faz esse polímero de uso obrigatório em casos onde a segurança dos usuários é o fator preponderante, como o caso de aviões, quer como isolante termoacústico quer como espuma flexível para uso no estofamento das poltronas, devido este polímero não liberar gases tóxicos quando queimado³⁶.

³⁵ Dados levantados pelo autor com antigos produtores de café da região de Jaú, SP.

³⁶ Ver artigo de AGNELLI J. A. M. & GALLO J. B. - "Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio". In: POLÍMEROS: CIÊNCIA E TECNOLOGIA - ABPol, ano 8, nº 1 - Jan/Mar 1998, pgs. 23 a 37.

Observando suas características químicas, conforme descreve ARAÚJO(1992), em termos potenciais de síntese de resinas poliuretanas, o óleo de mamona age quimicamente como um triol, por possuir três grupamentos -OH secundários (não terminais), o que acaba por deixa-lo, *in natura*, pouco reativo em relação a grupos -NCO.



EQUAÇÃO 2 O ÓLEO DE MAMONA MOSTRANDO SEUS PRINCIPAIS PONTOS DE MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS.

Fonte: SILVA, I. J. - Contribuição ao estudo da utilização da resina poliuretana à base de óleo de mamona na Construção Civil, 1996. 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo).

Observando-se a Equação 2, pode-se notar que este óleo tem como componente principal o ácido 12-hidroxioléico (também conhecido como ácido ricinoleico), esterificado com a glicerina. Possui um sítio de insaturação, ou dupla ligação olefínica, entre os carbonos 9 e 10 do ácido ricinoleico e uma hidroxilano carbono 12.³⁷

Esses três sítios de ataque químico conferem ao óleo de mamona uma excepcional versatilidade como matéria-prima oleoquímica. Esta versatilidade, aliada ao fato de ser, provavelmente, o único produto natural com pureza próxima da analítica (grau P.A.)³⁸, o torna um produto ímpar do ponto de vista tecnológico conforme comenta ARAÚJO(1992).

³⁷ Dados apurados pelo autor junto à equipe do GQATP-IQSC/USP e também referenciados por SILVA(1996) na sua dissertação de mestrado.

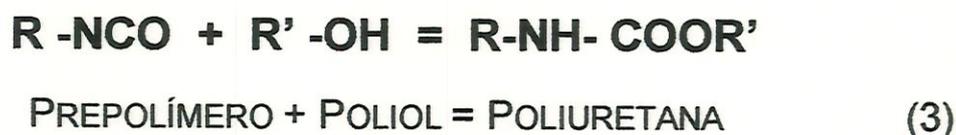
³⁸ O óleo de mamona possui 89% do triglicerídeo do ácido ricinoleico.

O óleo de mamona tem, como principal característica, exatamente os três sítios distintos para preparação de vários derivados industriais. Tem também uma excepcional estabilidade química, não oxidando facilmente. Para as reações uretanas, o óleo de mamona deve satisfazer um certo padrão de pureza, baixa acidez e técnicas de controle de qualidade específicas conforme comenta SILVA(1996).

As resinas poliuretanas, tanto as derivadas de petróleo, quanto as da mamona, são geralmente sistemas bicomponentes, onde dois elementos reagem entre si, polimerizando-se em períodos de tempo entre poucos segundos a até 30 minutos ou mais.

No caso das poliuretanas vegetais, os resíduos de seu processo de polimerização (do tipo reação por condensação), para o caso da resina de espuma, são o gás carbônico (que efetivamente irá formar as células de espuma) e água.

A Equação 3 e a Figura 6 ilustram melhor essas características colocadas.



EQUAÇÃO 3 REAÇÃO DA POLIURETANA DE ORIGEM VEGETAL

Fonte: GQATP – IQSC/USP

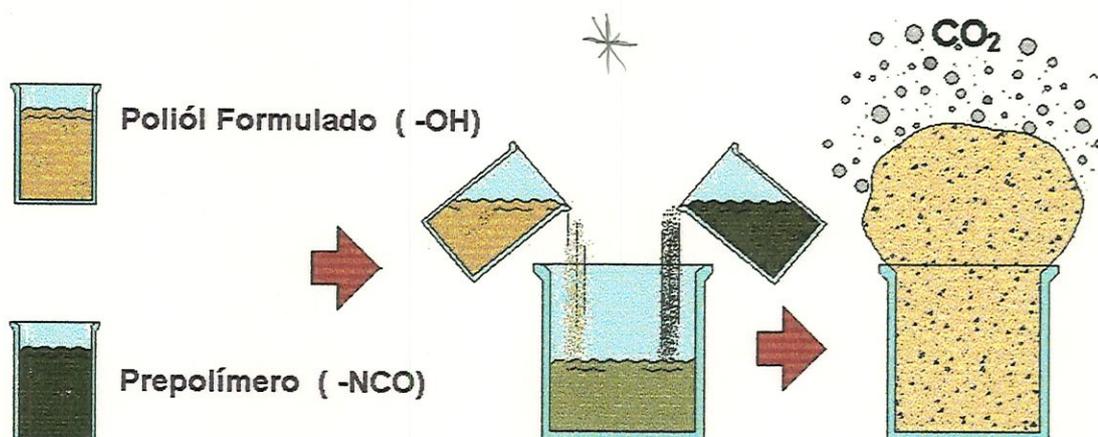


FIGURA 6 REAÇÃO DE EXPANSÃO DA POLIURETANA

(Fonte: GQATP – IQSC/USP)

As espumas rígidas de poliuretano podem ser definidas pela espuma resultante da reação de um polioliol, poliéster ou poliéter formulado com diisocianatos³⁹. Como resultado, tem-se um produto homogêneo cujas células, orientadas no mesmo sentido, são unidas pela própria estrutura de suas paredes, devendo, por isso, ser considerado uma macromolécula e não um aglomerado de grânulos. Pode-se, em alguns casos, segundo GUEDES(1987), considerar que essas espumas possuem capilaridade nula.

Conforme cita ARAÚJO(1992), a viabilidade do sistema PU resulta da abundância de espécies poliidroxiladas (que formam os polióis) e da disponibilidade no mercado nacional de diisocianatos com preço baixo, tornando-a competitiva frente a outros polímeros existentes no mercado.

Assim como para outros polímeros, as propriedades dos vários tipos de poliuretana dependem primariamente de sua massa molecular, grau de entrecruzamento, forças intermoleculares, rigidez dos segmentos da cadeia e cristalinidade. Uma propriedade importante das poliuretanas é a versatilidade quanto à variação de suas estruturas.

As poliuretanas são sempre mencionadas como exemplo de materiais que combinam alta resistência mecânica com elevado grau de estiramento antes da ruptura (% de alongamento).

Quando se trata de materiais não-rígidos, tais como borrachas e geleadas, a ruptura ocorre com percentagem de alongamento inferiores a 1%, mas, conforme ARAÚJO(1992), para similares PUs este estiramento pode situar-se entre 50% e 150% antes da ruptura.

Essa combinação de propriedades básicas das poliuretanas, levam a combinação de enormes resistências ao impacto e abrasão, além de excelente resistência à maioria dos líquidos orgânicos na forma de óleos e fluidos, colocando as poliuretanas em posição de destaque frente a outros polímeros.

Em 1983, o Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP), iniciou no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, (IQSC-USP), a pesquisa e desenvolvimento de polióis para poliuretanas, cujo objetivo principal foi desenvolver materiais para aplicações em telecomunicações, o que permitiu adquirir conhecimento na área de síntese de intermediários para resinas PUs.

A reação de polimerização ocorre pela mistura a frio do polioliol (baseado no óleo de mamona) com o prepolímero. O tempo de início de reação varia conforme a formulação do polioliol; as mais reativas (levando poucos segundos para iniciar sua reação) e que possuem

³⁹ Nessas formulações são adicionados ao polioliol agentes de expansão químicos (água), catalisadores e surfactantes, no caso da poliuretana de espuma de origem vegetal.

a característica de serem nitidamente exotérmicas, são as poliuretanas de espuma. De um modo geral, nas resinas poliuretanas, a polimerização se completa (para uma dureza parcial) sejam elas de espuma ou não, ocorre aproximadamente dentro de um intervalo médio de tempo de 90 a 120 minutos. Na realidade, grau de entrecruzamento das poliuretanas é diretamente proporcional a sua idade. Imediatamente depois de formada, as poliuretanas apresentam um baixo índice de entrecruzamento de suas moléculas, índice este que, ao passar do tempo, vai gradualmente aumentando, levando vários dias para atingir um ponto próximo de seu máximo. Quanto maior o seu grau de entrecruzamento, maior será as resistências mecânicas apresentadas pela poliuretana.⁴⁰

Nesta pesquisa apenas algumas propriedades das resinas PUs de mamona foram investigadas; o mesmo acontece com os compósitos originados pela associação da resina com matrizes de cimento Portland ou com outros materiais. A avaliação da resina se deu considerando a espuma de poliuretano de mamona como aglomerante de cargas minerais, originando compósitos de argamassa e concretos poliméricos, ou concretos de resina.

Concreto de resina é definido, pelo AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI, (1993), como um compósito constituído de matriz de polímero e *filler*, preparado através da mistura completa da matriz polimerizável (monômero ou resina) e agregados (graúdos e miúdos), seguida de polimerização "*in situ*"⁴¹

As espumas poliuretanas derivadas do óleo de mamona formam uma grande família de polímeros que possuem as mais variadas aplicações e têm como principais características os seguintes pontos:

- propriedades reológicas favoráveis (viscosidade, fluidez e tixotropia⁴²);
- tensões superficiais, umedecimento (poder umectante) e penetração capilar altos;
- endurecimento e cura acelerados; e
- grande economia.

A utilização das espumas poliuretanas derivadas do óleo de mamona poderá vir a substituir as espumas poliuretanas derivadas do petróleo em muitas de suas aplicações. *Revestimentos termo-acústicos* poderão vir a ser substituídos por esse novo material sem detrimento das qualidades que estes já apresentam. Ao contrário, em situações de

⁴⁰ Como poderá ser visto mais adiante, o tempo necessário para que as poliuretanas atinjam suas resistências mecânicas máximas é de aproximadamente 30 dias.

⁴¹ ver item 2.2 deste trabalho.

⁴² Qualidade que confere uma diminuição da viscosidade dos líquidos quando esses são agitados.

incêndio, os vapores e gases produzidos pela queima desse componente não são nocivos ao ponto de comprometer a segurança dos usuários⁴³.

Já estão em andamento estudos para a aplicação das resinas PU derivadas do óleo de mamona sob a forma de base para *tintas e vernizes*, gerando um verniz náutico de grande potencialidade no revestimento e proteção de peças de madeira; como *impermeabilizante* de uso geral, empregado em ambientes internos e externos com adição de cargas minerais inertes, com alto grau de elasticidade e impregnação em peças de cerâmica, argamassas e em concreto aparente, podendo até, se aplicado em lajes de cobertura, substituir o uso de coberturas convencionais com perfeito isolamento da umidade e com bons desempenhos térmicos.

Como *adesivos* para uso geral, já tendo obtido a classificação de adesivo aeronáutico, dada a sua grande resistência e poder de adesão; possui grande potencialidade de emprego pelo seu relativo baixo custo, se comparado aos adesivos aeronáuticos tradicionais, grande resistência mecânica a tração, alta penetrabilidade, e baixo módulo de deformação, o que o torna resistente a vibrações.

Por último, possui características bastante interessantes como *aglomerante* em substituição ao cimento, na forma de resinas de alta ou de baixa densidade, produzindo argamassas poliméricas com características bastante próximas às do concreto celular.

Antes de entrar na questão dos ensaios já realizados, convém ressaltar que esta resina poliuretana de mamona constitui-se não apenas de um único produto e sim de uma grande família de polímeros com as mais diferentes formulações e com aplicações das mais diversas. Dentre essas, pode-se destacar uma com que estão sendo produzidos implantes ósseos com resultados extremamente promissores. Especificamente em Construção Civil, já estão desenvolvidos alguns produtos comerciais, para aplicação como vernizes, adesivos e impermeabilizantes para concretos e argamassas.

2.7.1.1 Poliuretanas de Petróleo

Quando se fala em poliuretanas, uma das primeiras imagens que vêm em mente são as espumas desse material. A poliuretana tem sido amplamente utilizada industrialmente ao longo das últimas cinco décadas. Ela tem tido uma alta receptividade no mercado e adquirido uma boa reputação quanto à sua natureza e quanto à sua alta qualidade como produto final. Contudo, essas espumas têm enfrentado pesadas e duríssimas críticas ao seu uso devido a utilizarem, em muitos casos, o CFC como agente expensor, composto químico que é, comprovadamente, nocivo à camada de ozônio da atmosfera.

⁴³ O artigo de AGNELLI(1998) aborda o problema da resistência ao fogo e o grau de segurança que os polímeros devem apresentar.

Uma outra característica extremamente negativa é que as poliuretanas de petróleo são altamente tóxicas sob condições de incêndio. Além de serem bastante inflamáveis, ao queimarem exalam gases extremamente tóxicos (cianeto), que podem ser letais em poucos minutos de exposição.

Comercialmente pode-se encontrar basicamente dois tipos de espumas poliuretanas: as flexíveis e as rígidas⁴⁴. A maioria dos estofamentos de espuma PU que se conhece é deste material, elas possuem geralmente a cor amarelada e, dependendo da sua densidade e do grau de interligação de suas células, podem ser mais ou menos flexíveis. A propriedade de rigidez da espuma está relacionada ao grau de entrecruzamento do seu polímero; assim, quanto maior seu grau, mais rígida é a espuma. Por razões estruturais, as espumas flexíveis são pouco utilizadas na Construção Civil, onde se aplicam muito mais as rígidas.

Basicamente este estudo contempla duas classes dessas poliuretanas: as de alta densidade (entre 900 e 1100 kg/m³ ou 0,9 e 1,1g/cm³) e as de baixa densidade (entre 20 e 70 kg/m³ ou 0,02 e 0,07g/cm³) ou seja, as que não produzem espuma na sua polimerização e as que a produzem, quer na forma de espuma rígida, quer na forma de espuma flexível. Nesses dois últimos casos pode-se ter espumas de células abertas (de constituição semelhante a esponjas) e células fechadas (na forma de bolhas fechadas).

2.7.1.2 Poliuretanas vegetais

As poliuretanas vegetais e em particular as de mamona diferem muito das derivadas de petróleo. Além do aspecto de sua matéria prima ser proveniente de recursos vegetais, e portando renováveis, as principais diferenças se pode encontrar são que as poliuretanas de mamona são bastante resistentes aos agentes agressivos, tanto ácidos como alcalinos e a uma ampla gama de solventes. Não são inflamáveis como as de petróleo e, quando queimadas, não emitem gases tóxicos. Outras características como densidade e capacidade de isolamento térmico são compatíveis com as encontradas nas poliuretanas do petróleo.

Trabalhos recentes, procedidos pelo Eng. Isac José da Silva na sua dissertação de mestrado⁴⁵, e pelos estudos realizados por FERREIRA(1999)⁴⁶ demonstram o grau de resistência de corpos de prova de argamassa de cimento submetidos a um tratamento por

⁴⁴ Uma terceira categoria, classificada como "espumas semi-rígidas" possui características de dureza com um valor intermediário entre essas duas.

⁴⁵ SILVA, I. J. - *Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil*, Dissertação (Mestrado) - EESC-USP, 1996

⁴⁶ FERREIRA, O. P. e ALMEIDA, A. E. F. S - *Revestimentos Poliméricos Para Proteção à Corrosão Bacteriológica do Concreto*. In ANAIS DO 41º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO -, Salvador, BA, setembro de 1999

impregnação com a poliuretana e posteriormente expostos aos agentes agressivos por imersão em suas soluções por períodos de até 63 dias.

A título de exemplo, foi escolhido um desses ensaios elaborados por SILVA(1996) onde corpos de prova de argamassa de cimento e areia nos traços de 1 parte de cimento para 2, 3 e 4 partes de areia foram imersos em soluções agressivas e posteriormente ensaiados.

O resumo dos resultados finais desses ensaios podem ser vistos na Tabelas 1 e 2, onde estão apresentados os resultados dos testes físicos desses corpos de prova impregnados em comparação aos que não sofreram esse tipo de tratamento, nos três traços testados.

TABELA 1 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO ENSAIADAS						
Norma utilizada: ASTM C-267 - Chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacings.	Argamassa tratada com poliuretano			Argamassa não tratada		
(traços em massa)	1:2	1:3	1:4	1:2	1:3	1:4
Absorção de resina (%)	1,7	3,1	7,7	0,0	0,0	0,0
Absorção de água por imersão (%)	0,06	0,09	0,11	7,3	9,6	9,7
Resistência a solução ácido clorídrico 10% - HCl (% de perda de massa dos 28 dias)	+0,1	0,0	-1,7	-17,9	-17,1	-14,7
Resistência a solução ácido sulfúrico 10% - H ₂ SO ₄ (% de perda de massa aos 28 dias)	+2,7	+3,2	-0,2	-16,9	-17,0	-13,3
Resistência a solução ácido acético 10% - CH ₃ CO(OH) (% de perda de massa aos 28 dias)	+1,6	+1,1	+0,2	-17,6	-18,5	-13,5
Resistência a solução a 20% Cloreto de Sódio - NaCl (% de perda de massa aos 63 dias)	+0,5	+0,8	+0,9	-0,1	-0,3	-0,9
Resistência a solução a 10% Cloreto de Sódio - NaCl (% de perda de massa aos 63 dias)	+0,6	+0,6	+0,6	+0,7	+0,6	+0,7
Resistência a solução Hipoclorito de Sódio a 10% (% de perda de massa aos 63 dias)	+1,1	+1,1	+0,1	+0,8	+1,2	1,0
Água do mar (% de perda de massa aos 63 dias)	+0,2	+1,1	+1,1	+1,0	+1,1	+1,1
Fonte: SILVA, I. J. - "Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana à Base de Óleo de Mamona na Construção Civil", Dissertação (Mestrado) - EESC-USP, 1996.						

O que se pode notar, por esses valores, é que a impregnação dos corpos de prova de argamassa de cimento confere à matriz uma resistência química apreciável aos agentes agressivos bastante elevada. Nas soluções de ácido sulfúrico a altas concentrações, os resultados atestam que a poliuretana teve ótimo desempenho. Nos seus testes, SILVA(1996) comenta que "os corpos de prova não tratados com resina poliuretana foram submetidas às soluções ácidas por um período de 7 dias, os corpos de prova tratados com a resina poliuretana foram submetidos às soluções ácidas por um período de 28 dias. Nas

demais soluções agressivas tanto os corpos de prova tratados como os não tratados superficialmente foram submetidos a essas soluções por um período de 63 dias.”

A Tabela 2 mostra o desempenho de corpos de prova de argamassas de traços cimento/areia de 1:2, 1:3 e 1:4 que, após terem sido submetidos ao ataque químico, foram ensaiados a compressão. Os valores mostrados abaixo se referem a médias simples de 6 corpos de prova.

Reagentes	Dias de Imersão	Resistência a compressão dos traços (MPa)		
		1:2	1:3	1:4
Referência	-	58,5	38,4	39,8
Ácido Sulfúrico 25%	28	36,4	25,7	28,0
Ácido Sulfúrico 10%	28	37,7	27,4	29,3
Ácido Acético 10 %	28	38,4	28,2	32,0
Ácido Clorídrico 10%	28	37,0	26,7	30,3
Hidróxido de Sódio 20%	63	58,7	37,7	39,4
Hipoclorito de Sódio 10 %	63	58,9	37,9	39,4
Cloreto de Sódio 20%	63	58,7	38,7	39,9
Água do mar	63	59,0	37,7	40,4

Fonte: SILVA, I. J. - "Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil", Dissertação (Mestrado) - EESC-USP, 1996.

A Figura 7 mostra o aspecto de corpos de prova de argamassas de cimento e areia revestidos de resina poliuretana e submetidos a um meio agressivo ácido por um período de vários dias, notar a diferença entre o corpo de prova revestido e o de controle (sem revestimento).

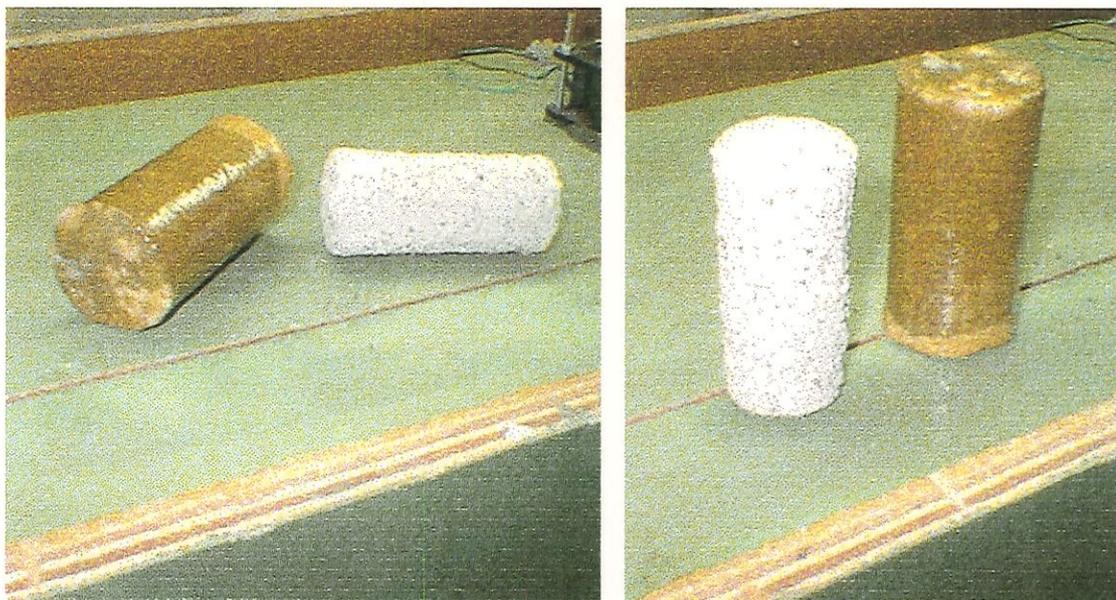


FIGURA 7 ASPECTO DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO COM AGENTES AGRESSIVOS

O comportamento comparativo desses corpos de prova, tanto os de referência, quanto os que foram submetidos a meios agressivos, pode ser mais bem visto pelo Gráfico 1:

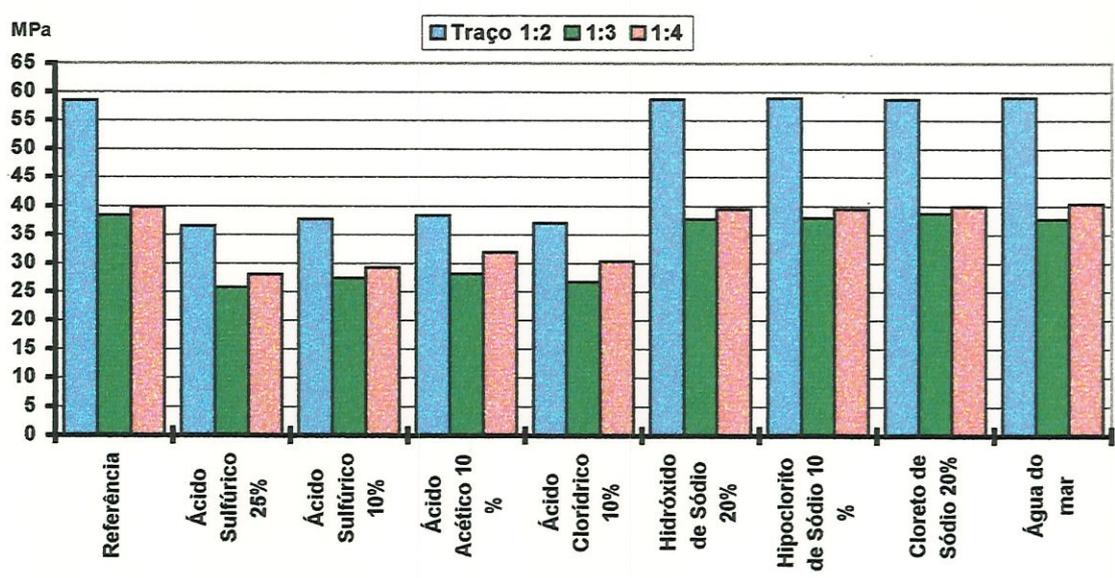


GRÁFICO 1 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS SUBMETIDAS AO ATAQUE QUÍMICO.

Fonte: SILVA, I. J. - "Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil", Dissertação (Mestrado) - EESC-USP, 1996.

TABELA 3 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO ENSAIADAS

	Argamassa tratada com poliuretano			Argamassa não tratada com poliuretano		
	(traços em massa - cimento : areia)	1:2	1:3	1:4	1:2	1:3
Absorção de resina (%)	1,7	3,1	7,7	0,0	0,0	0,0
Resistência a compressão (MPa)	58,1	38,2	39,1	50,9	30,1	18,3
Resistência a tração (MPa)	5,2	3,7	3,1	4,9	2,4	1,7
Módulo de deformação (GPa)	23,6	21,7	22,3	21,5	19,6	16,6
Absorção de água por imersão (%)	0,06	0,09	0,11	7,3	9,6	9,7
Resistência a abrasão (% perda de massa)	0,5	0,7	0,7	2,1	2,5	3,6

Fonte: SILVA, I. J. - "Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil", Dissertação (Mestrado) - EESC-USP, 1996.

Pelos valores apresentados na Tabela 3, pode-se notar que os corpos de prova de matrizes de cimento impregnados com poliuretanas vegetais apresentam melhor desempenho em meio agressivo que corpos de prova sem essa proteção, o que leva a concluir que a resistência química desse polímero é satisfatória.

2.7.2 Poliuretanas de alta densidade

Poliuretanas de alta densidade possuem a característica de não se expandirem quando da mistura de seus dois componentes (poliol e prepolímero) formando polímeros de densidade entre 1,0 e 1,2 g/cm³, constituindo-se resinas adequadas à impregnação de matrizes de cimento, conforme se viu anteriormente⁴⁷.

Essa categoria de resina, em presença de umidade, tende a reagir com a água durante sua polimerização, liberando uma certa quantidade de dióxido de carbono, incorporando bolhas e diminuindo sua massa específica proporcionalmente à quantidade de água presente nos componentes.

Devido a essa característica, a preocupação em se utilizar cargas o mais secas possível se justifica quando o objetivo é a obtenção de compósitos densos e, conseqüentemente, de maiores resistências mecânicas. Uma pequena quantidade de umidade presente nos

⁴⁷ Muitas das citações sobre o comportamento dos materiais empregados são decorrentes das observações feitas ao longo do tempo já que, desde 1996, o autor trabalha intimamente com esses materiais. Paralelamente a isso, o estreito contato que o grupo de pesquisas do Laboratório de Construção Civil tem com o Grupo de Química Analítica e Tecnologia dos Polímeros permite uma troca muito ampla de informações.

agregados é o suficiente para que a resina se torne expansível, reduzindo a massa específica do compósito.

As poliuretanas de alta densidade podem apresentar um maior *potlife* que as de baixa densidade⁴⁸. Este tempo varia entre 20 e 30 minutos após a mistura de seus componentes e a presença de água. Além de torná-los mais leves, diminui seu *potlife*.

Como principais utilizações, esse tipo de resina encontra emprego como elastômero com capacidade de resistir a grandes deformações (da ordem de 150% de suas dimensões originais); como vernizes e como aglomerantes de argamassas para reparos de elementos estruturais de concreto de cimento Portland comum.

Potencialmente, essas resinas se assemelham muito às características das resinas furânicas, empregadas nos países da CEI (antigo bloco soviético), tanto no que diz respeito às suas propriedades físicas e mecânicas, quanto nas suas qualidades químicas⁴⁹.

Essas resinas podem ser perfeitamente aplicadas como impermeabilizantes sem qualquer tipo de adições (desde que não sofram um ataque severo de UV no caso de uso de isocianato alifático e poliol vegetal⁵⁰) ou com adições de dióxido de titânio (TiO₂) para os casos em que seu emprego vise impermeabilização de lajes de cobertura e outras aplicações em que haverá sua exposição aos raios ultravioleta do Sol. Esse tipo de resina também se presta como aglomerante de argamassas e concretos polímeros, concretos poliméricos sem finos⁵¹, revestimentos para pisos, etc., com boas características mecânicas, boa trabalhabilidade, facilidade de aplicação e, principalmente, excelentes características de resistência química.

2.7.3 Poliuretanas de baixa densidade

Como foi dito, existem dois tipos de resinas poliuretanas de baixa densidade: as flexíveis, que se assemelham muito às espumas empregadas em estofados e colchões, podendo ser mais ou menos elásticas, e as rígidas que possuem elasticidade bem menor que as

⁴⁸ Contudo, as resinas de alta densidade também podem ter seu *potlife* bastante reduzido, dependendo da formulação empregada.

⁴⁹ Ver artigo de SOLOVJOV(1994) (*Furan resin polymer concrete in the Commonwealth of Independent States (CIS)*). In: ACI MATERIALS JOURNAL, march-april, 1994, pgs. 158-160, onde se pode ver com mais detalhe o enorme emprego que este polímero tem como aglomerante de concretos de resina.

⁵⁰ Testes realizados demonstram que a poliuretana tende a amarelar sob a ação do UV. Testes mais extensos estão sendo realizados para determinar quais as conseqüências uma exposição prolongada ao UV, principalmente com relação à sua elasticidade e às suas resistências mecânicas; contudo, estudos preiiminares já indicam que a exposição ao UV aumenta o grau de entrecruzamento da poliuretana, aumentando sua resistência mecânica e reduzindo a sua elasticidade.

⁵¹ Concretos ditos *sem finos*, são os que não possuem adições de agregados miúdos em suas formulações.

primeiras, e são normalmente empregadas como absorventes acústicos e no isolamento térmico⁵².

Seu *potlife* normalmente é bem menor que o encontrado nas resinas de alta densidade, situando-se entre poucos segundos até cerca de 5 minutos. Sob certos aspectos pode-se afirmar, dentro das resinas REC, utilizadas por este estudo, que as mais "rápidas", ou seja, com maior velocidade de polimerização⁵³, têm por característica se expandirem mais que as mais "lentas". Deste modo, quanto menos densa, ou de menor massa específica, tanto menor será o tempo que ela leva para iniciar sua polimerização após ter seus componentes misturados. Outras formulações que não as contempladas por este trabalho poderão ter seus *potlifes* alterados para melhor adequação de seu emprego.

De modo geral, as resinas flexíveis são pouco empregadas na Construção Civil, sendo utilizadas apenas em alguns casos como absorventes acústicos, aparelhos de apoio e como mata-juntas. As espumas rígidas já possuem uma gama maior de aplicações e são empregadas na confecção de absorventes acústicos, quer na forma de componentes pré-moldados, quer na forma de *spray*, diretamente no substrato através de um aspersor mecânico.

Quando uma certa quantidade de carga mineral é adicionada a essa espuma, ela se torna uma argamassa polimérica. Por ser de baixa densidade, convencionou-se denominá-la de **celular**, por possuir células em seu interior, semelhante ao concreto celular comum constituído à base de cimento.

De um modo geral, em expansão livre, quanto maior for a quantidade de carga empregada, tanto mais densa se tornará essa espuma, pois quantidades elevadas de carga inibem fisicamente a expansão da resina pois, além de comprimir as células de gás de seu interior, as cargas, dependendo da granulometria utilizada, colaboram para o rompimento das células, gerando o escapamento do gás, o que faz com que a espuma não se expanda adequadamente.

Caso se coloque essa massa (resina + carga) em um molde fechado, o que se obtém é uma argamassa polimérica celular de massa específica aparente controlada, conformada ao molde que se empregou e passível de ser produzida em quantidade.

⁵² Geralmente, costuma-se caracterizar as poliuretanas como rígidas, semi-rígidas e flexíveis.

⁵³ Resinas REC mais reativas são as que possuem a característica de se expandirem mais que as menos reativas e, devido a isso, são as que apresentam *potlife* mais curto que essas últimas; entretanto essa regra não pode ser assumida como "*regra geral*" para as demais poliuretanas de origem vegetal.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos experimentais que foram utilizados na pesquisa numa tentativa de caracterizar e viabilizar as argamassas poliméricas celulares de poliuretano vegetal para uso em Construção Civil.

Nem todos os compósitos aqui descritos obtiveram êxito nos seus resultados. A inclusão de vários materiais, e os principais problemas decorrentes de sua utilização servem como um guia para que outros pesquisadores possam tentar outras maneiras de produção, ou mesmo empregar outros materiais sem necessidade de passar pelas etapas de testes descritas abaixo.

São também abordados os procedimentos adotados para os ensaios com essas argamassas, assim como as eventuais adaptações às normas existentes.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS ENVOLVIDOS:

Quando se elege um determinado material para constituir um compósito, uma série de quesitos devem ser cumpridos pelos seus componentes para que se torne possível essa interação.

O primeiro deles é possuir uma resistência mecânica, principalmente a compressão, compatível com a do aglomerante empregado.

O segundo, e ainda mais importante que o primeiro, é que este material deve ser o mais inerte possível em contato com esse aglomerante ou, no caso de interagir com ele, deverá contribuir na melhoria de suas características, ou seja, não deverá influenciar negativamente as características físicas, químicas e mecânicas desse aglomerante.

Outro fator importante refere-se ao porquê da utilização de cargas minerais associadas aos aglomerantes. Como o custo de um aglomerante é, na maioria dos casos, superior aos das cargas minerais, estas são utilizadas para minimizar os custos do compósito.

Preenchendo adequadamente os quesitos acima descritos, qualquer carga pode ser utilizada para esse fim. Obviamente, o uso de algumas cargas apresentam melhores resultados que o de outras, quer nas propriedades mecânicas, quer nas qualidades químicas ou físicas.

Com relação às cargas minerais testadas, dois parâmetros foram de início importantes na sua escolha: em primeiro lugar a disponibilidade e facilidade de aquisição e, em segundo lugar, o custo envolvido na sua obtenção.

3.1.1 Poliuretana de baixa densidade de óleo vegetal

Essas poliuretanas apresentam-se de duas formas: uma de alta densidade que está sendo desenvolvida como elemento para compor sistemas impermeabilizantes e outra de baixa densidade, de espuma rígida, que é objeto de estudos como aglomerante leve para argamassas e concretos celulares poliméricos: o objeto central deste trabalho.

A poliuretana utilizada nesta pesquisa consiste de um sistema bicomponente formado por um polioli específico, que foi denominado REC (*Resina de Espuma para Construção*) e um prepolímero, que é também utilizado em outras resinas poliuretanas vegetais para uso em Construção Civil.

Além desses dois componentes, utiliza-se água como reagente expansor da poliuretana, a qual interage quimicamente com o isocianato contido no prepolímero, liberando CO₂ que provoca a expansão do polímero e confere um incremento na sua resistência mecânica final e na sua rigidez⁵⁴.

Dos compósitos possíveis de serem produzidos, tanto podem ser placas de poliuretano expandido, sem a adição de cargas minerais, quanto, com a adição destas, na forma de argamassas poliméricas leves (as densidades estudadas neste trabalho variaram entre 0,4 até 1,8 g/cm³ e as maiores resistências obtidas chegaram a valores da ordem de 14 MPa).

Sua expansão, sem adição de cargas minerais, é da ordem de 30 a 40 vezes seu volume inicial. Com a adição das cargas essa expansão diminui para números da ordem de 2 a 5 vezes, dependendo da quantidade e da granulometria da carga que está sendo utilizada.

A título de exemplo, na Tabela 4 estão relacionadas as principais características físico-químicas da espuma rígida utilizada como isolamento térmico; convém notar que alguns dados são mais eficientes que os encontrados em espumas poliuretanas derivadas do petróleo, principalmente os relacionados com combustibilidade e resistências químicas.

⁵⁴ Ver Equação 1



TABELA 4 ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE ESPUMAS DE POLIURETANAS DE MAMONA PARA USO EM ISOLAMENTO TÉRMICO

<i>PROPRIEDADES FÍSICAS</i>	<i>VALORES OBTIDOS</i>
Massa específica com expansão livre	20 Kg/m ³ (NBR 11506)
Resistência a compressão a 10% de deformação	0,25 MPa (NBR 8082)
Absorção de água após 48 horas de imersão	0,01% em volume (NBR 6578)
Capilaridade	Inexistente
Coefficiente de condutibilidade térmica (K)	0,024 Kcal/m.h.°C (NBR 12094)
Resistência a adesão, obtida na tração direta	0,12 MPa (NBR 8515)
Tempo de creme	20 segundos (em média)*
Tempo de gel	50 segundos (em média)*
Tempo de toque	120 segundos (em média)*
Combustibilidade	Não propaga chama (NBR 7358)
<i>PROPRIEDADES QUÍMICAS</i>	<i>VALORES OBTIDOS</i>
Resistência a solventes	Adequada ⁵⁵
Resistência a ácidos	Boa
Resistência a álcalis	Boa
Toxicidade	Isenta (ASTM E800)
Gás de expansão	CO ₂ gerado na reação de polimerização
Caráter químico	Neutro, totalmente isento de CFC
* Esses tempos podem ser facilmente alterados pela formulação do polioli empregado Dados fornecidos pelo GQATP IQSC-USP, 1996.	

3.2 ARGAMASSAS DE POLIURETANA DE MAMONA

Inicialmente tomou-se como base que a proporção na qual o polioli e o prepolímero reagem totalmente entre si é obtida da mistura de uma parte em massa de polioli para duas do prepolímero (proporção de 1:2).

Nas investigações preliminares, os resultados de ganhos mais favoráveis de resistência a compressão, às primeiras idades, foram conseguidos com a mistura padrão com relações de componentes de polímero de 1:1,5 e de 1:1; nesta última conseguiram-se os melhores resultados; contudo, nesta última proporção, houve um decréscimo da resistência dos corpos de prova ensaiados em idades mais avançadas. Isso demonstra que há

⁵⁵ Essa poliuretana foi desenvolvida para uso em isolamento térmico para refrigeradores, assim, as necessidades de resistência a solventes são relativas a esse fim.

necessidade, no futuro de se fazer um estudo mais detalhado para checar qual é a proporção mais indicada para a elaboração dessas argamassas.⁵⁶

Esse estudo de proporções em particular, embora se tenham feito vários experimentos, não foi em si alvo direto deste trabalho de investigação, pois se desejava antes conhecer os diversos comportamentos desse tipo de compósito sem que se tivesse a obrigatoriedade de alcançar apenas os resultados o mais promissores possível.

Assim, no desenvolvimento deste trabalho, se deu em uma postura mais investigativa, para que se tornasse possível, no futuro, um maior aprofundamento.

3.2.1 Notações dos traços constados no trabalho

Como *mistura padrão* entende-se o compósito elaborado a partir de um traço de 1:5 entre o aglomerante e o agregado. Como os corpos de prova têm a necessidade de serem moldados um a um, a mistura padrão pode ser também representada pelos valores dos vários elementos constituintes da argamassas.

Assim, um corpo de prova elaborado a partir da mistura padrão conta com, necessariamente, 200,0g de carga (que, ao longo deste trabalho de investigação, foi utilizado o calcário dolomítico) e 20% dessa massa de carga (no caso, 40,0g) compreendida pelo polímero elaborado pela mistura do poliol e o prepolímero, que, por uma normalização desenvolvida, descreve a relação entre esses dois componentes nas formas **1:2**, **1:1,5** e **1:1**, ou seja: relações onde se tem, respectivamente, uma parte de poliol para duas de prepolímero; uma de poliol para uma e meia e, finalmente, uma de poliol para uma de prepolímero.

Normalmente, para obter corpos de prova de densidade da ordem de 1,2 Kg/dm³, misturam-se 200,0 g de calcário, 40,0g de polímero e 30 ou 40,0 g de água para um volume de aproximadamente 200 ml (molde de corpos de prova cilíndricos para argamassa de 100 x 50 mm).

O volume de água não é fator preponderante no processo pois, iniciada a polimerização, parte essa água é expelida; ela no entanto é a responsável pela geração do CO₂ na espumação e pela trabalhabilidade que se deseja dar à massa fresca.

Entretanto, volumes muito altos ou baixos de água, porém, causam ou uma argamassa extremamente líquida e reativa, onde a carga acaba por se segregar, ou uma de trabalhabilidade muito baixa, o que inviabiliza a moldagem.

⁵⁶ Em todos os casos utilizou-se uma quantidade de água na proporção de 15% da massa do agregado utilizado; ou seja: para cada 200,0g de carga, um volume de 30ml de água era utilizada na sua molhagem.

Dependendo da carga utilizada, uma quantidade de água que permite uma boa homogeneização da massa e sua posterior moldagem, sem que esta se apresente muito fluida, é o ideal para as misturas, ficando assim determinada empiricamente a que mais se adaptar a isso.

Outros traços, no entanto, foram testados. No intuito de se estabelecer uma maior clareza, a tabela abaixo (Tabela 5) estão listados como exemplo alguns dos traços pesquisados a partir das notações adotadas e seus correspondentes em massa de cada um de seus elementos constituintes básicos (carga, poliol e prepolímero).

Fora notação ao contrário, caso não se identifique o tipo de carga utilizada, esta é assumida como sendo o calcário dolomítico comum.

TABELA 5 EXEMPLO DA NOTAÇÃO DOS TRAÇOS PESQUISADOS				
NOTAÇÃO	DESCRIÇÃO	QUANTIDADES (g)		
		Carga	Poliol	Prepol.
100 80% 1:1,5	100,0 gramas de carga, 80% de polímero (ou seja: 80,0 gramas de polímero) formado a partir da mistura de uma parte de poliol para uma e meia partes de prepolímero.	100,0	32,0	48,0
200 20% 1:2	200,0g de carga, 20% da massa da carga em polímero (ou seja: 40,0g de polímero), na relação de uma parte de poliol para duas de prepolímero*	200,0	13,3	26,6
275 30% 1:1,5	275,0 gramas de carga, 30% de polímero (82,5g) e relação de uma parte de poliol para uma e meia parte de prepolímero	275,0	33,0	49,5
150 40% 1:1	150,0g de carga, 40% de polímero (60,0g) e relação de uma parte de poliol para uma de prepolímero.	150,0	30,0	30,0
* chamada neste trabalho como <i>mistura padrão</i> .				

Argamassas com adições de outros materiais, como fibras, por exemplo, recebem a notação *c/ fibra* depois da sua nomenclatura normal.

3.2.2 Cargas minerais

Com base no que foi descrito no início do item 3.1, procurou-se testar quais as cargas mais adequadas para se obter compósitos viáveis. A inclusão de aglomerantes minerais, como a cal, o gesso e os cimentos foram feitas na tentativa de se obter um compósito com boas características e se testar se era possível se obter argamassas celulares modificadas⁵⁷.

⁵⁷ Argamassas modificadas possuem, além do cimento Portland, um outro aglomerante na sua composição.

Embora se tenha incluído apenas os materiais mais correntes na Construção Civil, não exclui a potencialidade de outras cargas, que embora não utilizadas, podem vir a compor compósitos promissores⁵⁸. Foram testadas as seguintes cargas:

- Areia fina de rio⁵⁹ (Rio Moji-Guaçu)
- Cal hidratada CH III
- Calcário dolomítico comum
- Cimento Portland branco
- Cimento Portland CP V ARI
- Gesso de fundição
- Gesso hidratado
- Vermiculita
- Areia quatzosa (granul. # 325)⁶⁰
- Calcário calcítico
- Calcário magnesiano
- Cimento Portland CP II E
- Cimento Portland CP V ARI RS
- Gesso de revestimento
- Sílica ativa
- Argila expandida⁶¹

Em alguns casos houve problemas que inviabilizaram o uso dessas cargas em matrizes de polímero, pois os compósitos obtidos não apresentavam boas condições para utilização. Já outras permitiam a formação de compósitos viáveis. Um resumo das informações levantadas de cada uma dessas cargas pode ser visto a seguir:

- **Areia fina de rio:** Não houve problemas com a adição desta carga ao polímero; este se expandiu adequadamente e polimerizou sem maiores problemas. A massa fresca é de boa trabalhabilidade dentro do que se dominou *mistura padrão*⁶². Entretanto, os corpos de prova obtidos com essa carga, embora relativamente resistentes, apresentaram uma alta porosidade e absorção de água.

⁵⁸ Não se deve descartar aqui a potencialidade que os aglomerantes poliméricos possuem como encapsuladores de rejeitos industriais. Uma pesquisa de grande potencialidade seria testar as poliuretanas como aglomerantes de compósitos desta natureza. PINTO (1986) e PABLOS(1995), em suas dissertações de mestrado, estudam o comportamento de compósitos utilizando resíduos em matrizes de cimento Portland. A troca deste aglomerante mineral por um polimérico poderia gerar um estudo de grande aplicabilidade.

⁵⁹ Entende-se por *areia fina* a areia cuja granulometria se ajusta à *faixa 2* descrita na norma NBR 7211. BAUER (1987); PETRUCCI (1979) e RIBAS(1991), entre outros, tratam desse assunto nos capítulos referentes a agregados para concreto em suas obras.

⁶⁰ Uma *areia de granulometria declarada* é uma areia que foi selecionada por um processo de peneiramento onde apenas os grãos de diâmetro igual ou inferior à malha da peneira utilizada são utilizados. No caso em questão, apenas os grãos iguais ou inferiores a #325 mesh ou de diâmetro igual ou inferior a 0,046mm de diâmetro.

⁶¹ Como agregado graúdo na produção de concretos poliméricos celulares.

⁶² Ver item 3.2.1

- **Areia de granulometria #325:** Embora este material seja inerte e portanto não acarrete reações que comprometam a polimerização da poliuretana, sua área específica é extremamente alta, consumindo uma quantidade bastante elevada de polímero no compósito, que apresentou características mecânicas aceitáveis; além disso, dada a natureza da carga, semelhante à areia fina comum, os corpos de prova também apresentaram permeabilidade elevada.

Nos termos do que se chamou mistura padrão, não há como moldar corpos de prova com essa carga; necessariamente há a necessidade de se ampliar sensivelmente o teor de polímero na mistura, bem como o de água.

- **Cal Hidratada:** Antes de descrever o comportamento desta carga, convém lembrar que a cal é utilizada em Construção Civil sob a forma de hidróxidos. Desde a sua obtenção, a partir de sua matéria-prima, o calcário, suas reações envolvem as seguintes etapas:



EQUAÇÃO 4 REAÇÕES DA CAL

Fonte: FALCÃO BAUER - Materiais de Construção, vol1, 1987

- A cal hidratada, Ca(OH)_2 , usada regularmente como aglomerante aéreo, passa por um processo de carbonatação, reagindo com o dióxido de carbono da atmosfera e se transforma novamente em carbonato de cálcio, CaCO_3 , em um processo lento que pode levar vários dias, dependendo da concentração de CO_2 existente na atmosfera e da permeabilidade da argamassa. Essa carbonatação faz com que o material não se preste como carga em matrizes da poliuretana, pois gera, durante sua polimerização, uma grande quantidade de gás carbônico.
- Experimentos feitos com essa carga mostraram que a carbonatação ocorre de forma violenta, inibindo a expansão da argamassa e reduzindo a resistência mecânica final do compósito, demonstrando que, além de impedir a expansão, também interfere na polimerização da poliuretana.
- **Calcários Calcíticos:** Embora se tenham obtido corpos de prova viáveis, dentre os três tipos de calcários analisados este foi o que apresentou os piores resultados. Embora apresente pH de 7,8 e granulometria adequada, os valores obtidos dos testes com compósitos desta carga se situaram sempre em um patamar inferior aos dos outros calcários.

- **Calcários Dolomíticos:** Foram os que apresentaram os melhores resultados em todas as cargas analisadas. Apresentam boa trabalhabilidade no estado fresco, expandem corretamente e não interferem na polimerização da resina. Mais adiante irão se expor detalhadamente suas características⁶³.
- **Calcários Magnesianos:** Também apresenta um bom comportamento em matrizes de poliuretana de mamona. Seu pH de 8,2, embora o mais alto dos calcários, aparentemente não afetou a polimerização, ficando seus resultados pouco aquém dos do calcário dolomítico. Não se procurou uma maior aplicação pois esse calcário é mais difícil de se obter que o dolomítico.
- **Cimentos Portland⁶⁴ e Branco:** Esses materiais se mostraram igualmente incompatíveis com a poliuretana. Os componentes presentes no cimento, em particular o óxido de cálcio, CaO , tendem a reagir com a água de amassamento presente e se transformam em hidróxido, com um pH elevado, seguindo-se um processo semelhante ao descrito com a cal hidratada.
 - Os corpos de prova obtidos apresentaram uma extrema fragilidade e, na fase de moldagem, o adensamento ficou prejudicado pela falta de trabalhabilidade da massa fresca, exigindo uma quantidade de água mais alta que no caso das outras cargas. Além disso, a reação que ocorre é nitidamente exotérmica evidenciando uma grande reatividade dos componentes.
 - Em todos os cimentos testados o comportamento das argamassas foi o mesmo; sendo, deste modo, descartado o emprego de cimentos como carga.
- **Gessos:** Os gessos, tanto na forma de diidrato, como na forma de semi-hidrato (de revestimento ou fundição) influem sensivelmente nas reações de polimerização. Os radicais $-\text{SO}$ presentes no gesso inibem a polimerização da poliuretana, gerando corpos de prova bastante deficientes quanto à resistência mecânica. Também neste caso a reação se apresentou nitidamente exotérmica, acima da condição na qual se utilizou cargas inertes.
- **Vermiculita:** Essa carga apresentou problemas inerentes a elevada absorção de água e de polímero necessários para atingir uma trabalhabilidade adequada no compósito. Os corpos de prova apresentaram baixa resistência mecânica, principalmente à tração, bastando um pequeno esforço feito com as mãos para rompê-los. A reação de polimerização se mostrou deficiente e o corpo de prova, depois de desformado, apresentava grandes falhas de adensamento.

⁶³ O pH medido nas amostras dos materiais ensaiados apresentaram valores de 7,5; a granulometria dessa carga mineral é equivalente às dos outros calcários estudados.

⁶⁴ Foram testados os cimentos Portland CP II-E, CP V ARI e CP V ARI-RS que, independente do tipo utilizado, apresentaram resultados iguais.



- **Silica ativa:** Esta última não se mostrou satisfatória devido à grande área superficial⁶⁵ que apresenta, requerendo uma quantidade grande de polímero (superiores a 50 ou 60% da carga) para envolver adequadamente suas partículas, o que torna essa argamassa mais dispendiosa que aquelas contendo outras cargas.
- Contudo, essa carga é de cor clara, não interfere na reação de polimerização e, dada sua baixa massa específica e o fato de esta apresentar um razoável ganho de resistência em idades avançadas, acima do notado nas argamassas de calcário dolomítico, seu uso pode ser viável quando se deseja um compósito leve como o caso de placas termo-acústicas. Essa carga poderá também ser utilizada como adição nos compósitos poliméricos, celulares ou não.

Com relação ao uso de agregados graúdos, buscou-se mais obter e caracterizar uma argamassa que um concreto propriamente dito. Contudo, alguns testes com argila expandida foram executados e chegou-se à conclusão que esta apresentava um razoável desempenho, sobretudo por ser um elemento leve e, portanto, perfeitamente compatível com o aglomerante utilizado.

- A argila expandida foi adicionada na última etapa de mistura, conforme descrita na Figura 9 antes de a massa fresca iniciar seu processo de polimerização. Esta nova mistura foi lançada aos moldes sem que houvesse maiores problemas e, após 1 hora, o corpo de prova foi desformado.
- Todavia, verificou-se um problema de adesão na interface argila expandida com o polímero de poliuretano. Provavelmente isso decorre da presença de materiais pulverulentos que se apresentam aderidos aos grãos de argila expandida e que, ao misturar com o polímero, este se adere mais a esse pó, comprometendo sua adesão aos grãos da argila. Um melhor preparo deste agregado, limpando-o dessas partículas de pó, fatalmente resultará em corpos de prova de melhores qualidades.
- Por fim, em um teste onde se utilizaram poliuretanas de alta densidade, os resultados obtidos, quer com argila expandida, quer com seixos rolados de pequeno diâmetro, foram bem interessantes.
- A poliuretana de alta densidade também apresentou problemas de adesão na interface com a argila expandida. Há a necessidade de se limpar bem os grãos de argila antes de usá-los como agregados, ou de se estabelecer um outro processo que reduza essa deficiência.

⁶⁵ Entende-se por *área superficial* ou *superfície específica* o grau de espalhamento que uma determinada quantidade de material possui. Assim, quanto mais fino for um material, tanto maior será a área ocupada por ele. Essa medida tem como unidade cm^2/g .

No caso dos seixos, obteve-se um corpo de prova de concreto resina sem finos⁶⁶, que se comportou como um meio poroso ou um filtro grosso. Esse tipo de compósito, considerando que a resina possui uma alta resistência química, poderá ser desenvolvido para se obter filtros para tratamento de água e de efluentes, placas de drenagem e outras aplicações onde se deseje ter uma retenção de partículas sólidas em meio agressivo.

Pode-se concluir que os principais problemas referentes à utilização de determinadas cargas com o biopolímero de mamona se situam nos pontos listados a seguir:

- Determinadas cargas, como as cales e os cimentos, são passíveis de sofrer processos de carbonatação e reagem com o gás carbônico, CO_2 , produzido pela resina, consumindo-o e impedindo que a poliuretana se expanda. Eventualmente, quantidades mínimas desse material poderão ser utilizadas para regular a expansão do compósito.
- Cargas com radicais livres muito reativos, como o caso do gesso, $-\text{SO}$, interferem na polimerização da resina, interrompendo suas cadeias ou dificultando as ligações entrecruzadas; em ambos os casos há um decréscimo acentuado da resistência do aglomerante e devem, portanto, ser utilizadas com muito critério.
- Se a carga se apresentar muito ácida ou alcalina, também há uma interferência sensível na polimerização da resina, alterando suas reações de polimerização e resultando em cadeias poliméricas de tamanhos aquém ou além do necessário para se conseguir um compósito de boa resistência mecânica. Também devem ser usadas criteriosamente.
- Existe a possibilidade de que a forma geométrica dos grãos que determinadas cargas apresentam possam influenciar na ruptura das bolhas formadas pelo polímero em expansão. Uma maior investigação neste campo se faz necessária para obter respostas mais conclusivas, mas do que foi apurado até aqui, há a possibilidade de esta hipótese ser verdadeira.
- Cargas com granulometrias muito finas possuem grande área específica. Assim, quanto menores forem essas granulometrias, tanto maior será a quantidade de espuma necessária para envolver totalmente essas cargas, o que aumenta o custo do compósito pelo volume necessário e, portanto, devem ser usadas apenas quando outras não puderem substituí-la.

⁶⁶ Compósitos sem finos não utilizam agregados miúdos na sua dosagem. O compósito resultante tanto pode ter um alto consumo de aglomerante para preencher o espaço que seria ocupado pelos agregados miúdos, o que o encareceria em demasia, como pode ter o mesmo volume de aglomerante que seria necessário em um compósito normal. Desta última maneira, o volume que seria ocupado pelos agregados miúdos é ocupado por vazios, resultando em um compósito extremamente permeável.

- Já cargas com granulometrias muito elevadas, por outro extremo, podem tornar os grãos excessivamente pesados, o suficiente para que a espuma formada não os carregue adequadamente durante a expansão.
- Agregados graúdos devem ser necessariamente leves, e não podem estar recobertos de *fillers*, caso contrário haverá baixas resistências na interface carga-polímero.

A Tabela 6, resume os resultados obtidos com cada uma dessas cargas. Algumas delas foram testadas com dosagens de 20, 40 e 80% da massa de carga em polímero. Para todas as argamassas se utilizou a relação estequiométrica teórica do polímero (relação de 1:2 entre o polioli e o prepolímero). Os valores de resistência a compressão mostrados são os valores máximos individuais conseguidos nas idades mais avançadas, mas ainda referentes à etapa do trabalho em que se buscou a escolha das cargas:

X

Tipo de carga ⁶⁷	% DE POLÍM.	Resist. Max. (MPa) ⁶⁸	COMPORTAMENTO OBSERVADO
Areia fina de rio	20	3,72	Alta porosidade, compatível para uso em Construção Civil sob estas condições
Areia quartzosa # 325	20	0,76	Mistura muito densa, pouco trabalhável, pouco expansiva.
Areia quartzosa # 325	40	1,02	Ainda pouco expansiva, baixa trabalhabilidade. Corpo de prova final apresentando elevada massa específica aparente.
Cal hidratada CH III	20 e 40	-	Não há polimerização, forte carbonatação, argamassa não expansiva.
Calcário calcítico	20	2,24	Expansão regular, polimerização regular mas com resultados ainda pouco satisfatórios.
Calcário dolomítico	20	6,78	Boa expansão, polimerização correta, uso bastante adequado em Construção Civil, com boa resistência final.
Calcário magnesiano	20	3,36	Boa expansão, boa polimerização com, resultados medianamente satisfatórios.
Cimento (todos)	20 e 40	-	Não há polimerização correta, não expande, argamassa de trabalhabilidade quase nula.
Gesso (todos os tipos, hidratados ou não)	20 e 40	-	Não há polimerização correta, não expande.
Silica ativa ⁶⁹	20	-	Mistura muito densa, pouco trabalhável, pouco expansiva.
Silica ativa	80	3,26	Boa expansão, boa polimerização, boa resistência, resultados satisfatórios.
Vermiculita	20	1,07	Baixa trabalhabilidade, pouca adesão carga-polímero.
Vermiculita	40	1,71	Expansão regular, polimerização satisfatória, baixa resistência.

Ensaio mais extensos com as cargas utilizadas, ou com outras distintas, como o uso de terra como carga⁷⁰, alguns rejeitos industriais e cargas orgânicas, como serragem e casca de arroz, poderiam abrir ainda mais o leque de opções.

⁶⁷ Relação de poliol/prepolímero foi sempre a de 1:2 e foi utilizado 200,0g de carga por corpo de prova produzido. Nas argamassas foi utilizado um volume de água igual a 30% da massa da carga utilizada, salvo nos casos da sílica ativa e da vermiculita e da areia de granulometria #325, que foi utilizado o dobro deste valor.

⁶⁸ Os valores descritos nessa tabela se referem aos resultados obtidos na etapa preliminar de testes; em alguns casos, valores mais expressivos foram conseguidos nas etapas posteriores.

⁶⁹ No caso da sílica e da vermiculita foram elaborados corpos de prova com apenas 100g de carga.

⁷⁰ Ver artigo de PEREIRA, A.; SILVA, S.; SAKAMOTO, W.; CHIERICE, G. *Estudo da Dosagem de Solo-Polímero para Construção de Habitações de Interesse Social*. In: ANAIS DO 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, São Paulo, ABPol, Outubro de 1993, pgs. 55 a 59.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estão colocados, neste item, as etapas iniciais de experimentação, bem como as primeiras hipóteses, problemas e conclusões obtidas. Por se tratar de um material ainda pouco estudado, muitos dos procedimentos adotados nas etapas de experimentação foram decorrência de uma constante experimentação e desenvolvimento.

3.3.1 Os calcários dolomíticos

Optou-se por desenvolver os testes das argamassas com o calcário dolomítico comum. Ele é de fácil obtenção, podendo ser adquirido em sacos de 40 kg em lojas agropecuárias e com baixo custo, pois é muito utilizado como corretor de acidez de solo na agricultura. Além disso, dentre as cargas testadas, foi a que apresentou o melhor desempenho no compósito e as maiores economias, necessitando as menores porcentagens de polímero para se conseguir compósitos viáveis.

As análises termogravimétricas (TGA) revelaram que o calcário em questão se comportava dentro das expectativas do trabalho, como se pode ver no Gráfico 2:

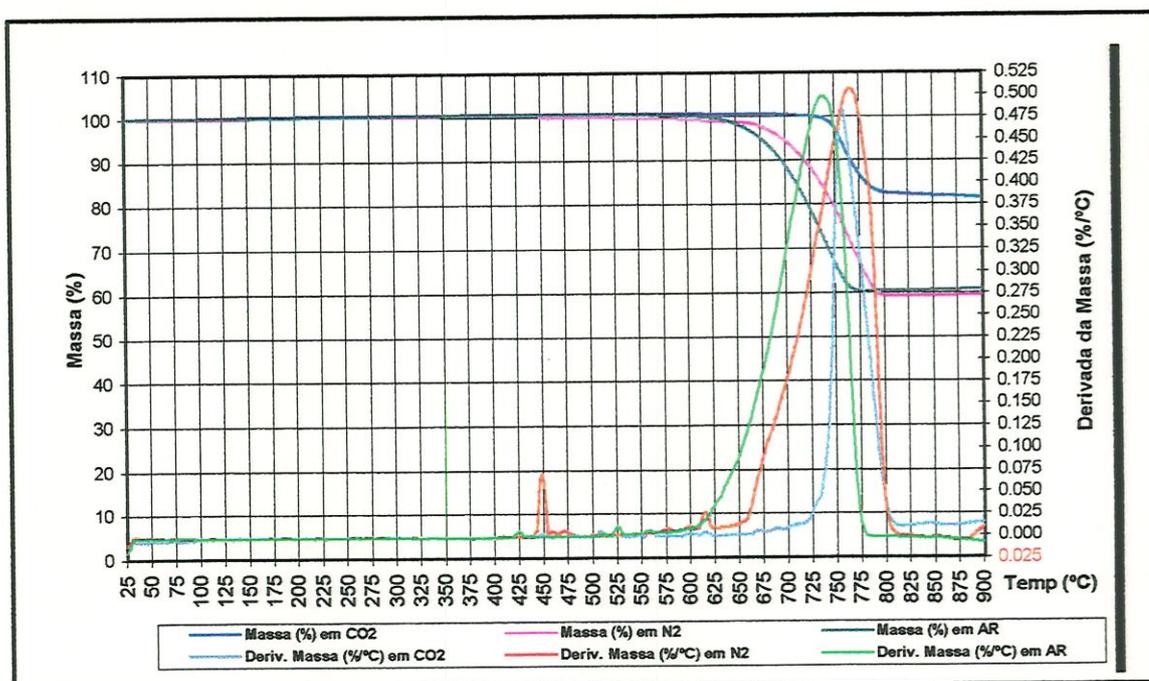


GRÁFICO 2 TGA DO CALCÁRIO DOLOMÍTICO

Dados fornecidos pelo GQATP IQSC/USP

De acordo com o Gráfico 2 quando se chega a temperaturas de 625°C, inicia-se o processo de calcinação do calcário nas atmosferas normal (AR) e inerte (N₂) e em 750°C

para a de CO_2 . Em torno dos 800°C , para qualquer atmosfera, tem-se o fim desse processo.⁷¹

Não se detectou a presença de níveis relevantes de umidade nas amostras ensaiadas, o que seria evidenciado por um decréscimo progressivo da massa até temperaturas da ordem de 100°C . Tampouco há níveis apreciáveis de matéria orgânica nas amostras, pois a massa permanece praticamente constante na faixa entre 200 e 400°C , faixa de temperatura em que, caso houvesse algum tipo de matéria orgânica, esta iria se carbonizar, liberando CO_2 e haveria uma perda de massa visível da amostra. A presença de H_2O na forma de água de cristalização também não foi detectada pelos mesmos motivos, já que a massa ainda se mantém constante até os 600°C .

Assim, em linhas gerais, esse calcário tem por característica ser um pó muito fino, de cor acinzentada clara, possui massa unitária em torno de $1,4 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,1$), massa específica⁷² de $2,9 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,5$) e pH de $7,5$ ($\pm 0,1$); não sofre nenhum processo de carbonatação detectável, é livre de impurezas, bem como não possui propriedades pozolânicas detectáveis.

Esse conjunto de características é de grande valia neste estudo, pois o nível de interferência desta carga junto ao polímero utilizado é virtualmente nulo e, portanto, não contribui para mascarar os resultados dos ensaios feitos com o compósito de poliuretana vegetal, garantindo assim que esses resultados dependerão das características do polímero.

Corpos de prova com $200,0 \text{ g}$ de calcário, $40,0 \text{ g}$ de polímero (20% da massa da carga) e $30,0$ a $40,0 \text{ g}$ de água, chamada, neste trabalho, de *mistura padrão*⁷³, se obtém uma massa fresca bem trabalhável e com facilidade de moldagem. Essa trabalhabilidade é importante para que não se tenha a necessidade de se adensar longamente a argamassa fresca dentro do molde, devido ao curto *potlife*.

Foram detectadas algumas variações na trabalhabilidade em lotes distintos de calcários dolomíticos, provavelmente ocasionadas por uma maior ou menor finura do material. Um

⁷¹ A temperatura mais alta atingida em atmosfera de CO_2 é devido o calcário (CaCO_3), em seu processo de calcinação, liberar CO_2 para se tornar CaO (conforme pode ser visto na Equação 4). Em uma atmosfera saturada de CO_2 essa reação tende a se equilibrar até temperaturas muito mais altas do que seria necessário em outras atmosferas.

⁷² A massa específica e a massa unitária foram determinadas adaptando-se os procedimentos prescritos pela norma NBR 12127 - Gesso para a Construção - Determinação das qualidades físicas do pó. Essa adaptação foi feita devido à natureza pulverulenta de ambos os materiais.

⁷³ Conforme item 3.2.1

pequeno acréscimo (ou redução) de água nas misturas corrige essas variações sem comprometer o compósito.

Contudo, nos ensaios exploratórios realizados, notou-se que em um mesmo lote⁷⁴ havia uma perceptível dispersão dos resultados, principalmente em ensaios mecânicos de resistência a compressão axial simples⁷⁵, além da esperada e admitida por norma para compósitos de aglomerantes minerais, como a cal e o cimento Portland⁷⁶. Mesmo sendo os ensaios realizados com o maior rigor, os resultados ainda se apresentaram com uma certa dispersão.

Nos primeiros ensaios, essa variação nos resultados de um mesmo lote gerou preocupação e foram investigadas várias condições para minimizar tal problema.

As análises da granulometria, pH, massa específica, massa unitária desses agregados não demonstraram nenhum dado que pudesse dar origem a essas variações. Ensaio como análises termogravimétricas feitas no GQATP-IQSC/USP, demonstraram que as composições químicas dos lotes eram extremamente semelhantes e que se comportavam de acordo com o termograma apresentado no Gráfico 2:

Como não há variação dos materiais, o que ficou detectado foi que, dado o processo manual adotado para se efetuar a mistura dos componentes da argamassa, e dado o tempo de polimerização extremamente curto, em inúmeras vezes corpos de prova foram moldados quando a argamassa fresca já estava em vias de, ou efetivamente no início de sua etapa de polimerização, ocasionando o aparecimento de juntas pela formação de pele na superfície da argamassa (ver Figura 11).

Embora se tivesse o cuidado de tentar ampliar seu *potlife*, efetuando-se processos de resfriamento dos componentes, e de otimizar os processos de mistura para um mínimo de tempo possível, estes procedimentos não surtiram o efeito desejado e ainda houveram variações nos resultados.

Os testes foram sempre procedidos mediante método de mistura manual por inexistirem equipamentos adequados que pudessem ser usados para misturar os componentes das

⁷⁴ Na realidade não é possível se fazer uma certa quantidade de massa fresca e se distribuir essa massa em vários moldes. Como já foi comentado, o tempo que o polímero leva, após misturados seus dois componentes, para dar início de sua polimerização é extremamente curto, impedindo que se faça massas frescas em quantidade além daquela necessária para preencher um único molde por vez. Quando se coloca a expressão "lote" se refere muito mais a uma bateria de misturas e moldagens em seqüência, tentando-se manter condições ambientais e repetir as mesmas quantidades e procedimentos rigorosamente iguais.

⁷⁵ Conforme determina a norma NBR 7215 - *Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão*, item 3.6.3.

⁷⁶ Dada as características do compósito polimérico em estudo, e por não haver norma específica para esse tipo de argamassa, procurou-se adaptar a NBR 7215 às condições do ensaio.

argamassas de polímero. Qualquer tentativa de se utilizar as argamassadeiras ou outro método normalmente empregados com os aglomerantes minerais se resultaria inadequado, já que a argamassa polimérica se adere ao equipamento, ficando difícil controlar adequadamente as quantidades de massa fresca a ser despejada nos moldes.

No caso da utilização em Construção Civil, este compósito ganhará muito em qualidade se for aplicado através de processo mecanizado, onde a mistura dos componentes é feita por injetoras apropriadas de grande eficiência, que reduzem o tempo de mistura, permitem um perfeito lançamento aos moldes sem gerar os problemas da ocorrência de bolhas na massa fresca e sem a necessidade de, a cada moldagem individual, se repetir todo o processo de mistura, como ocorre no procedimento manual descrito na Figura 9.

Não foi possível testar a viabilidade de obtenção de corpos de prova pela injeção mecânica nos moldes por vários motivos. O principal tem em conta o alto custo de um equipamento que pudesse efetuar essa operação ou mesmo o tempo e o custo necessários para que se pudesse desenvolver satisfatoriamente um dispositivo experimental que atendesse a essa exigência.

O desenvolvimento desse tipo de equipamento pode ser tentado futuramente, mas não se configurou necessariamente como uma etapa deste trabalho, que se propõe caracterizar e verificar a viabilidade das argamassas poliméricas celulares.

Mesmo tentando-se reduzir as variáveis inerentes a todo esse processo, persiste o problema da dispersão dos resultados, acima do preconizado em norma. Adotou-se, para tanto, uma abordagem estatística mais aprimorada, estabelecendo-se um limite mínimo de confiança em que os valores calculados estariam dentro da confiabilidade prevista em norma⁷⁷.

Assim, optou-se por determinar as características gerais do compósito em estudo através dos procedimentos de mistura manuais, mesmo obtendo-se resultados com variações sensíveis. Com meios mecânicos de mistura, essa variação deve se reduzir pelo aumento da homogeneidade da argamassa produzida mecanicamente e pela redução no tempo necessário até coloca-la adequadamente aos moldes.

3.4 MÉTODOS DESENVOLVIDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES

Sendo o compósito em estudo uma argamassa, os procedimentos utilizados para caracterizar as argamassas poliméricas celulares estudadas foram promovidos com base

em normas e métodos normalmente adotados na caracterização das argamassas de aglomerantes minerais em uso na Construção Civil.

Não se visa, neste estudo, criar parâmetros comparativos entre um aglomerante orgânico (a poliuretana em estudo) com um aglomerante mineral como o gesso, a cal ou mesmo o cimento Portland, mas sim, testar esse novo compósito seguindo os parâmetros adotados para os materiais já conhecidos mediante emprego semelhante.

Todos os procedimentos que envolvem a caracterização da mistura ainda no estado fresco foram descartados pela absoluta falta de condições para realizar o ensaio, visto que o *potlife* das misturas era da ordem de no máximo 1 minuto, tempo que tornava impossível a realização desses ensaios.

Os ensaios com compósitos no estado endurecido foram realizados, determinando-se sua resistência mecânica, tendo este trabalho se baseado nesses ensaios para avaliar o comportamento das argamassas poliméricas celulares. Na tabela a seguir (Tabela 7), apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios exploratórios iniciais.

Em todas as amostras, foi utilizada como carga o calcário dolomítico comum, e os processos de obtenção dos corpos de prova (CPs) foram sempre os mesmos: temperatura controlada em cerca de 21°C, umidade relativa do ar em torno dos 50%, utilização de 30,0g de água para cada argamassa e mistura dos componentes e adensamento manuais. A temperatura ambiente e da umidade relativa do ar foi monitorada por intermédio de uma mini estação meteorológica "*Weather Monitor II*" fabricada pela "*Davis Instruments Inc.*" instalada dentro da sala climatizada onde as moldagens foram efetuadas. Esse rigor foi adotado para que não houvesse suspeitas se a variação dessas condições pudesse afetar os valores dos ensaios.

Além das cargas adicionadas, descritas anteriormente, procurou-se avaliar as características do compósito contendo fibras sintéticas, no teor de 1% da massa total (carga+polímero) na forma de fibras de polipropileno (de 25mm de comprimento por 0,5mm de espessura) para se verificar a influência do uso de fibras nessas argamassas.

Os corpos de prova, após serem lançados nos moldes, foram tampados⁷⁷ e deixados polimerizando por um período de aproximadamente 1 hora, foram depois desformados e

⁷⁷ Ver item 3.6 deste trabalho para um melhor entendimento.

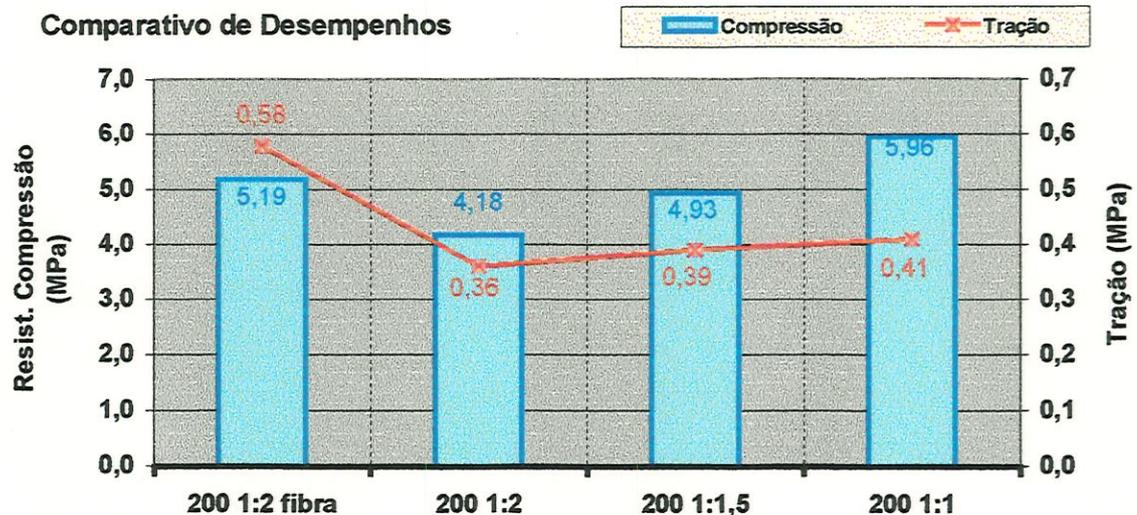
⁷⁸ Ainda nesta fase não se haviam adaptado as formas normalizadas de 100 x 50 mm para moldagens de corpos de prova cilíndricos de argamassa para a configuração de duas tampas rosqueáveis. Nesta época os moldes eram tampados com uma placa metálica presa através de sargentos. Essa configuração ainda não garantia uma perfeita estanqueidade à parte sólida que se perdia em pequenas quantidades durante a expansão.

mantidos sob temperatura ambiente controlada de 21°C (+/-2°C) e umidade relativa do ar em torno de 50% até o momento de serem ensaiados, 3 dias depois de moldados⁷⁹.

CORPO DE PROVA	Calcário (g)	Poliol (g)	Prepolímero (g)	Fibra (g)	Massa seca (g)	Densidade (g/cm ³) ⁸⁰	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
200 20% 1:2 (c/ fibra)	200,0	13,3	26,6	2,4	236,1	1,20	5,19	0,58
200 20% 1:2	200,0	13,3	26,6	0,0	232,8	1,19	4,18	0,36
200 20% 1:1,5	200,0	16,0	24,0	0,0	232,2	1,18	4,93	0,39
200 20% 1:1	200,0	20,0	20,0	0,0	231,9	1,18	5,96	0,41

Valores obtidos experimentalmente

Para a determinação da resistência a compressão, foi ensaiado um conjunto de 6 corpos de prova⁸¹; já para o ensaio de tração por compressão diametral a amostragem foi de 3 espécimes⁸². Em ambos os casos, os valores apresentados são as médias simples dos valores obtidos. Pelo Gráfico 3, a seguir, é possível visualizar esses resultados.



⁷⁹ As etapas de seleção, pesagem e mistura dos materiais, moldagem, cura e estocagem dos corpos de prova foram feitas em sala climatizada, nas dependências do LCC SAP-EESC/USP.

⁸⁰ Os cálculos da densidade dos corpos de prova foi feito através da relação dos valores da massa dos CPs secos ao ar, pelo seu volume. Os corpos de prova não foram secos em estufa para que o calor, necessário para sua secagem, não mudasse suas características mecânicas.

⁸¹ Segundo a norma NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão adaptada às condições do experimento com Argamassas Poliméricas Celulares.

⁸² Conforme norma NBR 7222 - Argamassa e Concreto - Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

GRÁFICO 3 COMPARAÇÃO ENTRE AS PRIMEIRAS ARGAMASSAS EXPERIMENTAIS

Nota: Todas as argamassas continham 20% de polímero, 30,0g de água e foram ensaiados aos 3 dias.

Estão representados os valores obtidos para resistência a compressão na cor azul e de tração por compressão diametral na cor vermelha. Por este gráfico, podem-se obter duas informações importantes:

- Da análise dos resultados das duas primeiras amostras (200 1:2 c/ fibra e 200 1:2; respectivamente argamassas de 200,0g de carga mineral, 20% de polímero na relação 1:2 polioli/prepolímero, com e sem adição de fibras) pode-se ver que há um aumento dos valores de resistência, tanto a compressão (em cerca de 25%) quanto a tração por compressão diametral (em cerca de 60%), Pelo Gráfico 4, podem-se ver mais claramente essas relações: em primeiro plano estão mostrados os valores da resistência a tração e, no segundo plano, os valores de resistência a compressão.

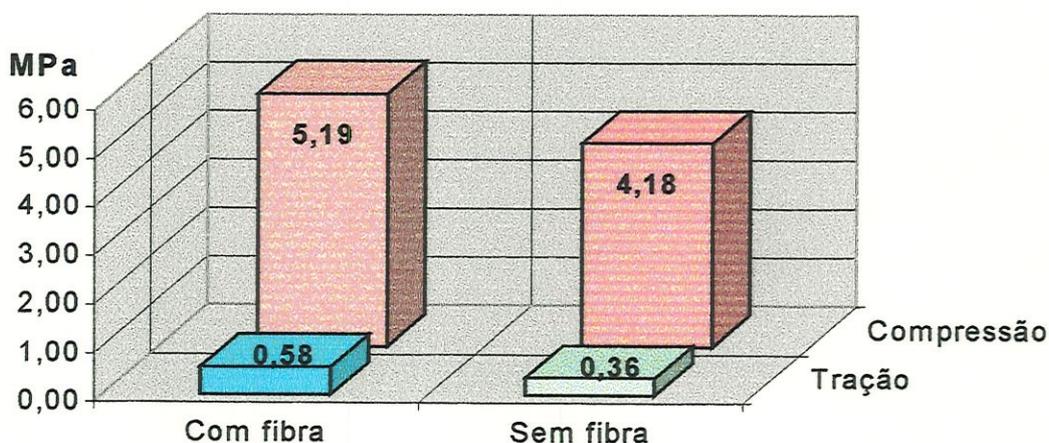


GRÁFICO 4 COMPARAÇÃO ENTRE AS ARGAMASSAS COM FIBRA E SEM FIBRA

Esses valores são bastante expressivos, principalmente no que se refere a resistência a tração, obtida pela sua compressão diametral. Esses resultados foram obtidos a partir da adição de 1% do total em massa da argamassa em fibras de polipropileno de 25mm de comprimento nas argamassas por 0,5mm de diâmetro.

Os resultados, tanto a compressão, quanto a tração por compressão diametral foram interessantes sob o ponto de vista de ganhos de resistência⁸³; contudo, pela dificuldade de se homogeneizar essas fibras em uma massa polimérica de *potlife* extremamente curto, não foram efetuados outros ensaios utilizando-se dessa adição.

Entretanto, verifica-se que a adição de fibras nas argamassas poliméricas celulares,

⁸³ O mesmo comportamento é também encontrado nos casos de matrizes de cimento, armadas com fibras.

possui grandes potencialidades de estudo e pode ser viabilizada quando se dispõe de equipamentos especiais para mistura e injeção nos moldes.

- Um outro ponto que se destaca no Gráfico 3 refere-se ao comportamento das argamassas de traços diferentes, com variação nas quantidades dos componentes do polímero, que, partindo-se de uma mistura de polioli e prepolímero de 1:2; 1:1,5 e 1:1, tendem a aumentar o valor de seus resultados, respectivamente.

O ganho de resistência a compressão se eleva em uma proporção maior que o ganho de resistência a tração, e a relação entre essas cai de 8,6% (1:2), para 7,9% (1:1,5) e para 6,9% (1:1). Isso denota que, embora se majore sua resistência a compressão, o mesmo não acontece, em termos relativos, com sua resistência a tração. (Gráfico 5)

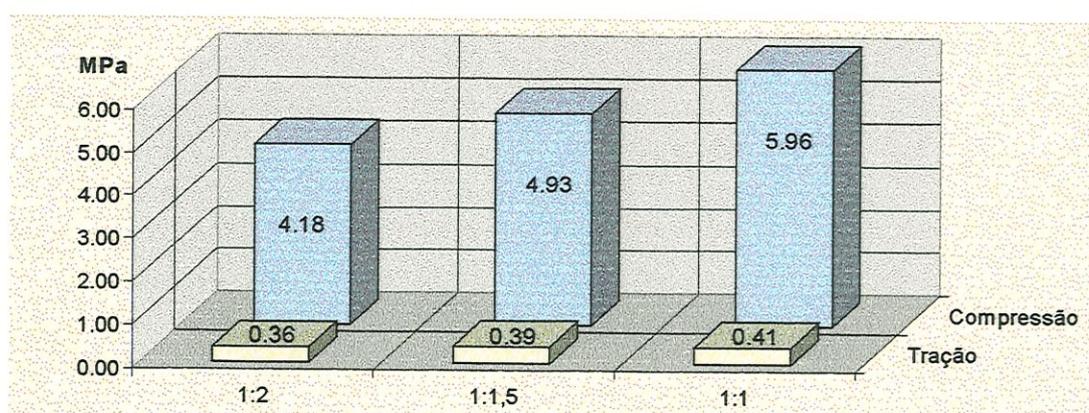


GRÁFICO 5 COMPARAÇÃO ENTRE AS ARGAMASSAS COM RELAÇÕES POLIOLI/PREPOLÍMERO DIFERENTES

Na Tabela 8 essas comparações podem ser mais bem visualizadas.

DESEMPENHO	1:2 (+ fibra)	1:2	1:1,5	1:1
Ganho de resistência a compressão (padrão 1:2 = 1,00) ⁸⁴	1,24	1,00	1,18	1,43
Ganho de resistência a tração (padrão 1:2 = 1,00)	1,61	1,00	1,08	1,14
Resistência a tração (resistência a compressão = 100%) ⁸⁵	11,2%	8,6%	7,9%	6,9%
Eficiência a compressão (resist./dens. - MPa/Kg/dm ³)	4,33	3,51	4,18	5,05
Eficiência a tração (resistência/densidade - MPa/Kg/dm ³)	0,48	0,30	0,33	0,35
Valores calculados baseados em dados experimentais				

Ensaio preliminares com outras cargas também foram realizados e nas mesmas condições acima descritas. Isso se fez para poder comparar o desempenho que as cargas exercem, quer na forma de *mistura padrão*⁸⁶ (200g de carga com 20% de polímero), quer na forma do que foi convencionado chamar *meia mistura*, que corresponde à metade do volume de ingredientes da mistura padrão (100g de carga com 20% de polímero). Isso se fez com o intuito de testar a viabilidade de se conseguir compósitos mais leves que as da mistura padrão e analisar o comportamento dessas argamassas.

Nesses ensaios, foram utilizadas, além do calcário dolomítico, os calcários magnesiano e calcítico, bem como areia fina de rio e areia selecionada de granulometria #325. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9:

⁸⁴ O traço com 200,0g de calcário, 20% de polímero, com relação de 1:2 entre o poliol e o prepolímero e sem a adição de fibras foi utilizado como padrão para permitir a comparação do desempenho desse com os demais traços ensaiados.

⁸⁵ Neste caso, os valores descritos da resistência a tração são porcentagens dos valores nominais da resistência a compressão. Isso se faz para que, dado um valor obtido da resistência a compressão de uma argamassa, se possa estimar o valor da sua resistência a tração.

⁸⁶ Conforme descrito no item 3.2.1.

TIPO DE CARGA	Carga (g)	Poliol (g)	Prepol. (g)	Água (g)	Massa seca (g)	Densidade (g/cm ³)	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
Areia fina de rio	100,0	6,7	13,3	10,0	116,6	0,59	1,12	*
Areia selecionada #325	100,0	6,7	13,3	20,0	118,5	**	**	*
Calcário Calcítico	100,0	6,7	13,3	15,0	136,6	0,69	0,21	*
Calcário Dolomítico	100,0	6,7	13,3	15,0	136,6	0,70	1,83	0,20
Calcário Magnesiano	100,0	6,7	13,3	15,0	134,2	0,68	1,00	*
Areia fina de rio	200,0	13,3	26,6	20,0	237,8	1,20	2,85	0,18
Areia selecionada #325	200,0	13,3	26,6	40,0	238,0	1,21	0,63	*
Calcário Calcítico	200,0	13,3	26,6	30,0	233,1	1,18	1,55	0,12
Calcário Dolomítico	200,0	13,3	26,6	30,0	231,0	1,18	3,26	0,35
Calcário Magnesiano	200,0	13,3	26,6	30,0	234,0	1,19	2,78	0,23
Legenda: * - Não foi possível determinar; ** - não preencheu o molde								
Valores obtidos experimentalmente								

Quando se buscou conseguir corpos de prova com *meia mistura*, ou seja, com volume reduzido de massa fresca nos moldes (100g de carga), a expansão gerada pelo polímero não foi o suficiente para que houvesse o total preenchimento do molde, o que resultou em um corpo de prova deficiente, inadequado para o ensaio.

Em alguns casos, no ensaio para se determinarem a resistência a tração por compressão diametral não se obteve resultados conclusivos devido ao corpo de prova ser excessivamente frágil, a ponto de não ser possível determinar o valor de ruptura por ocorrer abaixo do limite inferior da escala de medição do equipamento de ensaio.

Na análise desses resultados, pode-se notar que as cargas de melhor desempenho (calcário dolomítico e magnesiano e areia fina de rio) possuem comportamentos semelhantes, sendo que o calcário dolomítico é o que apresenta os melhores resultados e que, visualmente, apresentou corpos de prova mais perfeitos. Comparativamente, o comportamento dos calcários e areias pode ser melhor visualizado no Gráfico 6.

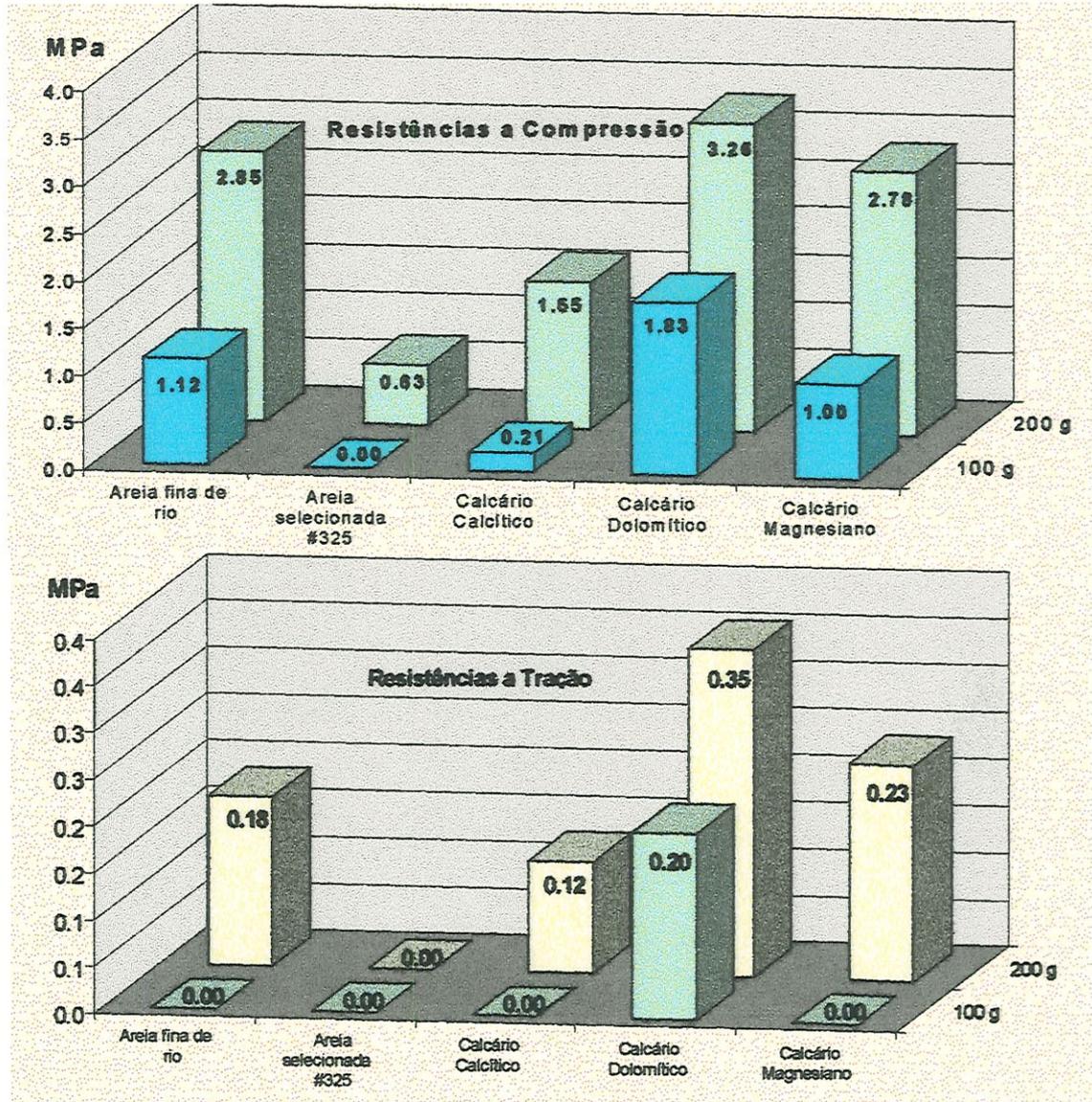


GRÁFICO 6 COMPARAÇÃO ENTRE CARGAS DIFERENTES

A notação 100,0g se refere as argamassas de *meia mistura* e os de 200,0g às de *mistura padrão*.

Embora essas argamassas, principalmente as três de melhores desempenhos, possam ser utilizadas como matéria-prima para a elaboração de componentes como tijolos e blocos pré-moldados, não se moldaram esses elementos utilizando-se essas argamassas, nem foram realizados ensaios baseados nas normas destinadas à avaliação desses componentes por ter-se adotado a postura de se caracterizar o comportamento do compósito em si e não um componente ou elemento constituído dessas argamassas.

Todavia, muitos dos testes realizados podem ser comparados aos valores ditados por essas normas e poderão garantir a viabilidade desse material como elemento constituinte para esses elementos.

3.4.1 Método para preparação das amostras

Nos testes efetuados para obter as propriedades dessas argamassas, foram priorizados os que determinavam os valores de resistência mecânica desses compósitos. Com base nesses ensaios, várias misturas foram testadas com o objetivo de conseguir os traços que fossem mais satisfatórios, quer no quesito consumo de polímero x resistência mecânica, quer nos valores máximos e mínimos de massa específica aparente⁸⁷ possíveis de serem conseguidos.

Convém ressaltar que há um limite na quantidade de material possível de ser colocado em um molde adaptado de argamassa mineral (não expansiva) quando se utiliza em argamassas poliméricas celulares (expansivas).

O molde deve necessariamente ser fechado. Caso não se tenha esse procedimento, a argamassa polimérica celular irá se expandir, ultrapassando o volume nominal do molde e perdendo grande parte de seu material. No caso de a quantidade da argamassa, ainda no estado fresco, ser muito pequena, esta pode, ao se expandir, atingir um volume inferior ao do molde, resultando em um corpo de prova inviável para ensaio. Há, portanto, um volume mínimo de material que pode ser moldado e, ao se expandir, deve garantir seu total preenchimento e garantir a uniformidade da densidade ao longo de toda extensão da peça produzida

Por outro lado, uma quantidade muito grande de material fresco, de volume muito próximo ao volume nominal do molde a ser utilizado, vai causar problemas ao ser moldado. O principal entrave é o *potlife*⁸⁸, extremamente curto, dificultando que todo esse material, ainda fresco, seja lançado no interior do molde antes de começar a se expandir.

Em razão do pouco tempo disponível para homogeneizar as misturas e lançá-las aos moldes antes que começassem a polimerizar, foi adotada uma série de procedimentos para viabilizar o melhor possível a moldagem dos corpos de prova.

O primeiro passo trabalhou com os componentes líquidos (poliol, prepolímero e água) segundo os volumes correspondentes ao seu traço em massa, à mesma temperatura em que se realizaram as misturas e moldagens. Assim, o uso de seringas substitui com vantagens, os vasilhames descartáveis que se utilizavam no início dos experimentos, ganhando-se o tempo para as misturas, reduzindo-se quase totalmente o desperdício de material que ficava aderido aos vasilhames, e contribuía para a maior dispersão dos

⁸⁷ No decorrer deste trabalho o termo *massa específica aparente* é representado muitas vezes pelo termo *densidade*.

⁸⁸ Ou tempo de início de polimerização a partir da mistura de seus componentes constituintes.

dados obtidos, principalmente por se tratar de quantidades pequenas dos componentes e da sua alta viscosidade.

Cabe considerar que, a cada corpo de prova moldado, há a necessidade de se efetuar uma nova mistura, homogeneização e lançamento. Diferentemente das argamassas baseadas em aglomerantes minerais que, por não serem expansivas e por terem um tempo de início de pega longo o suficiente, uma única mistura pode ser lançada a vários moldes; nas argamassas poliméricas celulares não se dispõe desse tempo.

Para cada corpo de prova produzido, deve-se repetir toda a operação descrita na Figura 9, que vai desde a medição das quantidades de cada um dos componentes da mistura, até sua seqüência de mistura, homogeneização, lançamento e, se necessário, adensamento. Há também a necessidade de efetuar o fechamento do molde, impedindo-se que ocorra escape do material quando a argamassa iniciar sua expansão. Nas argamassas estudadas todas essas etapas devem ser fielmente cumpridas para cada novo corpo de prova produzido.

3.4.2 Dosagens dos componentes

Experimentalmente constatou-se que argamassas pouco fluidas dificultam muito o trabalho no lançamento e adensamento nos moldes. Como não há tempo de vibrar a massa ou compactá-la de forma mais eficiente, é conveniente que ela seja fluida o suficiente para que se torne auto-adensável, ou que pelo menos possa se comportar o mais próximo possível disso.

Isso se deve ao curto tempo que as misturas frescas dos compósitos se apresentam trabalháveis. Caso se queira ampliar um pouco esse tempo, é possível, com adição de um solvente em pequenas concentrações (da ordem de no máximo 10% do volume de polímero) sem que se tenha um comprometimento sério das qualidades finais do compósito; ao contrário, os corpos de prova elaborados com a utilização de solvente apresentam uma textura superficial mais homogênea e, aparentemente, um pouco mais impermeáveis que os obtidos sem o uso desse material.

Caso se recorra ao uso de solventes, deve-se subtrair o volume utilizado deste componente do volume total de água, para que a argamassa ainda fresca não se torne excessivamente fluida. Embora essa fluidez em si não ocasione grandes mudanças no comportamento final do compósito, pode propiciar o aparecimento de problemas gerados pela decantação da carga utilizada. Essa seria mais uma postura a ser adotada com o uso de métodos mecânicos de mistura e injeção.

Como solvente, a terebentina de origem vegetal se mostrou bastante eficiente e conferiu uma boa qualidade aos corpos de prova obtidos com sua utilização; outros solventes de

origem mineral também podem ser empregados, embora essa possibilidade se apresente em desacordo com a intenção de obter compósitos isentos de materiais voláteis.

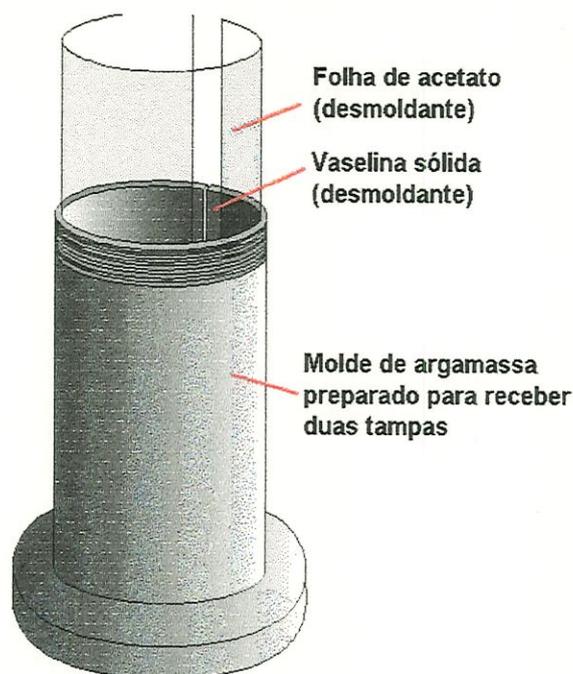
3.4.3 Preparo dos moldes

Como a argamassa em estudo tem característica expansiva, não se devem utilizar moldes hermeticamente estanques, nem com vãos de dimensões que permitam a argamassa escapar durante sua expansão. No primeiro caso, ocorrerá a migração do gás produzido para algumas zonas do molde, formando falhas; no segundo caso, haverá uma grande perda do material e, conseqüentemente, o produto final será uma peça com falta de material em alguns pontos. Assim, devem-se utilizar moldes que permitam o escape do excesso de gás produzido durante a expansão sem que ocorra perda de massa.

Outro ponto que convém ressaltar diz respeito ao poder de adesão que as argamassas apresentam. Por ser extremamente alto e por exercer uma grande pressão contra as paredes dos moldes, deve-se ter o cuidado especial em aplicar ali um desmoldante adequado antes de preenchê-los. O uso de vaselina sólida, em camadas uniformes, presta-se perfeitamente a isso.

Esse poder de adesão é notado até em superfícies metálicas limpas e lisas, como é o caso dos moldes utilizados. Se essas não estiverem perfeitamente limpas, a argamassa irá certamente aderir; para evitar que isso ocorra e para facilitar a limpeza das formas, suas paredes foram revestidas com uma folha de acetato. Em uma produção industrial, pode-se revestir as formas com filmes de polipropileno ou polietileno, o que não permite a adesão da poliuretana nas superfícies do molde.

O método adotado foi o de se revestir o interior do molde com uma folha fina de acetato recortada para envolver a quase totalidade da área interna do cilindro, deixando apenas uma pequena região descoberta, coincidente com o rasgo longitudinal de emenda do molde. Isso se faz no intuito de prover o molde de um escape para os gases produzidos pela polimerização e também permitir que a água que resulta do processo possa escoar para fora do molde. A Figura 8 demonstra com maior clareza esse preparo.



Molde utilizado para o preparo dos corpos de prova de argamassa polimérica celular. Essas fôrmas são as que normalmente se utilizam para moldar corpos de prova de argamassas de aglomerantes minerais (de cal ou de cimento); possuem 50mm de diâmetro interno e 100mm de altura, normalmente essas formas possuem um fundo rosqueável.

Para serem usadas na moldagem de corpos de prova de compósitos poliméricos expansíveis, foi feita a adaptação de tampas rosqueáveis nas extremidades dos moldes. Isso permite que elas passem a receber uma tampa a mais, que possibilita a moldagem de argamassas expansíveis sem que haja escape da massa.

A folha de acetato é utilizada para impedir a adesão da argamassa no corpo metálico do molde, durante a etapa de polimerização.

FIGURA 8 PREPARAÇÃO DOS MOLDES PARA ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES

3.4.4 Mistura

Como as poliuretanas utilizadas possuem um tempo de trabalhabilidade bastante reduzido, não é possível utilizar as técnicas de preparo de argamassas e concretos comuns. Optou-se, então, por desenvolver um procedimento de mistura manual que passa pelas seguintes etapas:

1. Pesagem de todos os materiais envolvidos e preparo dos moldes⁸⁹.
2. Colocação da carga no vasilhame de mistura.
3. Colocação da água neste vasilhame e mistura, garantindo-se que todo o agregado miúdo fique uniformemente úmido, aguardando-se que a água possa ser totalmente absorvida.
4. Colocação do polioli e nova mistura até a massa ficar homogeneizada.
5. Colocação do solvente, caso se esteja utilizando-o.
6. Colocação do prepolímero e posterior mistura. Essa mistura deve ser feita o mais rápido possível devido ao curto tempo disponível, antes que os componentes

⁸⁹ A utilização de seringas descartáveis para dosar a água, o polioli e o prepolímero dinamiza a mistura dos componentes, reduz o tempo de lançamento de cada um desses materiais, reduz o desperdício do material que fica aderido aos vasilhames e, por consequência, aumenta a produtividade e diminui o erro experimental.

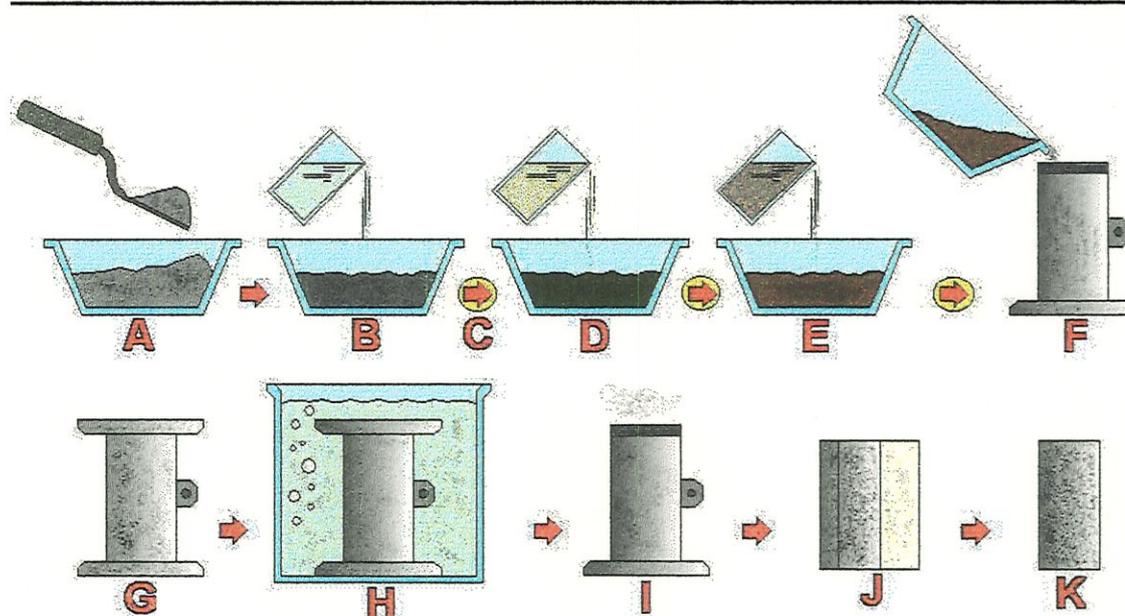
comecem a reagir. Caso se continue a mistura após o início da reação, ou seja, após a mescla já estar liberando o CO₂, pode-se acabar por romper essas bolhas, com liberação de parte desse gás, prejudicando a expansão.

7. Nesta etapa, é importante que se tenha o cuidado de evitar que se aprisionem bolhas grandes de ar na mistura. O adensamento, se necessário, é efetuado com a própria espátula com que se utiliza para o lançamento da argamassa na forma.
8. Caso o que se esteja moldando contenha agregados graúdos, estes deverão ser misturados à argamassa depois da introdução do prepolímero, por ocasião da mistura final.
9. O lançamento nos moldes já preparados com os desmoldantes (vaselina sólida e folha de acetato) deve ser feito evitando-se a formação de bolhas de ar.
10. O molde é, em seguida, tampado e deixado por um período mínimo de meia hora para garantir que a polimerização possibilite um razoável ganho de resistência à argamassa, a fim de que possa ser manipulada sem problemas.
11. Nesse período mínimo de 30 minutos, o molde é deixado imerso em água quente (60°C, +/- 5°C). Esse processo de polimerização a quente tende a garantir uma maior uniformidade do compósito, evitando que a argamassa, em contato com o molde frio, tenha sua expansão reduzida⁹⁰.
12. Após esse período, já é possível desformar o corpo de prova, retirar a folha de acetato que fica aderida a ele e, se for o caso, iniciar os testes.

A grande reatividade da resina é um ponto que convém ser ressaltado: Por se estar utilizando métodos de mistura manuais, o problema do *potlife* muito curto torna-se um empecilho para que a conclusão da moldagem dos corpos de prova antes que a resina inicie sua polimerização. Quanto maior a demora em se lançar ao molde, maior vai ser o problema do aparecimento de juntas e, em casos extremos, o volume a ser moldado pode já ser superior ao volume nominal do molde.

Sucintamente, podem-se resumir as etapas de mistura dos componentes da argamassa como mostra a Figura 9 a seguir:

⁹⁰ Não há, contudo, nas misturas utilizadas, ganhos de resistência significativos utilizando-se desse artifício, mas aparentemente esse procedimento reduz um pouco a dispersão dos resultados. Um leve aumento nas resistências às primeiras idades e a observação da diminuição das bolhas escapando dos moldes (o que indica o final da etapa de polimerização) são as únicas vantagens de se usar uma "cura térmica".



A Pesagem e colocação da carga mineral

B Colocação da água

C Mistura até que a massa se torne homogênea

D Colocação do polioli

E Colocação do prepolímero⁹¹

F Lançamento na forma

G Fechamento da forma

H Colocação do molde em banho-maria a 60°C

I Abertura do molde e resfriamento

J Desforma do CP e retirada do filme de acetato

K Corpo de prova pronto para ensaio

Nota: Na última etapa de homogeneização antes do lançamento da massa no corpo de prova, é importante que o tempo que se leva nesse processo seja o mais curto possível para que não ocorra a moldagem com a argamassa já em processo de polimerização; caso contrário, haverá um grande comprometimento na qualidade do corpo de prova.

FIGURA 9 SEQUÊNCIA DE ADIÇÃO DOS COMPONENTES DAS ARGAMASSAS

Essa seqüência de operações é importante para garantir a melhor homogeneidade e o melhor desempenho mecânico do material.

A carga deverá estar perfeitamente úmida antes de receber o polioli. Para isso, convém deixá-la em contato com essa água por um período de algumas horas (até um dia se possível). O polioli deve, então, ser misturado o mais uniformemente possível, mas não se deve deixar essa mescla (carga+água+polioli) descansando por um período longo de tempo⁹² pois constatou-se que, quando da mistura com o prepolímero, esta se torna

⁹¹ Caso se deseje acrescentar agregados graúdos na argamassa, é logo após essa etapa que se acrescentam esses agregados, incorporando-os e misturando-os o mais rápido possível.

⁹² Períodos de até cerca de uma hora não interferem na reatividade da mescla. Entretanto, caso se deixe por um período de um dia, por exemplo, o crescimento na reatividade da mescla é violento, reagindo instantaneamente ao se adicionar o prepolímero.

sensivelmente mais reativa, diminuindo o tempo disponível para se uniformizar a massa antes de lançá-la aos moldes.

Depois de acrescentado o prepolímero, sua mistura deve ser breve e enérgica, tentando-se garantir que fique homogênea rapidamente. Uma boa trabalhabilidade, neste ponto, é fundamental para que isso aconteça. Se a massa se apresentar pouco trabalhável, podem ocorrer problemas de falta de homogeneização da mescla e apresentará dificuldades de lançamento aos moldes. Trabalhabilidades deficientes demandam um tempo maior nessas últimas etapas, o que não é interessante.

Desde o início da pesquisa, notou-se que algumas cargas exigem um volume maior de líquidos para se tornarem trabalháveis. Na maioria das vezes, o acréscimo de um pequeno volume de água já lhes dá a consistência desejada; em outros casos, como o da sílica ativa e o da areia fina passante na peneira #325, torna-se também necessário aumentar-se drasticamente a porcentagem de polímero, além da água necessária.

Foi notado que, na etapa de polimerização, como o volume de água é grande e a granulometria da carga é muito pequena, uma parcela significativa da massa se perde pelas frestas existentes do molde. Não há como se moldar corpos de prova em recipientes hermeticamente fechados pois a água e os gases tendem a migrar para as partes extremas do molde acarretando bolhas e vazios. O correto é controlar essa perda de material a um mínimo possível, sem que a água e os gases fiquem aprisionados em demasia.

Argamassas com grande volume de polímero necessitam de mais tempo nas formas. Argamassas com 200,0g de carga e 40% de polímero, se desformadas prematuramente, ainda não possuem resistências mecânicas suficientes para impedir que expandam seu volume acarretando o aparecimento de fissuras em sua superfície, mesmo utilizando-se o artifício da imersão em água quente. Nesses casos, convém se retirar os espécimes do molde só depois de passados 90 ou mesmo 120 minutos.⁹³

3.4.4.1 Métodos mecânicos de dosagem, mistura e lançamento

Este trabalho não contemplou estudos quanto ao uso de métodos mecânicos de mistura e injeção das argamassas nos moldes. Os principais motivos desse impedimento residem no altíssimo custo desses equipamentos e na inexistência de um dispositivo mais simples que pudesse atender às exigências do trabalho (apenas são disponíveis equipamentos para produção de peças em regime de alta produtividade em escala industrial)⁹⁴.

⁹³ Tem-se assim, como regra geral, que quanto maior a porcentagem de polímero de uma argamassa, tanto maior será o tempo necessário até que esta possa ser desformada.

⁹⁴ O site www.thecannongroup.com da empresa Italiana Sandreto-Cannon proporciona uma mostra do alto nível tecnológico envolvido nesses equipamentos.

Também não se tentou elaborar, por mais rústico que fosse, nenhum dispositivo dessa natureza, que fatalmente demandaria um grande tempo e custos elevados sem a garantia que fossem realmente eficientes.

Através de pesquisas feitas com fabricantes, via internet, foi levantado que esses equipamentos, de alta eficiência, atendem às necessidades do emprego das argamassas poliméricas na injeção em moldes, produzindo elementos pré-moldados ou possibilitando que a argamassa seja jateada diretamente em superfícies.

Nos equipamentos mais simples, a dosagem é solucionada pela regulagem das injetoras independentes de cada um desses materiais. Pode-se inclusive utilizar fibras ou outras cargas quaisquer sempre garantindo uma ótima homogeneização da mistura final pelo emprego de *mixers* estáticos na etapa final do processo.

Na Figura 10, pode-se ver o esquema interno e algumas vistas de um *mixer* estático para sistemas bicomponentes; notar que no interior de seu corpo, uma série de aletas formam gicanes que provocam uma mistura efetiva, "batendo" como as pás de uma bateadeira os produtos que passam pelo seu interior.

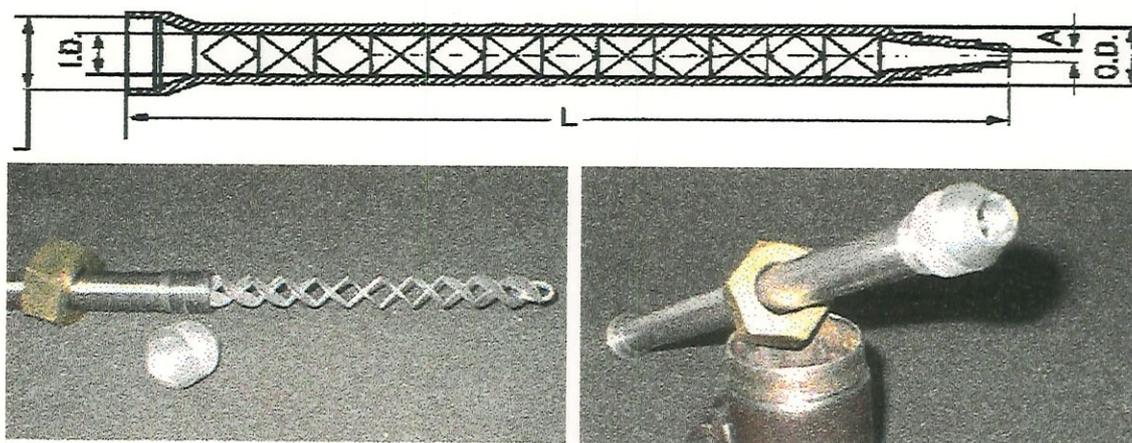


FIGURA 10 MIXER ESTÁTICO PARA BICOMPONENTE

Esse sistema, entretanto, não possibilita que seja utilizado quando se têm cargas adicionadas à resina, dada sua maior viscosidade e, por conseguinte, de dificuldades de mistura. Devido à sua conformação, ele não se presta para misturar cargas minerais, fibras ou outros elementos quaisquer, além dos componentes da poliuretana.

Esse equipamento possui utilização apenas no espreiamento da espuma da poliuretana; podendo ter diversos usos, como injeção de espuma em moldes e espreiamento de espuma sobre superfícies.

3.4.5 Tipos de traços pesquisados

Para avaliar o comportamento da poliuretana como aglomerante em matrizes poliméricas, optou-se por analisar as propriedades das argamassas dentro de três parâmetros básicos:

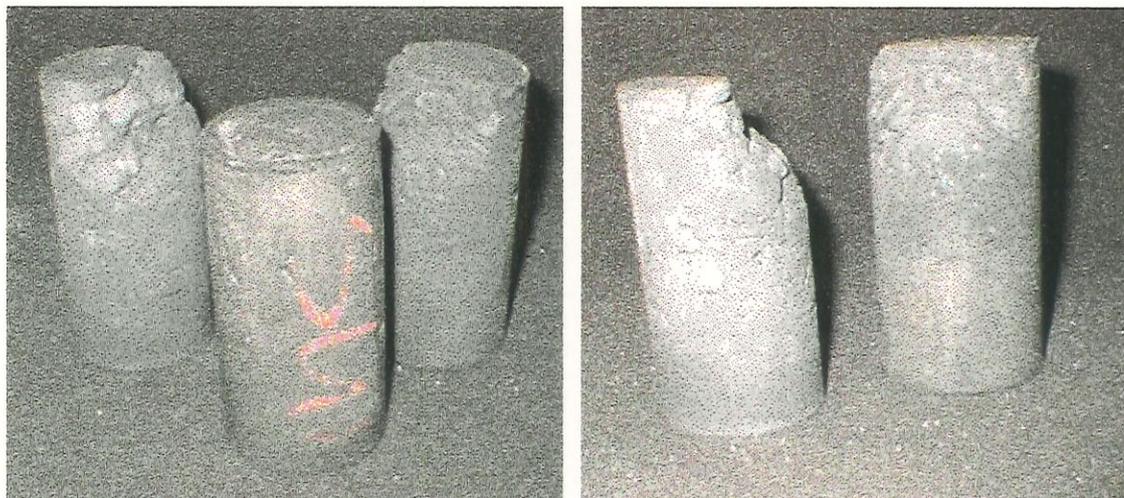
- Como foi levantado na fase de estudos preliminares, as argamassas possuem diferenças em suas características, caso se varie a relação entre as quantidades de poliol e prepolímero presentes na sua mistura.

A relação, em massa, de uma parte de poliol para duas de prepolímero teoricamente foi considerada como a relação estequiométrica da mesma (no caso da REC-01), ou seja: onde ambas as quantidades dos componentes combinam totalmente entre si.

No caso de se aumentar a relação de poliol nas misturas, a argamassa obtida tem seus valores de resistência mecânica majorados às primeiras idades. Testaram-se três tipos de relação em massa entre esses componentes: a considerada como estequiométrica (1:2, - ou uma parte de poliol para duas de prepolímero), outra com uma relação maior de poliol ou de 1:1,5 (uma de poliol para uma e meia de prepolímero) e uma terceira, com proporções iguais, em massa, para cada um dos elementos (1:1 - ou uma parte de poliol para uma de prepolímero).

- Outro estudo envolveu a quantidade de material lançado nos moldes. Como as argamassas são expansivas durante seu processo de polimerização, uma quantidade variável de material ainda fresco colocado em um molde fechado resultará em elementos de mesmo volume final (o volume nominal do molde utilizado) mas, dependendo da quantidade de material lançado, com uma maior ou menor massa específica aparente.

Existem limites máximos e mínimos de material fresco a ser lançado. Há uma limitação física para as quantidades máximas que tendem a ter volumes próximos aos dos moldes, resultando em corpos de prova produzidos com massa específica aparente mais altas. Contudo, há também uma limitação para os valores mínimos que podem ser inseridos nesses moldes; valores inferiores a esse limite resultarão em peças que não preenchem totalmente o volume interno do molde e, portanto, defeituosas. Um exemplo desse tipo de problema pode ser visto na Figura 10 abaixo:



Neste caso não houve o lançamento de material fresco suficiente para que a argamassa, ao se expandir, preenchesse totalmente o volume nominal do molde.

Há grandes vazios pelo corpo de prova, pois não houve pressão suficiente para que as bolhas aprisionadas no lançamento e decorrentes da polimerização pudessem se reduzir por pressão da massa ou por escapamento.

FIGURA 11 FALHAS DECORRENTES DA FALTA DE MASSA FRESCA SUFICIENTE PARA O PREENCHIMENTO DOS MOLDES

- Uma terceira variação possível é na quantidade de polímero com relação à carga dos materiais inertes. Neste caso também há um limite mínimo de polímero que se pode colocar em uma dada quantidade de carga para que se possa formar argamassas com um mínimo de resistência mecânica. Como esse limite depende muito da utilização que se dará a essa argamassa, ou ao elemento feito com ela, pode-se regular a quantidade de polímero pelo valor mínimo de resistência que se espera para um determinado fim. Uma analogia com esse processo seria a escolha do traço de cimento ideal para uma determinada argamassa convencional.

Este estudo envolveu basicamente três proporções distintas: 20%, 30% e 40% de polímero com relação à quantidade, em massa, de material inerte. Para cada uma delas, o comportamento em termos de características mecânicas, físicas e químicas se diferencia em muito umas das outras. Como não é o objetivo desse trabalho chegar-se a um resultado prático de dosagem e sim conhecer suas características mais importantes, uma investigação mais profunda desse problema não foi empreendido.

Traços com proporções maiores de polímero obtiveram resultados mecânicos mais expressivos; o mesmo acontece com traços de massa específica aparente mais elevada. As quantidades ideais de resina para cada traço ainda não estão muito bem esclarecidas. O principal parâmetro que se impõe é o custo envolvendo o uso dessas resinas como aglomerante. Traços com quantidades muito elevadas de polímero aumentam muito o

custo do compósito, determinando empregos cada vez mais específicos, não os justificando em uma gama maior de aplicações.

Outro ponto que também deve ser mais bem abordado é o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de utilizar esse compósito de maneira eficiente e econômica através de meios mecanizados. Neste trabalho estão propostos alguns pontos a serem considerados dentro de uma utilização de caráter industrial.

Na seqüência, será abordado com mais detalhe cada um desses tipos de traços

3.4.5.1 Traços com variação na relação polioli/prepolímero

Conforme já foi dito, as poliuretanas de origem vegetal são sistemas bicomponentes compostos de um polioli formulado e um prepolímero que, ao serem misturados, reagem entre si, dando início a um processo exotérmico de polimerização que resultará em uma poliuretana. Deve-se ter quantidades ideais de cada componente para que, ao reagirem, a totalidade das partes envolvidas sejam consumidas dando origem a um novo material composto.

No caso da resina poliuretana REC-01, objeto de estudo deste trabalho, além da reação entre o polioli e o prepolímero, a água também participa nessa reação (ver Equação 1) reagindo com parte do prepolímero para formar o gás carbônico, responsável pela geração da espuma.

Embora houvesse sido previamente empregada a calculada como a de melhor resultado a proporção 1:2 (uma parte em massa de polioli para duas de prepolímero), investigou-se também argamassas com relações de 1:1,5 e de 1:1 visando acompanhar as mudanças nas características dos compósitos com essas novas relações.

Cabe esclarecer que, embora tenha ocorrido essa mudança das relações dos componentes, a quantidade total de polímero não se altera, pois, a soma das massas das duas partes constituintes (polioli e prepolímero) permanece constante para as três relações apresentadas.

3.4.5.2 Traços com variação na densidade

A quantidade de material colocado nos moldes determina a massa específica aparente do corpo de prova. Quanto maior o volume de material fresco, maior será sua massa e, conseqüentemente, sua densidade.

Misturas com maior massa específica aparente apresentam-se mais resistentes a compressão e a tração simplesmente por terem um menor volume de vazios em seu interior.

O volume de material possível de ser moldado possui dois extremos, o primeiro deles é um volume de massa fresca muito próximo do volume útil do molde. Teoricamente poderia se colocar um volume de massa igual ao do molde; entretanto, devido à reatividade da poliuretana estudada, mesmo que se disponha um certo tempo até que inicie sua polimerização, parte dos componentes começam a reagir imediatamente ao entrarem em contato entre si. Nas resinas de espuma isso significa que se iniciará imediatamente a produção de CO₂ decorrente dessa reação; por sua vez esse CO₂ irá expandir a massa e esta passaria a ter um "volume inicial" maior que o volume do molde. Por segurança, um volume sensivelmente menor que o volume do molde é o máximo que se pode esperar moldar sem sobras de material. Não foi determinado numericamente qual volume é esse. Mas, nos casos estudados, o limite para argamassas com 20% de polímero é de 275,0g de calcário dolomítico.

Por outro lado, há uma quantidade mínima necessária para que haja o preenchimento do molde pois, caso seu poder de expansão não for o suficiente para ocupar todo o volume disponível, esta irá gerar um corpo de prova com falhas. Tentar moldar no limite mínimo de massa fresca, também neste caso, é contraproducente, pois verificou-se que, para se obter um corpo de prova bem conformado, é necessário que este exerça uma certa pressão contra as paredes do molde. Isso vai evitar o acúmulo de bolhas em algum lado, vai contribuir para uma melhor uniformidade nas células da espuma e vai gerar uma textura superficial mais favorável.

Quando do início dos ensaios, a resina REC-01 utilizada permitiu que se gerasse corpos de prova de até 75,0g de carga (no caso o calcário dolomítico) com 20% de polímero. Entretanto, por problemas decorrentes do *potlife* curto desta resina, esta foi reformulada deixando de ser tão reativa. Infelizmente, com a diminuição da reatividade da poliuretana esta passa a gerar gás carbônico mais lentamente, o que diminui a pressão de levantamento da carga e, conseqüentemente, esta se comporta expandindo menos.⁹⁵ Com isso, a dosagem mínima passou para 150,0g de carga com 20% de polímero. Como esta também fica muito próxima do limiar, para uma maior garantia, adota-se 175,0g (para 20% de polímero) como o limite inferior. Para não haver confusão entre a resina de formulação antiga e a nova, esta última passou a ser chamada de REC-02

No caso de se utilizar porcentagens maiores de polímero nas argamassas, um volume menor pode ser moldado, pois, assim será maior sua expansão. Na prática, o que foi levantado sobre as quantidades possíveis de serem moldadas pode ser vista na Tabela 10.

⁹⁵ Em ambos os casos o volume de CO₂ gerado é igual, o que está variando é a velocidade que este CO₂ é gerado.

TABELA 10 QUANTIDADES DE CARGA POSSÍVEIS DE SEREM MOLDADAS (REC-02)

% DE POLÍMERO	QUANTIDADE DE CARGA POR CP (g)											
	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	
20%												
30%			LIMITE	POSSIBILIDADE DE MOLDAGEM SATISFATÓRIA						LIMITE		
40%												

Dados levantados experimentalmente com componentes novos.

3.4.5.3 Traços com variação na relação carga-polímero

Neste tipo de avaliação, os resultados obtidos com os compósitos estudados apresentaram muitas semelhanças com o que ocorre com as argamassas de aglomerantes minerais, quando se varia a quantidade de cimento, por exemplo, em uma dada mistura.

Para um volume maior de aglomerante em uma argamassa, a tendência é que se obtenham valores mais elevados na sua resistência mecânica. Tal qual acontece com as matrizes de cimento ou de outro aglomerante mineral qualquer, cuja resistência é proporcional ao aumento do consumo do aglomerante.

3.5 APARELHOS DE MEDIÇÃO

Nos testes efetuados no Laboratório de Construção Civil foram utilizados os seguintes aparelhos e instrumentos:

- balança de laboratório para até 5 kg com precisão, na escala até 500g de 0,01g e entre 500 e 1000g de 0,1g;
- paquímetros de vários tamanhos com precisão de 0,01mm;
- prensa hidráulica para cargas de até máximas de 100 e 50 toneladas (escala maior e menor) com precisão de até 10kg (utilizando o pistão de menor diâmetro);
- termômetro digital com precisão de 0,1°C.

3.6 DESCONTINUIDADES DA ARGAMASSA ENCONTRADAS NOS CORPOS DE PROVA

A poliuretana tem como característica – e isso é perfeitamente visível quando se misturam apenas seus dois componentes e se deixa expandir-se livremente – a formação de uma pele superficial (ver Figura 6) que se forma na sua superfície externa. Esta pele é formada

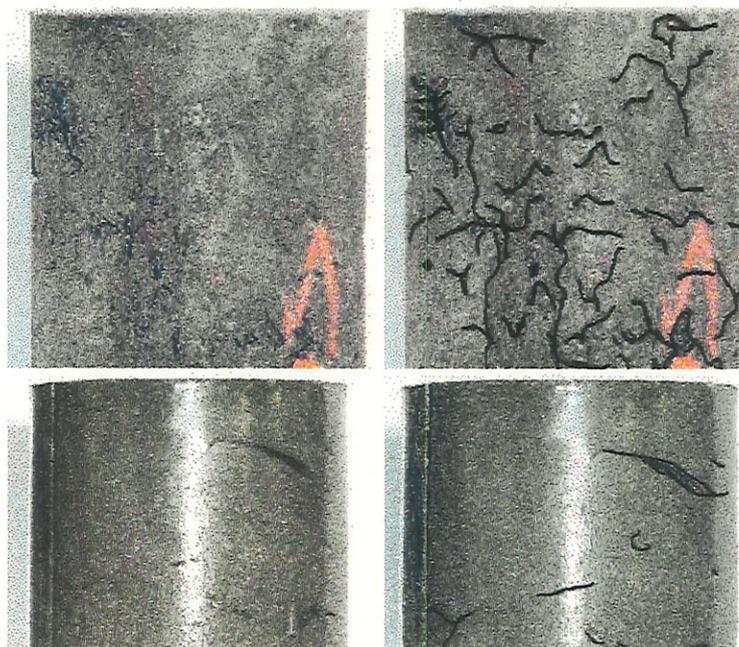
assim que se inicia o processo de polimerização. Tem consistência extremamente plástica em seu início, enrijecendo após algum tempo.

Muitas vezes, na expansão livre, quando essa pele não é suficientemente elástica, ocorre seu rompimento. Em quase toda a sua superfície ela se apresenta com células fechadas e, quando se rompe, a parte interna da espuma fica visível e revela que há uma tendência de formação de células maiores no seu interior, com a característica de se apresentarem predominantemente abertas.

Essa formação de pele, nas superfícies das espumas, é o principal fator para torna-las impermeáveis. Caso ela se rompa, a principal barreira à penetração de água é removida. Entretanto, esta pele, em contato com outra porção do material, não se homogeneiza, ficando uma falha entre elas. Esse fenômeno, quando se está produzindo peças em argamassa, causa uma série de juntas, visíveis ao longo da superfície e que se propagam no interior da peça.

Se por um lado a formação da pele é benéfica à peça que se está produzindo, esta deverá ser moldada antes do início da polimerização da argamassa, pois, caso contrário, as peles superficiais que se formam nessa massa ainda trabalhável vão ficar internas à esse componente, gerando juntas semelhantes às encontradas em artefatos de concreto que tiveram problemas de interrupção no lançamento.

Caso se inicie o processo de polimerização ainda na fase de mistura final dos componentes, ao se colocar a mistura nos moldes, as peles já formadas dificultarão a perfeita homogeneização da massa ainda fresca, provocando o aparecimento de vilosidades ao longo do corpo de prova. Na Figura 12 podem-se notar dois corpos de prova, o primeiro com formação abundante de falhas; o segundo, com uma superfície muito mais íntegra.



Formação de juntas e fissuras ao longo do corpo da amostra devido a argamassa ter iniciado sua polimerização antes de finalizado seu lançamento na forma. Essa mudança de coloração e de textura é evidências de que a argamassa foi lançada ao molde já com início de polimerização.

Mistura fluida e moldada antes do início da polimerização. Notar a quase total ausência de falhas na sua superfície. A argamassa foi lançada antes de iniciar sua polimerização e, desta maneira, apresenta poucas falhas na superfície.

NOTA: Nas fotos a direita, as principais falhas foram ressaltadas por linhas negras. As da esquerda são as mesmas fotos sem o retoque. Notar também que o corpo de prova abaixo possui uma superfície mais brilhante que o primeiro evidenciando uma superfície mais bem acabada.

FIGURA 12 DESCONTINUIDADES DA ARGAMASSA PRESENTE NOS CORPOS DE PROVA

Essas juntas, como se pôde perceber, são responsáveis por uma sensível perda de resistência mecânica dos espécimes ensaiados, que provoca uma grande variação dos resultados e diminui o grau de confiabilidade dos mesmos.

Devido a isso, houve necessidade de se efetuar uma abordagem especial nos resultados e por conseguinte, as análises estatísticas dos resultados não puderam ser corriqueiras, empregadas normalmente com as argamassas de aglomerantes minerais; contudo, demonstrou-se que os dados foram válidos para o procedimento adotado e que, dentro de certos parâmetros, a confiabilidade dos resultados situam-se dentro dos parâmetros necessários a uma abordagem científica.

3.7 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS

Desde os ensaios preliminares notou-se uma dispersão nos resultados, maiores que as preconizadas em normas. Após vários testes e inúmeras tentativas visando a realização de moldagens rigorosamente idênticas, onde desde as quantidades dos materiais envolvidos, até as condições como eram realizados os ensaios, notou-se que o problema, embora minimizado, persistia.

Em uma análise mais pormenorizada do problema verificou-se que a única variável capaz de influenciar esta dispersão era a etapa final de homogeneização da massa fresca do compósito, e seu lançamento nas formas. Todas as outras etapas foram realizadas com o maior rigor possível. Um incremento maior no rigor, nas últimas etapas, demandaria um custo elevadíssimo pela necessidade de se mecanizar o processo e, pelos motivos já comentados, não foi possível ser realizado e só se poderia minimizar os problemas caso se dispusesse de equipamentos especiais.

Como não haveria meio possível de se reduzir essa dispersão, optou-se por uma abordagem estatística diferenciada dos métodos tradicionais, em que foi assegurado um valor mínimo que pudesse estar dentro do nível de confiança adotado em norma.

3.7.1 Desvio relativo máximo

Como não há norma disponível para ensaiar especificamente as argamassas poliméricas celulares, optou-se por adaptar as normas existentes para argamassas de aglomerantes minerais e usar seus procedimentos, no que fosse possível, no estudo desse novo material.

Um estudo da norma NBR-7215⁹⁶, que discorre sobre a determinação da resistência a compressão de argamassas normais de cimento Portland, verifica-se que o lote padrão de ensaio é de 4 corpos de prova. Dos resultados de seu ensaio é calculada uma resistência média cuja veracidade é testada pela determinação do desvio relativo máximo, determinado mediante o cálculo do valor absoluto da diferença entre o valor médio obtido no ensaio e os valores individuais de cada um dos corpos de prova.

Segundo essa norma, caso o valor do desvio relativo máximo for superior a 6%, é calculada uma nova média, desconsiderando-se do corpo e prova discrepante. Novamente é testado um novo desvio relativo máximo e, se este novamente apresentar valores superiores a 6%, o ensaio é desconsiderado e deve ser totalmente refeito. (Equação 5)

$$D_{RM} = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \times 100 \quad \text{onde:} \quad (5)$$

D_{RM} = Desvio relativo máximo (em %)

X_i = Valor individual do resultado de um único corpo de prova

\bar{X} = Valor médio dos resultados obtidos

⁹⁶ NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão, São Paulo, ABNT, 1996

EQUAÇÃO 5 CÁLCULO DO DESVIO RELATIVO MÁXIMO

Outras normas que regem o ensaio de resistência a compressão de corpos de prova de argamassas (quer de cal, ou mistas de cal e cimento) dispõem que esses desvios podem apresentar outros valores. A norma de ensaios de cimento para alvenaria⁹⁷ prescreve valores de 8%, e a norma de gesso para a construção⁹⁸, 15%.

Um outro dado também que se pode notar é que, caso algum corpo de prova apresente valores discrepantes, um a cada quatro pode ser descartado sem detrimento da validade do ensaio. Assim, caso se tenha uma amostra de 8, 12 ou 16 espécimes por ensaio, seguindo o mesmo raciocínio, respectivamente podem ser descartados 2, 3 ou 4 corpos de prova discrepantes; ou seja, dentro de um universo qualquer, podem-se descartar 25% dos indivíduos que apresentarem discrepância maior que a estabelecida no desvio relativo máximo.

No estudo das normas, nota-se que quanto maior o grau de responsabilidade que uma argamassa ou concreto deva apresentar, tanto menor seria o desvio máximo admissível. Assim, dependendo do grau de responsabilidade da argamassas ou do concreto em questão, pode-se adotar um determinado valor de desvio máximo permissível coerente com a utilização que se imagina para o compósito estudado.

No caso das argamassas poliméricas celulares, dadas as suas características de resistência mecânica, é possível se adotar um valor de desvio máximo da ordem de 10%, visto que esse material, pela ordem de grandeza dos valores obtidos, não se presta diretamente à utilizações como elemento estrutural, mas sim de elemento de fechamento verticais e horizontais (painéis de paredes e forros, além de blocos pré-moldados para alvenaria não estrutural).

Entretanto, mesmo sob essas condições, os valores obtidos nos ensaios mecânicos de resistência a compressão ainda não se encaixam adequadamente, mesmo que se utilizem desvios máximos admissíveis da ordem de 10%.

3.7.2 Análise crítica dos resultados obtidos

Através do auxílio do Departamento de Estatística da Universidade Federal de São Carlos, foi realizado um estudo da problemática em questão que culminou em uma abordagem mais ampla, onde se testa a validade dos resultados por intermédio de avaliações do grau de confiança dos valores finais.

⁹⁷ NBR 10906 - *Cimento para Alvenaria - Ensaio*, São Paulo, ABNT, 1989.

⁹⁸ NBR 12129 - *Gesso para Construção - Determinação das propriedades mecânicas*, São Paulo, ABNT, 1991.

Ficou estabelecido que, desde que os valores obtidos nos ensaios ficassem dentro ou acima de um piso mínimo calculado, este piso poderia expressar o valor com o nível de acerto desejado e que, mesmo se alguns espécimes atingissem valores bem mais elevados, poder-se-ia adotar o valor daquele mínimo como sendo o valor representativo do experimento.

No caso das argamassas poliméricas celulares, quando se tenta medir a resistência mecânica de um compósito, pode-se analisar qual a resistência mínima obtida pela amostra, com o grau de segurança necessário.

Os valores superiores, ou até mesmo muito superiores, não entram necessariamente em questão, já que, para Construção Civil, o valor mais expressivo, na enorme maioria dos casos, é exatamente o mínimo de resistência mecânica que um determinado tipo de argamassa consegue obter, ou seja, o **limite inferior de confiança para a média populacional**, já que valores superiores, embora mais vantajosos, não interessam, pois o mínimo esperado é que vai determinar se um dado material vai poder ser empregado em uma determinada situação ou seja, o experimento pode ser analisado pelo seu **limite mínimo de segurança da amostra**.

Esse valor pode ser calculado com uma probabilidade de erro ou nível de confiança qualquer, dependendo apenas da exigência de acerto necessária ao experimento. Assim, tomando-se como exemplo a norma NBR 7215⁹⁹, se o desvio relativo adotado é no máximo 6%, este pode ser entendido, de certa forma, como a probabilidade de erro do experimento ser de 6%.

3.7.3 Limite inferior e limite superior de confiança

Segundo BIKAL; DOKSUM (1977), em algumas situações apenas os valores do limite superior ou inferior de confiança são relevantes para um parâmetro populacional de interesse. No caso das resistências mecânicas a compressão das argamassas poliméricas celulares, o interesse recai nos valores mínimos obtidos pois eles são mais críticos para a utilização da mesma que os superiores; já no caso, por exemplo, dos valores de absorção, os superiores despertam maior interesse, pois limitariam muito mais o uso dessas argamassas que os menores.

A forma utilizada para o cálculo do limite inferior de confiança pode ser visto na Equação 6.

⁹⁹ NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão, São Paulo, ABNT, 1996

$$P\left[\bar{X} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu\right] \geq 1 - \alpha \quad \text{onde:} \quad (6)$$

\bar{X} = média da amostra

$t_{\alpha/2}$ = quantil da distribuição *t-student* com $n-1$ graus de liberdade (valor tabelado¹⁰⁰)

S = desvio padrão da população

n = tamanho da amostra

μ = média da população

α = probabilidade de erro ou nível de confiança¹⁰¹

EQUAÇÃO 6 LIMITE INFERIOR DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA POPULACIONAL¹⁰²

Já o cálculo do desvio padrão pode ser obtido pelo uso da Equação 7:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (7)$$

EQUAÇÃO 7 DESVIO PADRÃO DA POPULAÇÃO¹⁰³

Em alguns casos, entretanto, o que interessa é o limite superior de confiança; para isso a Equação adotada é a representada à seguir (Equação 8):

$$P\left[\bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \geq \mu\right] \geq 1 - \alpha \quad (8)$$

EQUAÇÃO 8 LIMITE SUPERIOR DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA POPULACIONAL

A distribuição *t-student* deve ser sempre utilizada quando o desvio padrão da população é desconhecido e o tamanho da amostra é pequeno, com menos de 30 indivíduos. Segundo SPIEGEL(1993), em amostras de tamanho $N > 30$, denominadas em estatística de *grandes*

¹⁰⁰ Livros sobre estatística, como COSTA NETO(1977) e KALBFLEISH(1981) trazem esses valores tabelados; convém notar que para uma amostra de n indivíduos deve-se utilizar o valor $n-1$ na tabela.

¹⁰¹ Para uma probabilidade de erro de 10% o valor de $t_{\alpha/2} = 0,05$; alguns autores, entretanto, utilizam a simbologia $t_{0,95}$ para esse valor (10%); é importante notar que se está utilizando $\alpha/2$ por isso 0,05 e não 0,1.

¹⁰² Esta fórmula pode ser programada no Microsoft Excel pela seguinte expressão: =AVERAGE(célula 1:célula n) – célula do valor *t-student* com $n-1$ graus de liberdade * célula do desvio padrão / sqrt(número de indivíduos da amostra) - Convém notar que esta é a sintaxe para o software na língua inglesa.

¹⁰³ O desvio padrão é calculado no Microsoft Excel pela fórmula: =STDEV(célula1, célula2,...) - Também neste caso, esta é a sintaxe para o software na língua inglesa.

amostras, as distribuições amostrais são aproximadamente normais, tomando-se a aproximação melhor com o crescimento de N . Já para amostras de tamanho $N < 30$, denominadas *pequenas amostras*, essa aproximação não é boa e torna-se pior com o decréscimo de N .

Assim, se em um dado ensaio forem obtidos resultados dispersos, como o descrito pelo Gráfico 7, pode-se ainda validar o experimento, mesmo com a grande dispersão dos resultados pelo uso do critério de estabelecimento do limite inferior (ou superior conforme o caso) de confiança do experimento.

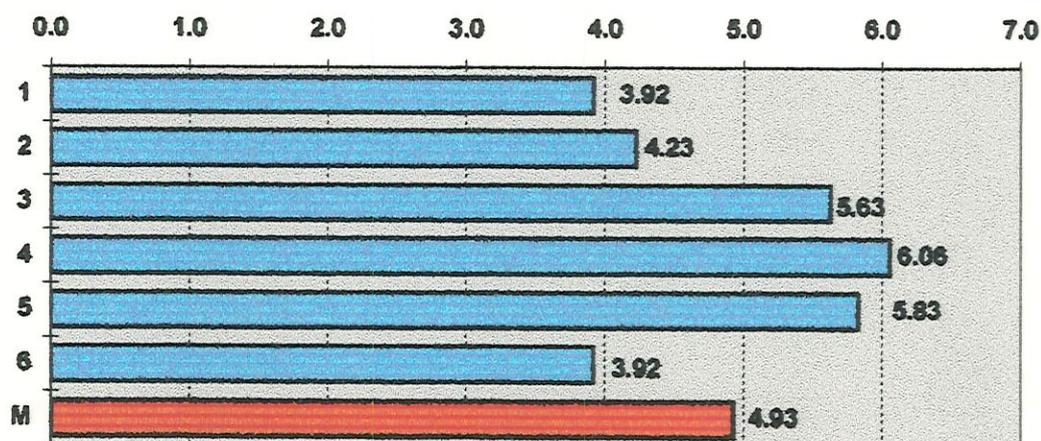


GRÁFICO 7 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.

Dados reais, obtidos experimentalmente

Pelo cálculo da média simples desses valores mostrados, obtém-se o valor de 4,93 MPa (barra vermelha do gráfico em questão). Esse número, entretanto, não representa um valor confiável pois há uma alta dispersão dos resultados. Contudo, se esses dados forem pensados a partir de seu mínimo, pode-se garantir que, para esse experimento, todos os valores, sem exceção, são iguais ou superiores a 3,92 MPa.

Caso se adote uma probabilidade de erro da ordem de 10% e se utilize a fórmula descrita na Equação 6, o valor calculado do limite inferior de confiança fica em 4,10 MPa, ou seja: com a probabilidade de 90% de acerto, para esse caso mostrado especificamente, o valor estimado da resistência mecânica a compressão é de 4,10 MPa.

Embora possa transparecer, em estatística é errado pensar que "tudo é possível". As ferramentas estatísticas possibilitam controlar, entender e quantificar melhor os resultados de ensaios; contudo, esses devem ser feitos necessariamente no maior rigor possível para que sua confiabilidade não fique prejudicada e é imprescindível que as mesmas abordagens sejam adotadas para todos os ensaios para que esses possam ser comparados.

4. ANÁLISES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

A maioria dos ensaios realizados foram feitos no Laboratório de Construção Civil, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP de São Carlos, SP.

Por ser um laboratório especializado na caracterização de elementos e materiais de Construção Civil, grande parte da infra-estrutura de que se necessitou para a caracterização das argamassas celulares já estava disponível ou se pôde, com uma certa facilidade, adapta-la para a realização dos ensaios.

Por se tratar de um material novo, e com características muito próprias, vários testes, principalmente no que se refere à caracterização de suas propriedades no estado fresco, não puderam ser avaliados, dado o tempo diminuto de que se dispunha nestas condições pois, segundos após ter sido misturado, já iniciava sua polimerização e, se fosse ensaiado, não se obteria nenhum resultado que pudesse ser devidamente avaliado nos termos que as normas prescrevem.

Alguns outros ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Químicas e Tecnologia dos Polímeros no Instituto de Química de São Carlos, contando com a colaboração dos técnicos e docentes deste instituto.

4.1 COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

As argamassas poliméricas celulares possuem excelente adesividade, podendo ser utilizadas no enchimento de fissuras com grande aderência com o material já existente, mas exige certos cuidados no preparo dos moldes.

No seu estado endurecido, possui baixo módulo de deformação, apresentando-se muito mais dúctil que as argamassas de aglomerantes minerais, o que pode ocasionar um menor aparecimento de fissuras por deformação do material, entretanto sua resistência a compressão, de forma global, fica abaixo das apresentadas por concretos celulares de mesma massa específica.

4.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS LEVANTADAS

Neste estudo efetuaram-se três tipos de ensaios mecânicos: resistência a compressão axial; resistência a tração por compressão diametral e determinação do módulo de

elasticidade. Esses três ensaios possibilitam um bom entendimento do comportamento que um compósito tem, em face da aplicação de esforços mecânicos.

4.2.1 Resistência a compressão

Esse ensaio foi procedido de conformidade com as normas NBR 7215¹⁰⁴ e NBR 5739¹⁰⁵, além das normas complementares correlatas. A partir dele, foi adaptado um procedimento para se adequar às exigências dos compósitos poliméricos celulares.

A principal modificação diz respeito à forma de mistura argamassa e moldagem dos corpos de prova, conforme já descrito anteriormente.

Os corpos de prova, foram pesados e medidos para que pudesse ser calculada a sua massa específica aparente. Esses corpos de prova foram secos ao ar no interior de sala climatizada, conforme anteriormente descrita; para que não houvesse interferência da temperatura, eles não foram secos em estufa até massa constante¹⁰⁶, como determina a norma para determinação da massa específica.

As medições para a determinação de seu volume consistiram em três determinações de seu diâmetro, e três de sua altura, para cada um desses espécimes. A média de cada uma dessas três determinações foi utilizada para se chegar ao comprimento e o diâmetro de cada espécime. O volume é calculado pela área da base do cilindro multiplicada pela altura do mesmo. A relação entre a massa do corpo de prova pelo seu volume determinou sua massa específica.

Os corpos de prova tiveram suas superfícies preparadas por capeamento com enxofre cerca de duas horas antes de cada ensaio. Após capeados, eles foram submetidos a compressão até seu rompimento. A carga necessária para ocorrer esse rompimento e a forma como este ocorreu foram anotadas.

4.2.1.1 Variação da relação polioli/prepolímero

Várias relações foram testadas no que diz respeito às porcentagens de polioli/prepolímero da resina em estudo. Como foi dito, com base nos dados fornecidos pelo GQATP

¹⁰⁴ NBR 7215 Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão.

¹⁰⁵ NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

¹⁰⁶ Em um ensaio exploratório realizado, ficou claro que os corpos de prova submetidos a processos de secagem em estufa sofriam interferências nas suas resistências mecânicas devido ao calor; interferências estas que majoravam sensivelmente os valores obtidos nos ensaios posteriores. Como o que se procurou foi testar condições de aplicabilidade em Construção Civil, e sabendo-se de antemão que a secagem das peças em estufa dificilmente seria um procedimento adotado em uma escala industrial, optou-se por ensaiar os corpos de prova sob secagem ao ar.

IQSC/USP, responsáveis pelo desenvolvimento da poliuretana utilizada, a relação estequiométrica (onde cada componente reage totalmente com o outro) seria de 1 parte em massa de polioliol para 2 partes de prepolímero; contudo, resultados melhores foram obtidos com relação a ganhos de resistência em dosagens de 1:1,5.

A relação estequiométrica teórica, estava prevista para a reação do prepolímero com apenas 10% de água por parte do polioliol; na prática, após serem analisados esses ensaios e recalculados esses valores, viu-se que a reação estaria consumindo algo em torno de 6 a 7% do polioliol, o que equivale a dizer que, nas misturas utilizadas, a relação estequiométrica estaria mais próxima a valores de 1:1,5 (relação polioliol/prepolímero) do que na anteriormente calculada.

Embora dosagens de 1:1 apresentem as maiores resistências mecânicas às primeiras idades, foi observado que estas tendiam a diminuir sensivelmente em idades mais avançadas. O conjunto dos resultados obtidos pode ser melhor apreciado na Tabela 11 e no Gráfico 8.

Neste ensaio, cada lote se compôs de 6 corpos de prova confeccionados e ensaiados conforme a norma NBR 7215 devidamente adaptada às condições especiais das argamassas poliméricas em estudo.

TABELA 11 DESEMPENHO A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS C/ VARIÇÃO NA RELAÇÃO ENTRE POLIOL E PREPOLÍMERO					
LOTE	CARGA DE MATERIAL INERTE (g)	RELAÇÃO DOS COMPONENTES DO POLÍMERO	DENSIDADE (g/cm³)	IDADE DOS CPs NA ÉPOCA DO ENSAIO (DIAS)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)
1A	200,0	1:2	1,21	1	3,87
1B	200,0	1:2	1,20	3	4,18
1C	200,0	1:2	1,19	8	5,27
1D	200,0	1:2	1,20	30	6,03
1E	200,0	1:2	1,20	90	6,11
2A	200,0	1:1,5	1,22	1	4,12
2B	200,0	1:1,5	1,20	3	4,93
2C	200,0	1:1,5	1,20	8	5,42
2D	200,0	1:1,5	1,20	30	7,82
2E	200,0	1:1,5	1,20	90	7,83
3A	200,0	1:1	1,21	1	4,72
2B	200,0	1:1	1,20	3	5,96
3C	200,0	1:1	1,20	8	5,78
3D	200,0	1:1	1,20	30	4,30
3E	200,0	1:1	1,21	90	4,43
Dados obtidos experimentalmente					

Os valores mostrados correspondem a médias simples¹⁰⁷ dos resultados obtidos dos corpos de prova de cada lote. As idades de ensaio estão rigorosamente dentro do que prescreve a norma. Todos os ensaios foram feitos pelo autor nas dependências do LCC.

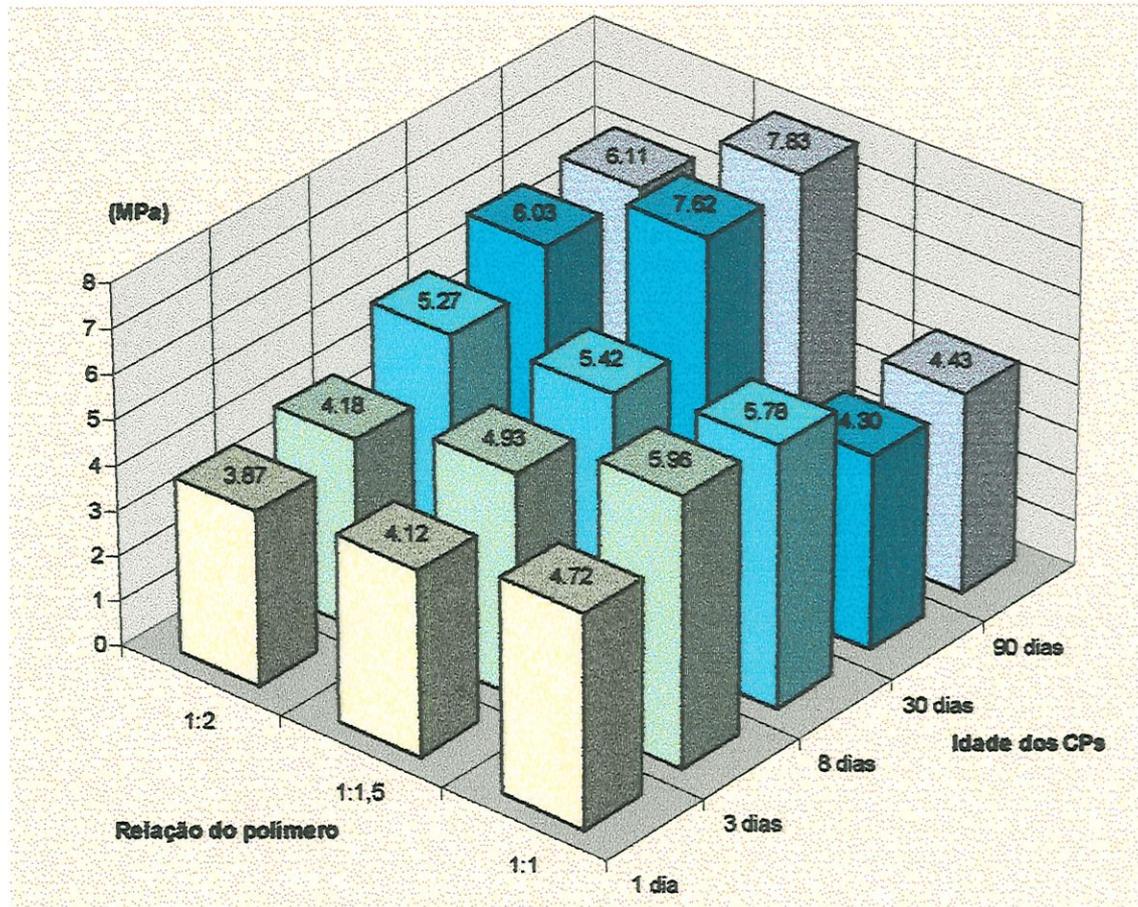


GRÁFICO 8 DESEMPENHO A COMPRESSÃO COM RELAÇÕES DOS COMPONENTES DO POLÍMERO E IDADES DIFERENTES.

A relação 1:1,5 apresenta melhores resultados em termos de desempenho mecânico, principalmente em idades mais avançadas e, dada a maior quantidade de polímero presente na mistura, quando ainda em estado fresco, esta apresenta uma trabalhabilidade sensivelmente maior, tornando possível a moldagem de corpos de prova com maior facilidade.

¹⁰⁷ Nesta etapa do trabalho ainda não se havia desenvolvido adequadamente a teoria estatística do limite mínimo de confiança. Entretanto, por terem sido feitos pelo mesmo parâmetro de análise dos resultados eles podem ser comparados entre si, desde que sejam vistos mais como uma tendência existente eles, e não como um valor absoluto. Essa afirmação é correta pois, em outras oportunidades, quando da repetição desses ensaios, esses se mostram com as mesmas características.

Todavia, por não haver ainda a certeza de que esta relação era a que melhor apresentaria resultados globais, insistiu-se, no decorrer do trabalho, em um maior aprofundamento nos estudos das argamassas que tivessem relações de 1:2.

Um ponto que convém notar é que a maioria dos corpos de prova se rompem de forma colunar, o que denota que essas argamassas possuem baixo módulo de elasticidade.

Seria conveniente, na continuidade desse estudo, contemplar melhor os ensaios e a análise dos resultados com argamassas com relações de 1:1,5 e assim ampliar o panorama do comportamento das argamassa poliméricas celulares.

Analisando-se individualmente cada uma dessas relações e comparando-se seus resultados vê-se que as taxas de incremento na resistência a compressão dessas argamassas possuem características distintas umas das outras.

Comparando-se os ganhos de resistência a compressão a partir da argamassa ensaiada com 1 dia de idade; pode-se ver, pelas Tabelas 12, 13 e 14, o incremento percentual na sua resistência a compressão. Denominou-se eficiência a compressão o valor obtido a partir da divisão entre o valor da sua resistência a compressão pela densidade do compósito. Em valores absolutos, não se pode comparar a resistência de um compósito de alta densidade com um de baixa. Pelo menor grau de vazios do primeiro, este sempre apresentará valores superiores em relação aos menos densos.

O intuito de analisar esses números é o de verificar a resistência de um determinado compósito. Essa abordagem será mais bem visualizada nas análises de compósitos de densidades diferentes.

DESEMPENHO	1 dia	3 dias	8 dias	30 dias	90 dias
Valor da resistência a compressão da amostra	3,87	4,18	5,27	6,03	6,11
Ganho da resistência (1 dia = 0% (padrão)) ¹⁰⁹	0,0%	8,0%	36,2%	55,8%	90,0%
Eficiência a compressão (resist./dens. - MPa/Kg/dm ³)	3,20	3,48	4,43	5,07	5,09
Valores calculados baseados em dados experimentais					

¹⁰⁸ Todas as argamassas descritas nas Tabelas 12, 13 e 14 são de 200,0g de calcário e 20% de polímero

¹⁰⁹ Idade utilizada como padrão para comparação com as outras idades.

DESEMPENHO	1 dia	3 dias	8 dias	30 dias	90 dias
Valor da resistência a compressão da amostra	4,12	4,93	5,42	7,82	7,83
Ganho da resistência (1 dia = 0% (padrão))	0,0%	19,7%	31,6%	89,8%	90,0%
Eficiência a compressão (resist./dens. - MPa/Kg/dm ³)	3,38	4,11	4,52	6,52	6,53
Valores calculados baseados em dados experimentais.					

Na Tabela 14, observa-se que, a partir do oitavo dia, os valores obtidos nos ensaios a compressão passam a ser menores que os obtidos no ensaio realizado com 1 dia de idade. Provavelmente isso decorre do fato de se ter um excesso de poliol "livre" disperso pela argamassa, e este passa a reagir com o polímero já formado, reduzindo sua resistência.

DESEMPENHO	1 dia	3 dias	8 dias	30 dias	90 dias
Valor da resistência a compressão da amostra	4,72	5,96	5,78	4,30	4,43
Ganho da resistência (1 dia = 0% (padrão))	0,0%	26,3%	22,5%	-8,9%	-6,1%
Eficiência a compressão (resist./dens. - MPa/Kg/dm ³)	3,90	4,97	4,82	3,58	3,96
Valores calculados baseados em dados experimentais.					

Pelo Gráfico 9, pode-se melhor observar esse incremento na resistência a compressão. A função das curvas é a relação entre o valor da resistência a compressão do ensaio realizado com n dias de idade pelo valor obtido com a idade de 1 dia.

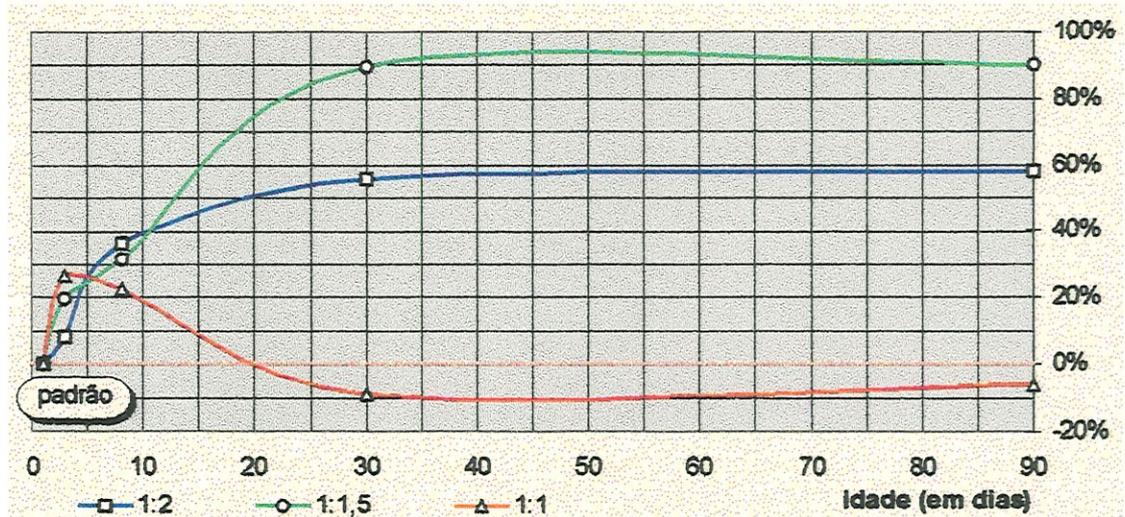


GRÁFICO 9 DESEMPENHO A COMPRESSÃO COM RELAÇÕES DOS COMPONENTES DO POLÍMERO E IDADES DIFERENTES.

Embora se note que, até os 3 dias, os compósitos de relação 1:1 apresentem um significativo aumento em sua resistência, mas, a partir do oitavo dia, seus valores a diminuem. Com 30 dias de idade, todos os compósitos aparentemente estabilizam sua resistência mecânica a compressão.

4.2.1.2 Variação na densidade das argamassas

Variando-se a densidade (ou massa específica aparente) de uma argamassa, ela vai apresentar um aumento de suas resistências mecânicas diretamente proporcionais ao aumento da sua densidade. Quanto mais densa é uma argamassa (e principalmente uma argamassa celular) tanto maiores serão as resistências mecânicas conseguidas, simplesmente por se ter um volume menor de vazios no seu interior.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência a compressão obtidos a partir de corpos de prova de densidades diferentes. Em todos os casos, adicionou-se 20% de polímero na relação 1:2 (poliol/prepolímero) à carga, sendo que esta variou entre 100,0g e 275,0g. Os corpos de prova foram ensaiados com idade de 30 dias. Os valores se referem a médias de 6 corpos de prova por lote¹¹⁰ e esses foram acondicionados até o ensaio nas mesmas condições descritas no item anterior.

¹¹⁰ Ainda aqui não havia sido usado o método estatístico de aumento da confiabilidade dos resultados pela adoção do limite mínimo de confiança. (ver item 3.5 do capítulo anterior).

TABELA 15 DESEMPENHO A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS C/ VARIÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA APARENTE

TIPO DE ARGAMASSA ¹¹¹	MASSA DO CP (g)	RESIST. À COMPR. (MPa)	MASSA ESPECÍF. (g/cm ³)	EFICIÊNCIA (MPa/Kg/dm ³)
100 20% 1:2	124,8	1,12	0,68	1,65
125 20% 1:2	145,1	1,50	0,74	2,03
150 20% 1:2	174,8	2,09	0,94	2,22
175 20% 1:2	203,7	2,49	1,02	2,44
200 20% 1:2	232,6	5,61	1,21	4,64
225 20% 1:2	264,2	7,49	1,35	5,55
250 20% 1:2	286,8	11,31	1,46	7,75
275 20% 1:2	317,4	15,35	1,62	9,48

Dados obtidos experimentalmente

A coluna *eficiência*, com valores expressos em MPa/Kg/dm³, se refere à relação entre a resistência a compressão de uma determinada argamassa e sua densidade. Isso se faz no intuito de se estabelecer um parâmetro de comparação entre argamassas de densidades, relações polioli/prepolímero e taxa de polímero diferentes. O Gráfico 10, a seguir, mostra os valores de resistência a compressão, de massa específica aparente e da densidade de cada um desses lotes.

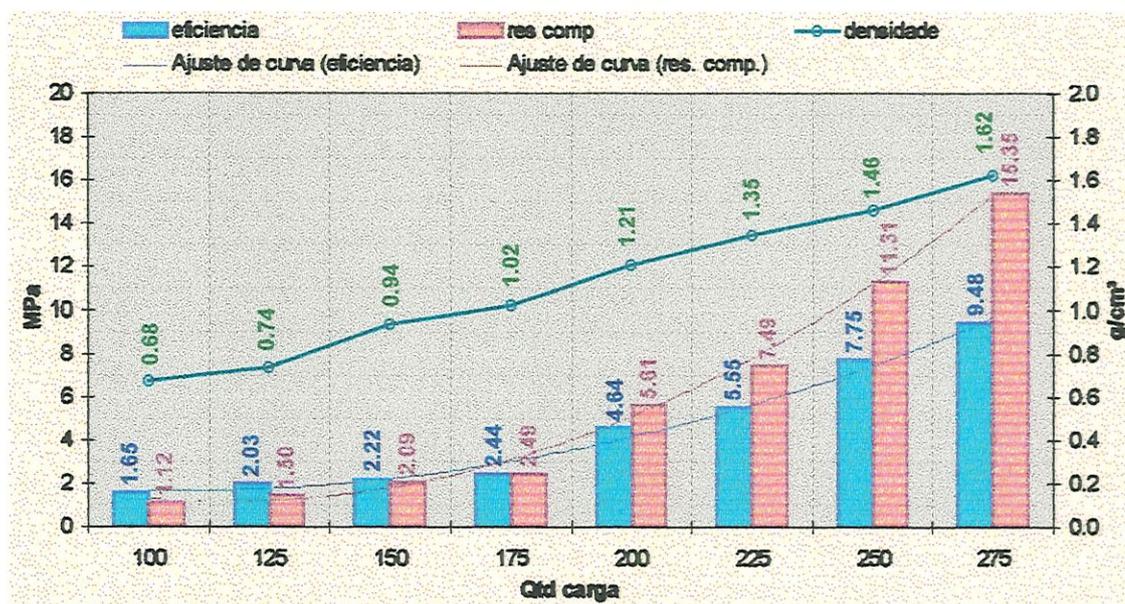


GRÁFICO 10 DESEMPENHO A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE DENSIDADES DIFERENTES (REC-01)

¹¹¹ Conforme notação discutida no item 3.2.1.

Chamou-se de *curva de ajuste* a curva que melhor modela os resultados dos gráficos de resistência a compressão e da eficiência da resistência a compressão pela densidade do compósito. Utilizou-se dessas curvas de modelagem para melhor visualizar o comportamento das propriedades dessas argamassas, tecendo-se de maneira mais clara a relação entre os vários valores obtidos dessas propriedades.

Com relação às características da conformação de sua ruptura, os corpos de prova de maior massa específica aparente (com 250,0g e 275,0g de carga mineral) tiveram por característica um rompimento cônico ou cônico/cisalhado; já os de menor massa específica foram na sua maioria colunares com uns poucos cisalhados.

Com a mudança da formulação do polímero, um novo ensaio foi realizado com o intuito de aferir se os resultados das amostras elaboradas com essa nova formulação divergiam dos resultados apresentados acima.

A nova formulação do polímero (REC-02) reduziu seu poder de expansão; assim, não foi possível realizar amostras com 100,0 e 125,0g de carga pois, nessas quantidades e com 20% de polímero, estas formavam argamassas que não preenchiam o volume total do molde.

Os resultados obtidos neste novo ensaio podem ser vistos na Tabela 16. Todos os corpos de prova foram moldados com 20% de polímero na sua composição. Cada lote foi composto por 12 corpos de prova; para efeito de comparação, não se usou a teoria do limite mínimo de confiança (item 3.5) tal qual ocorreu com o ensaio descrito na Tabela 15.

O número maior de corpos de prova foi proposto para se verificar se a dispersão dos resultados deste novo ensaio ocasionaria efeitos sensíveis nos valores das médias em comparação com as anteriores.

TABELA 16 DESEMPENHO A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS C/ VARIÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA APARENTE - FORMULAÇÃO REC-02				
TIPO DE ARGAMASSA	MASSA DO CP (g)	RESIST. A COMPR. (MPa)	MASSA ESPECÍF. (g/cm³)	EFICIÊNCIA (MPa/Kg/dm³)
150 20% 1:2	176,7	1,99	0,90	2,21
175 20% 1:2	205,0	2,49	1,04	2,40
200 20% 1:2	236,4	5,68	1,20	4,74
225 20% 1:2	263,5	7,16	1,34	5,35
250 20% 1:2	287,9	11,25	1,47	7,66
275 20% 1:2	317,4	15,43	1,62	9,53
Dados obtidos experimentalmente				

Na comparação dos valores deste novo ensaio (Tabela 16) com o anterior (Tabela 15), pode-se notar que não houve variação apreciável no comportamento do novo polímero; ao contrário, os valores da resistência a compressão do traço 175 20% 1:2 e o valor da média das massas dos corpos de prova para os traços de 275 20% 1:2 revelam os mesmos números. Os demais valores não apresentam variações que possam mostrar que a nova formulação (REC-02) possui um comportamento, com relação à resistência a compressão, diferente da formulação anterior (REC-01).

Para se expor melhor essa afirmativa o Gráfico 11, abaixo, mostra os valores obtidos neste novo ensaio.

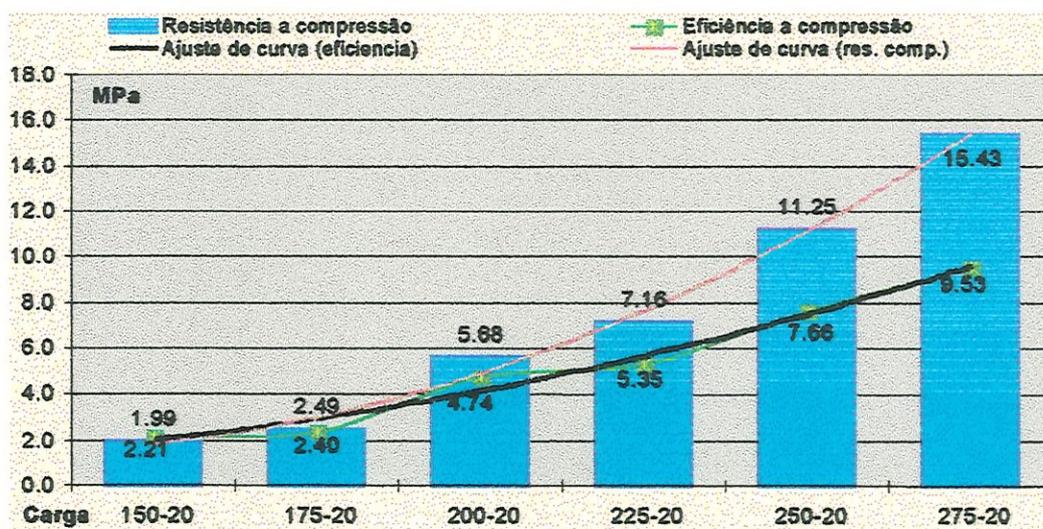


GRÁFICO 11 DESEMPENHO A COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE DENSIDADES DIFERENTES (REC-02)

Além das barras representando os valores de resistência a compressão observados e da curva da eficiência das amostras, podem-se notar duas outras curvas de referência, tanto com relação aos valores da resistência, quanto da eficiência a compressão. Essas curvas são ajustes das curvas das funções polinomiais dos valores obtidos que melhor representa o comportamento dos resultados da amostra. Seu uso se dá apenas no intuito de melhor visualizar os comportamentos desses dados.

4.2.1.3 Variação no teor de polímero no compósito

Os compósitos de cimento Portland tendem a ser mais resistentes conforme se aumenta o teor de cimento no seu traço. No caso das argamassas poliméricas celulares, o que se observa é exatamente esse tipo de fenômeno, ou seja: quanto maior a porcentagem de polímero em uma mistura, tanto maiores vão ser as resistências mecânicas observadas. Paralelamente a isso, por ter uma maior quantidade de polímero em sua massa, os corpos

de prova desses compósitos tendem a ser mais impermeáveis e sofrem uma menor retração¹¹².

É fácil reconhecer um corpo de prova de traço mais elevado de polímero, pois apresenta uma textura superficial muito mais lisa e uniforme que os de traços mais pobres. Devido a terem sido usadas folhas de acetato para que a argamassa não aderisse às superfícies dos moldes, ao serem desformados e após retirado o filme, este permanece "impresso" na superfície do corpo de prova.

Da mesma forma, como foi descrito nos itens anteriores, os corpos de prova, também neste caso, foram ensaiados lotes de 6 indivíduos, nas mesmas condições já descritas. Os valores obtidos estão na Tabela 17 e seu comportamento pode ser analisado pelo Gráfico 12.

* **TABELA 17 DESEMPENHO A COMPRESSÃO C/ VARIAÇÃO NO TEOR DE POLÍMERO NAS ARGAMASSAS**

LOTE	CARGA (g)	% POLÍMERO	MASSA (g)	DENSIDADE (g/cm ³)	RESIST COMP. (MPa)	EFICIÊNCIA (MPa/Kg/dm ³)
200 20% 1:2	200,0	20	234,3	1,20	6,03	5,03
200 30% 1:2	200,0	30	252,1	1,35	9,04	6,70
200 40% 1:2	200,0	40	273,8	1,46	14,97	10,25

Dados obtidos experimentalmente

Os corpos de prova utilizados para compor os resultados apresentados na Tabela acima foram elaborados com 200,0 calcário dolomítico comum e a relação entre os componentes (poliol e prepolímero) foi de uma parte de poliol para duas de prepolímero (1:2), em massa.

Convém notar que há um ligeiro aumento na densidade desses corpos de prova conforme aumenta a porcentagem de polímero utilizada na mistura. Em compósitos não expansivos, isso não é notado devido ao volume de material fresco utilizado ser sempre o necessário para o total preenchimento das formas. Já no caso das argamassas celulares, o volume total da mistura estudada deve necessariamente ser despejado nas formas, sem sobras.

No Gráfico 12, estão mostrados os valores de resistência a compressão de cada um desses lotes. Todos os corpos de prova foram ensaiados com 30 dias de idade.

¹¹² Ver itens 4.4.1 e 4.4.2, deste capítulo.

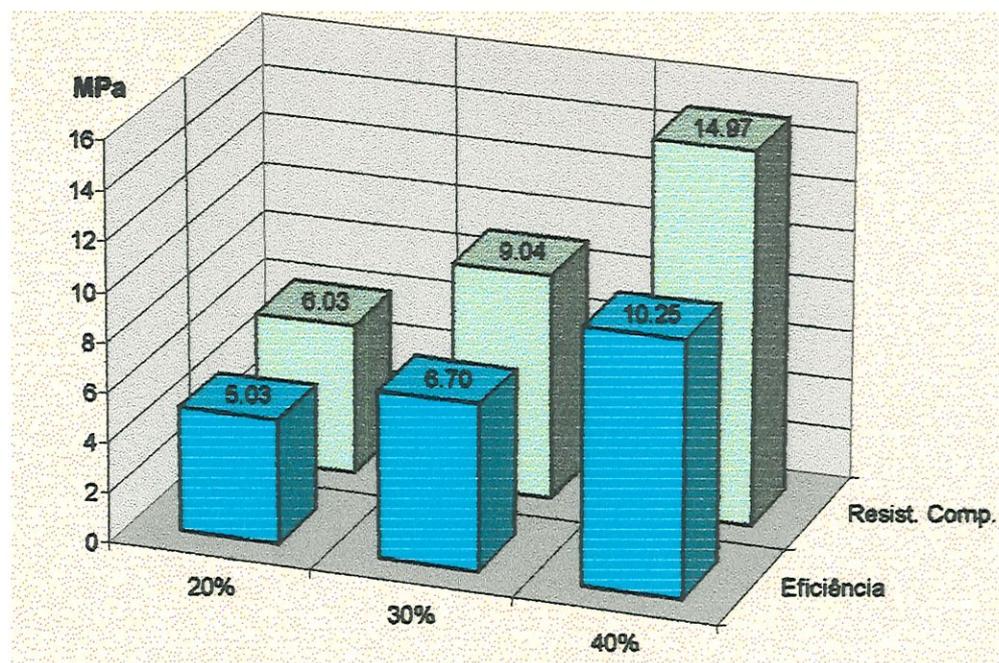


GRÁFICO 12 DESEMPENHO COM VARIAÇÃO NO TEOR DE POLÍMERO.

Nota-se que há uma grande diferença entre os resultados, com um aumento considerável de ganho de resistência mecânica proporcional com o aumento da porcentagem de polímero na mistura.

A forma de ruptura desses corpos de prova também variou conforme a porcentagem de polímero: porcentagens mais altas tenderam a apresentar rupturas cônicas; as mais baixas, colunares.

Analisando-se os dados obtidos, pode-se notar que o aumento da porcentagem de polímero na argamassa faz com que haja um aumento bastante considerável nas resistências mecânicas a compressão. A Tabela 18 demonstra melhor essas observações:

TABELA 18 DESEMPENHOS COMPARATIVOS DAS ARGAMASSAS COM 200,0g DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO E TAXAS DE POLÍMERO DIFERENCIADAS			
DESEMPENHO	20%	30%	40 %
Valor da resistência a compressão da amostra	6,03	9,04	14,97
Ganho da resistência (20% = 0% (padrão))	0,0%	49,9%	148,3%
Fator de eficiência (resistência/densidade - MPa/Kg/dm ³)	5,03	6,70	10,25
Valores calculados baseados em dados experimentais			

Pela tabela acima, pode-se observar que um aumento de 50% da taxa de polímero causa o efeito de um aumento de 50% na sua resistência a compressão, e um aumento de 100%

do polímero inicial eleva a sua resistência a compressão a níveis 150% maiores, o que é extremamente relevante caso se queira produzir compósitos leves e ainda resistentes¹¹³.

4.2.2 Resistência a tração por compressão diametral

Nesse ensaio foi utilizada a norma NBR 7222¹¹⁴. Além dos valores apresentados no item 3.4, Tabelas 7 e 8 e Gráficos 3, 4 e 5, posteriormente foram efetuados ensaios em que se investigou o comportamento mecânico de compósitos com variação na densidade e no teor de polímero, como pode ser observado na Tabela 14.

Cada amostra contou com 3 corpos de prova, com idades de 30 dias e foram ensaiados conforme prescreve a norma citada.

TABELA 19 DESEMPENHO A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES						
TIPO DE COMPÓSITO*	CARGA (g)	% DE POLÍMERO	ÁGUA (g)	MASSA (g)	DENSIDADE (g/cm ³)	RESIST. TRAÇÃO (MPa)
200 20% 1:2	200,0	20	30,0	232,9	1,29	0,43
250 20% 1:2	250,0	20	37,5	286,8	1,46	0,75
150 30% 1:2	150,0	30	22,5	181,6	1,08	0,27
200 30% 1:2	200,0	30	30,0	251,6	1,39	0,82
250 30% 1:2	250,0	30	35,5	291,6	1,61	1,36
150 40% 1:2	150,0	40	22,5	199,4	1,12	0,47
200 40% 1:2	200,0	40	30,0	268,3	1,48	1,54

* As cargas 150 20% 1:2 e 250 40% 1:2 não podem ser adequadamente moldadas e não entraram nesta avaliação - Dados obtidos experimentalmente

Como seria natural, o rompimento dos corpos de prova pelo ensaio revelou que os de menor densidade possuem uma grande concentração de células em seu interior, células que, para uma mesma quantidade de carga, diminuem o seu tamanho proporcionalmente ao aumento do teor de polímero na argamassa. Fixando-se um determinado teor, por exemplo o de 30% de polímero, as argamassas começam a apresentar uma textura mais lisa em seu interior causada pela diminuição do diâmetro das células de gás.

Apenas em um único exemplar (de 250,0g de carga com 30% de polímero) se pode observar uma falha na homogeneidade da argamassa, com uma mancha escura em seu interior, o que revela que provavelmente a massa fresca não houvesse sido corretamente

¹¹³ Ver item 5.2.1.

¹¹⁴ NBR 7222 Argamassas de concretos - Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

misturada; entretanto, o valor de seu rompimento não se mostrou comprometido por esse fato.

Um outro fato que convém comentar é que, devido ao uso das folhas de acetato para facilitar a desmoldagem, a superfície exposta revelada no interior da argamassa é muitíssimo maior que a que se apresenta em seu exterior, esta última visivelmente muito mais fechada que a primeira. Isso faz pensar se os ensaios de absorção de água não estariam comprometidos, já que a superfície externa dos corpos de prova possuem um recobrimento de polímero que não é encontrado em seu interior.

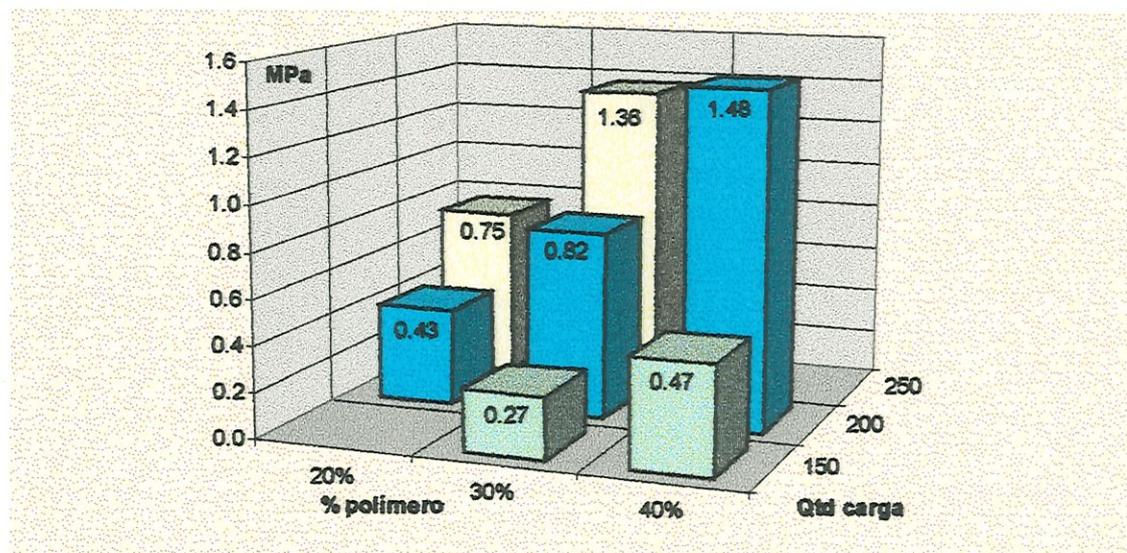


GRÁFICO 13 DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DA ARGAMASSA

Os valores representados acima atestam dois fatos distintos: com o aumento na densidade dos corpos de prova, estes deixam de possuir um volume muito grande de vazios, aumentando sua parte "sólida", o que efetivamente contribui para os ganhos mecânicos. Isso é particularmente notório na argamassa 250 30% 1:2; já na argamassa 200 40% 1:2, o alto teor de polímero aumenta a resistência a tração, pois, embora até contribua para um leve aumento na densidade do compósito, a taxa maior de aglomerante, que forma um elevado grau de entrecruzamento, faz com que haja um significativo aumento relativo entre esta argamassa e a de 200 30% 1:2.

Caso se eleve a taxa de polímero de uma argamassa e ainda se adicione uma certa quantidade de fibras, fatalmente se obterá um excelente compósito de alta resistência mecânica, principalmente a tração.

4.2.3 Módulo de elasticidade

Este experimento foi elaborado tomando-se por base as normas NBR 8522 Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão/deformação, e as

normas americana ASTM D695 - Standard test method for compressive properties of rigid plastics e D3410 - Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading.

Por impossibilidade de o Laboratório de Construção Civil fornecer condições para o levantamento do módulo de elasticidade das argamassas em estudo, optou-se por utilizar os equipamentos do Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos.

Por se tratar de equipamento automatizado, específico para ensaios de corpos de prova poliméricos de pequenas dimensões e baixa resistência mecânica, poucos ensaios puderam ser efetuados e os dados mostrados abaixo expressam apenas uma rápida visão do comportamento desses compósitos frente às suas características de módulo de elasticidade.

Basicamente duas linhas de pesquisa foram efetuadas. Na primeira delas levantou-se o comportamento do módulo de elasticidade entre argamassas com 200,0g de calcário e 20% de polímero nas relações 1:2; 1:1,5 e 1:1; a Tabela 20 mostra os resultados obtidos do primeiro experimento. Na outra, observou-se o comportamento das argamassas com 20% de polímero na relação 1:2, variando-se a sua massa específica; na Tabela 21 são apresentados os dados obtidos deste segundo experimento.

TABELA 20 MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS DE RELAÇÃO DE POLÍMERO DIFERENTES			
TIPO DE ARGAMASSA	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
200 20% 1:2	4,51	6,2%	112,2
200 20% 1:1,5	5,70	7,7%	118,6
200 20% 1:1	4,05	6,9%	127,5
Dados obtidos pelo GQATP/IQSC-USP			

*A porcentagem de alongamento foi da mesma ordem de grandeza para todas as argamassas; entretanto, nas argamassas de relação de polímero de 1:1,5 há um discreto aumento nesses valores.



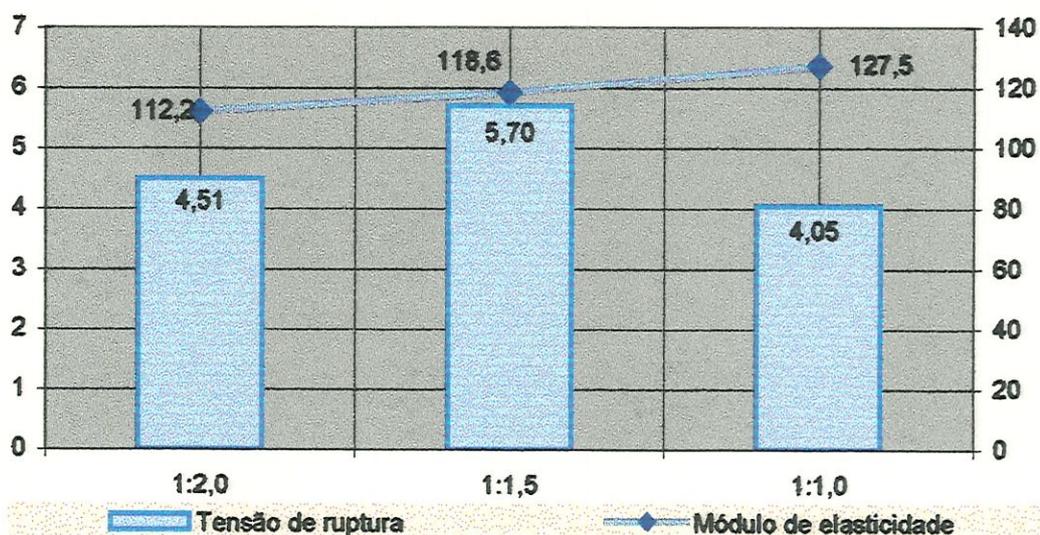


GRÁFICO 14 DESEMPENHO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS PADRÃO COM RELAÇÕES DE POLÍMERO DIFERENTES

Analisando-se o Gráfico 14, novamente se nota que há um pequeno ganho de resistência nas argamassas de relação 1:1,5. Já o módulo de elasticidade tem um aumento discreto conforme se aumenta o teor de políol em um composto.

Na tabela a seguir (Tabela 21), estão apresentados os resultados das amostras de argamassas de densidades diferentes.

TABELA 21 MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS DE DENSIDADES DIFERENTES			
TIPO DE ARGAMASSA	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
150 20% 1:2	1,99	5,9%	48,4
175 20% 1:2	3,18	5,6%	78,3
200 20% 1:2	5,82	6,1%	111,3
225 20% 1:2	6,20	7,6%	127,6
250 20% 1:2	12,54	10,0%	160,2
275 20% 1:2	16,87	12,2%	165,8

dados obtidos pelo GGATP/IQSC-USP

No caso de argamassas de densidades diferentes, tem-se uma mudança visível nos valores expressos dos módulos de elasticidade de cada amostra, que aumentam com o aumento da densidade como se pode observar pelo Gráfico 15.

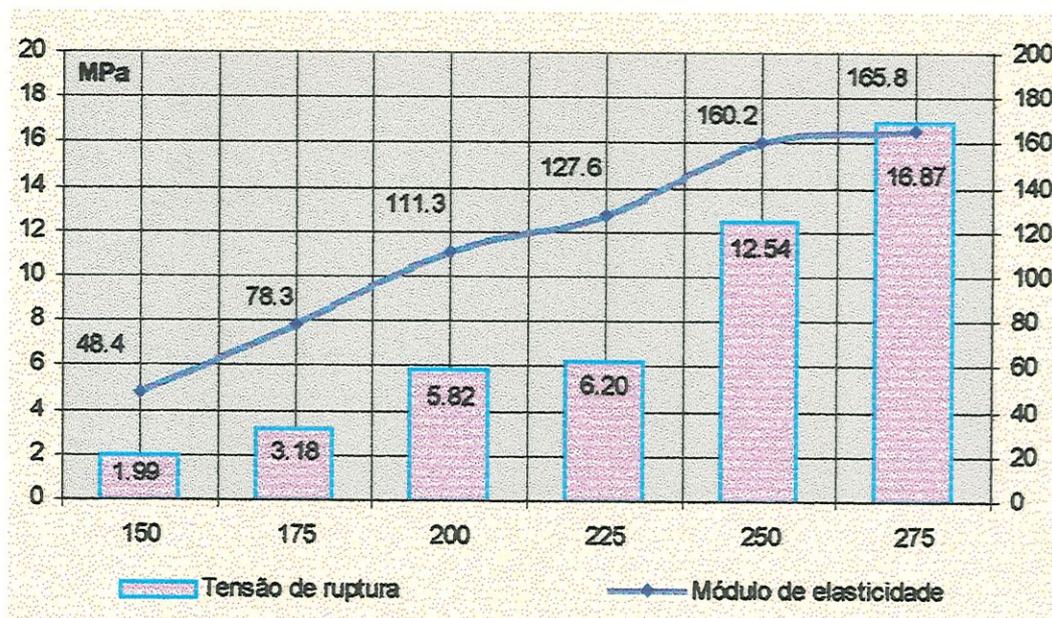


GRÁFICO 15 DESEMPENHO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS DE DENSIDADES DIFERENTES

Pelos números apresentados, as argamassas poliméricas celulares possuem módulo de elasticidade baixo. Devido a isso, pode-se afirmar que essas argamassas são potencialmente interessantes em aplicações onde o aparecimento de trincas e fissuras, devido a problemas de contração e retração, possam ocorrer.

4.2.4 Comentários sobre os resultados mecânicos obtidos

Pelas características levantadas, já se pode concluir que as argamassas poliméricas celulares não se prestam a certas condições que envolvam grandes esforços mecânicos; contudo, para os usos que já comentados no decorrer deste trabalho, como peças pré-moldadas para vedação, placas de forro, enchimentos e outras utilizações que envolvam níveis moderados a esforços mecânicos, as argamassas poliméricas celulares poderão atender com vantagens a maioria dessas aplicações.

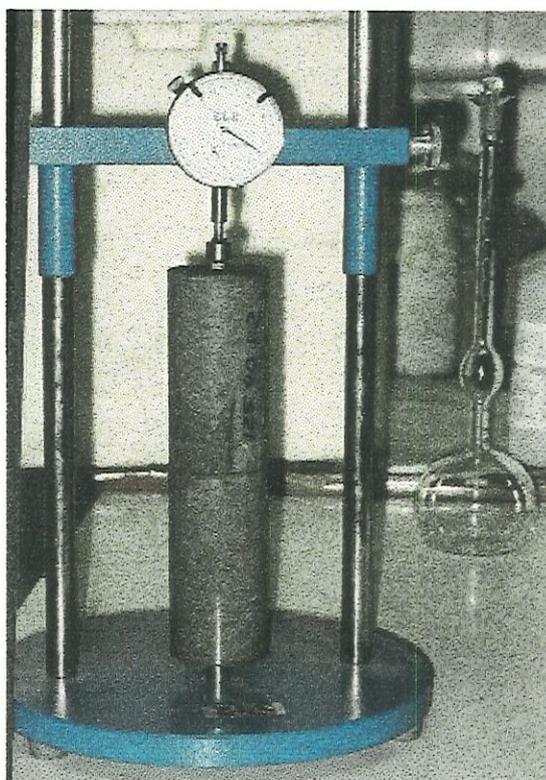
4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS LEVANTADAS

Os ensaios que serão descritos a seguir foram feitos visando a um complemento na caracterização desse compósito. Os ensaios elaborados para determinar as características físicas do material são os que mais se utilizam para caracterizar materiais de Construção Civil. Longe de se fechar um assunto, nesses ensaios procurou-se mais uma visão geral do comportamento das argamassas do que se chegar a um conhecimento mais aprofundado.

4.3.1 Retração às primeiras idades (até 30 dias)

Este ensaio baseou-se na norma NBR 8490 - Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem. Na impossibilidade de se moldarem corpos de prova prismáticos, foi necessário que se adaptassem os ditames da norma às configurações dos corpos de prova de que se dispunha; no mais, toda a etapa de medição da retração dos corpos de prova foram os especificados.

Para se conseguir medir as retrações, foi utilizado o dispositivo mostrado na Figura 13 dotado de um micrômetro com precisão de 0,002mm. Nele, a base que contém o micrômetro é previamente posicionada e fixada em uma altura em que se possam encaixar e medir todos os corpos de prova durante o decorrer do ensaio, o qual leva vários dias. Os corpos de prova são colocados na vertical, entre os apoios do suporte e do micrômetro e, nesta posição, foram realizadas as leituras.



Nas medições, os corpos de prova eram posicionados e girados até se obter a menor medida encontrada, que então era anotada. Essa orientação serve para que, caso as extremidades metálicas não se encontrassem perfeitamente uniformes, o que efetivamente ocorreu em alguns espécimes, se tivesse um parâmetro que evitasse a medição com erro.

Cada corpo de prova foi medido e pesado uma vez por dia, durante um período de 30 dias.

Embora todo esse processo tenha sido feito em sala climatizada sob condições moderadamente controladas (temperatura de cerca de 21°C +/-3°C e umidade relativa do ar em torno de 50% +/-10%), nas últimas medições, percebeu-se que os corpos de prova estavam sofrendo influência da temperatura ambiente e não mais estavam se retraindo perceptivelmente, mas sim, variando sua dimensão longitudinal em decorrência da variação térmica.

FIGURA 13 CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA A MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO LINEAR DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES

Na impossibilidade de se moldarem corpos de prova prismáticos das argamassas poliméricas celulares¹¹⁵, optou-se por realizar o ensaio de retração elaborando corpos de

¹¹⁵ Conforme especifica a norma de retração.

ensaio pela união de dois corpos de prova moldados pelas formas de argamassa. Esses corpos de prova foram colados dois a dois pelas suas extremidades com cola epóxi (*araldite*) e receberam, em sua extremidade livre, apoios também colados, necessários para que o novo corpo de prova pudesse ser ensaiado no aparelho de medição.

Nessa nova configuração, os corpos de prova ficaram com tamanhos de cerca de 215 mm, contando-se a partir das extremidades dos apoios, um pouco menores do que descreve a norma. Mas sabendo-se que esta tem por objetivo final fornecer um percentual de retração e não um número absoluto, o tamanho do espécime não causaria influências nos resultados. A Figura 14 demonstra a configuração proposta do corpo de prova para o ensaio; convém notar o apoio colado ao corpo de prova, elaborado a partir de uma esfera de rolamento colada a uma base, onde se usou uma porca de aço.

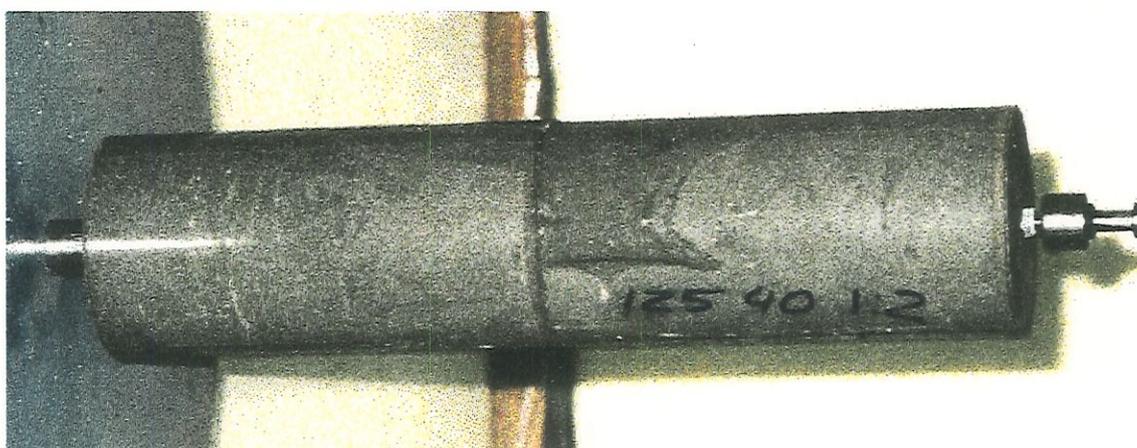


FIGURA 14 DUPLA DE CORPOS DE PROVA 50x100mm PREPARADOS PARA ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR

O preparo dos corpos de prova se iniciou a partir do momento que foram desformados. Conforme foram sendo produzidos os lotes, estes permaneciam em banho térmico por um período de 90 minutos e, depois de desformados, foram colocados em uma câmara de vácuo por um período de 45 minutos. Isso se fez necessário para que os espécimes pudessem liberar o excesso de água de seu interior já que, em um ensaio preliminar, o excesso de água afetou negativamente a colagem dos corpos de prova.

Retirados do vácuo, eles foram colocados alguns minutos sobre toalhas de papel para que esta pudesse retirar sua umidade superficial e, em seguida, colados entre si por um adesivo a base de epóxi (*araldite*) e, uma hora e meia depois, foram colados seus apoios com *superbond* e, depois de fixados, foi reforçada essa união com um arremate de cola epóxi.

O início das medições se iniciou cerca de 2 horas e meia depois de desformados (4 horas depois do início de sua produção) e essas medições foram repetidas diariamente por um período de 30 dias. A Tabela 22 mostra os resultados obtidos

TABELA 22 RETRAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES COM RELAÇÃO DE POLÍMERO DE 1:2.						
TIPO DE ARGAMASSA	COMPR. INICIAL (mm)	RETRAÇÃO MÁXIMA (%)	VALORES DA RETRAÇÃO (mm/m)	MASSA INICIAL¹¹⁶ (g)	PERDA DE MASSA (g)	% DE PERDA (%)
200 20%	213,9	0,18%	1,5	510,0	32,8	6,43%
250 20%	214,1	0,14%	1,3	611,2	30,1	4,92%
150 30%	215,2	0,17%	1,5	410,1	31,4	7,66%
200 30%	214,3	0,13%	1,0	540,1	26,1	4,83%
250 30%	215,4	0,10%	1,0	606,2	12,8	2,11%
150 40%	215,3	0,15%	1,1	438,7	28,6	6,52%
200 40%	214,5	0,29%	2,4	565,6	17,4	3,08%

Dados obtidos experimentalmente.

Por sua polimerização ser uma reação exotérmica e por ter-se utilizado do artifício da polimerização em banho térmico a 60°C, as argamassas demandam um certo tempo até que estabilizem sua temperatura interna com a temperatura ambiente. Foi notado que esta estabilização só é conseguida em períodos superiores a 4 ou 5 horas. Assim, a diferença entre a medição inicial e a feita com 1 dia sofre influência tanto da retração característica da argamassa, quanto uma retração térmica do material.

Caso se adote, como início de ensaio, argamassas com um dia de idade, pode-se garantir, desde que estas permaneçam em temperatura e unidade controladas, que as retrações observadas nessas condições são apenas influenciadas pela retração natural do compósito.

O Gráfico 16, na seqüência, mostra as curvas de retração a partir do dia em que as argamassas foram elaboradas. A curva da argamassa 200 40% 1:2 é mostrada em separado, no Gráfico 17, devido a problemas na escala que os valores atingiram.

¹¹⁶ Na massa inicial estão sendo computados: a massa dos corpos de prova recém obtidos, a massa dos apoios de aço das extremidades e a massa da cola utilizada para a união dessas partes.

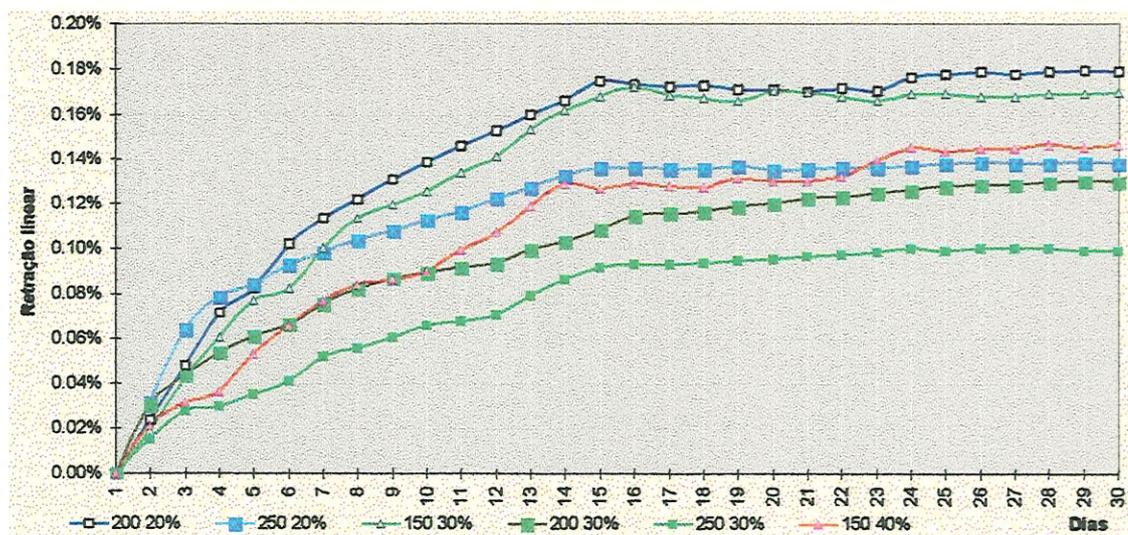


GRÁFICO 16 CURVAS DE RETRAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE DENSIDADES E PORCENTAGENS DE POLÍMERO DIFERENTES

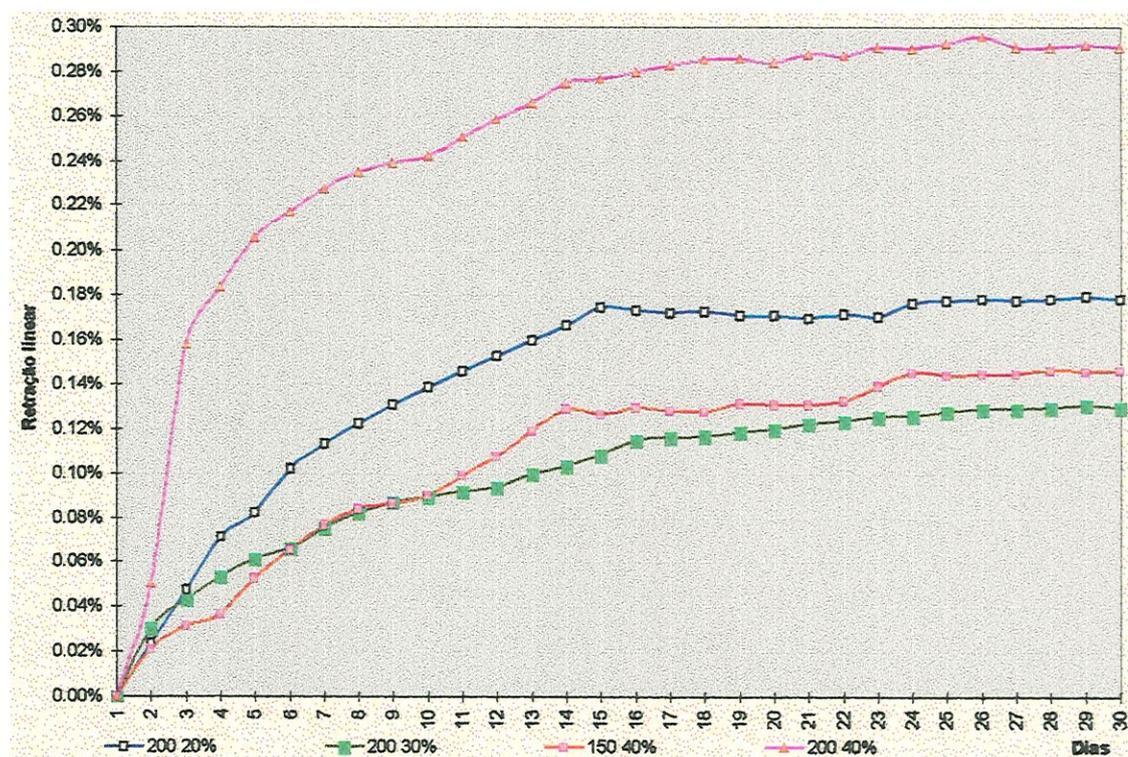


GRÁFICO 17 CURVAS DE RETRAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE DENSIDADES E PORCENTAGENS DE POLÍMERO DIFERENTES

Para um melhor entendimento, manteve-se a mesma escala dos gráficos e, no segundo, algumas curvas foram preservadas para referência.

Provavelmente pela quantidade de massa fresca e pela alta porcentagem de polímero da argamassa 200 40% 1:2¹¹⁷, este compósito teve um comportamento bastante diferente das outras argamassas, sobretudo quanto à sua retração nos dois primeiros dias.

Com relação à perda de massa sofrida durante o ensaio de retração, os valores do Gráfico 18 mostram que, para um aumento de densidade, tem-se um declínio na perda de massa sofrida pela amostra; o mesmo ocorre com o aumento da porcentagem de polímero no compósito que, quanto maior, menor é a perda.

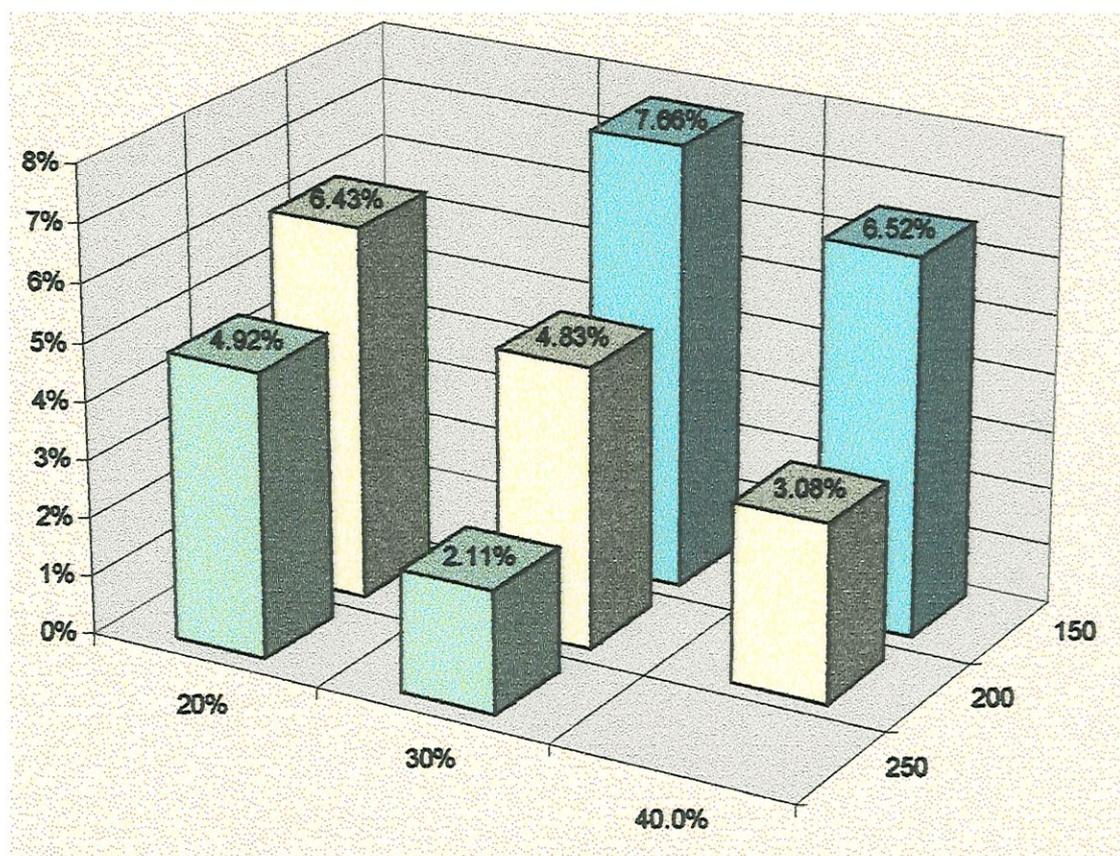


GRÁFICO 18 PERDA DE MASSA DAS ARGAMASSAS DURANTE O ENSAIO DE RETRAÇÃO

NOTA: Para efeito de proporcionar uma melhor visualização do gráfico, a ordem dos valores de quantidade de carga foi invertidas com relação ao que estava se adotando até aqui.

Apenas para fornecer uma visão quantitativa deste comportamento, o quadro em seguida (Tabela 23) traz alguns valores da retração de compósitos na construção civil. Eles foram obtidos a partir de consultas à bibliografia e também através de contatos pessoais com profissionais da área. Não cabe aqui colocar uma lista infundável de materiais e, sim, promover algum parâmetro de referência.

¹¹⁷ Argamassas com 200,0g de carga, 40% de polímero e relação de componentes do polímero (políol e prepolímero) de 1:2, conforme notação apresentada no item 3.2.1

COMPÓSITO	VALOR DA RETRAÇÃO
Pasta de cimento Portland (CP II E)	entre 0,10 e 0,15%
Argamassa normal de cimento	entre 0,08 e 0,12%
Argamassa de cimento e areia (traço 1:4)	entre 0,09 e 0,13%
Argamassa de cimento, cal hidratada e areia (traço 1:0,5:5)	entre 0,08 e 0,13%
Argamassa de cimento, cal e areia (traço 1:3:12)	entre 0,05 e 0,07%
Argamassa polimérica celular padrão (traço 200,0 20,0% 1:2)	aprox. 0,18%
Argamassa polimérica celular padrão (traço 250,0 30,0% 1:2)	aprox. 0,10%

Desse experimento pode-se concluir que o desempenho global das argamassas poliméricas quanto à retração é bom, pelo que se pôde levantar na bibliografia e em catálogos técnicos de produtos similares. Se for descontado o primeiro dia das medições, quando a argamassa ainda estava sob influência da retração térmica, os valores são ainda mais favoráveis, revelando retrações inferiores a vários dos produtos similares encontrados no mercado.

4.3.2 Absorção de água

Para este ensaio, foi consultada a norma NBR 9778 Argamassas e Concretos Endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios, e massa específica e dela se retiraram as diretrizes necessárias para a sua realização.

Tal qual o experimento anterior, esta observação das características de absorção de água das argamassas poliméricas celulares de poliuretana de mamona englobou duas etapas distintas: na primeira, Tabela 24 e Gráfico 19, procurou-se observar o comportamento de argamassas de relações de polímero e densidades diferentes e na segunda etapa, Tabela 24 e Gráfico 20, observou-se o comportamento de amostras com variação na porcentagem de polímero. Os resultados podem ser vistos a seguir:

Tipo de compósito (carga e relação)	Massa do CP seco ao ar (g)	Massa do CP seco em estufa (g)	Teor de umidade do CP (g)	Teor de umidade do CP (%)	Massa do CP saturado (g)	Massa de água absorvida (g)	% em relação massa seca	Densidade (seco ao ar) (g/cm ³)	Densidade (seco em estufa) (g/cm ³)
150 1:2	175,2	174,0	1,1	0,6%	235,8	61,8	35,5%	0,89	0,89
150 1:1,5	175,2	173,7	1,5	0,9%	236,2	62,5	36,0%	0,89	0,88
150 1:1	174,6	173,2	1,4	0,8%	237,1	64,0	36,9%	0,89	0,88
200 1:2	237,4	236,3	1,1	0,4%	279,3	43,0	18,2%	1,21	1,20
200 1:1,5	236,8	235,7	1,0	0,4%	287,1	51,4	21,8%	1,21	1,20
200 1:1	235,1	233,3	1,9	0,8%	280,4	47,2	20,3%	1,20	1,19
250 1:2	289,1	284,5	4,6	1,6%	320,8	36,3	12,8%	1,47	1,45
250 1:1,5	287,6	283,2	4,3	1,5%	313,4	30,2	10,7%	1,46	1,44
250 1:1	289,0	285,0	4,0	1,4%	313,3	28,2	9,9%	1,47	1,45

Dados obtidos experimentalmente

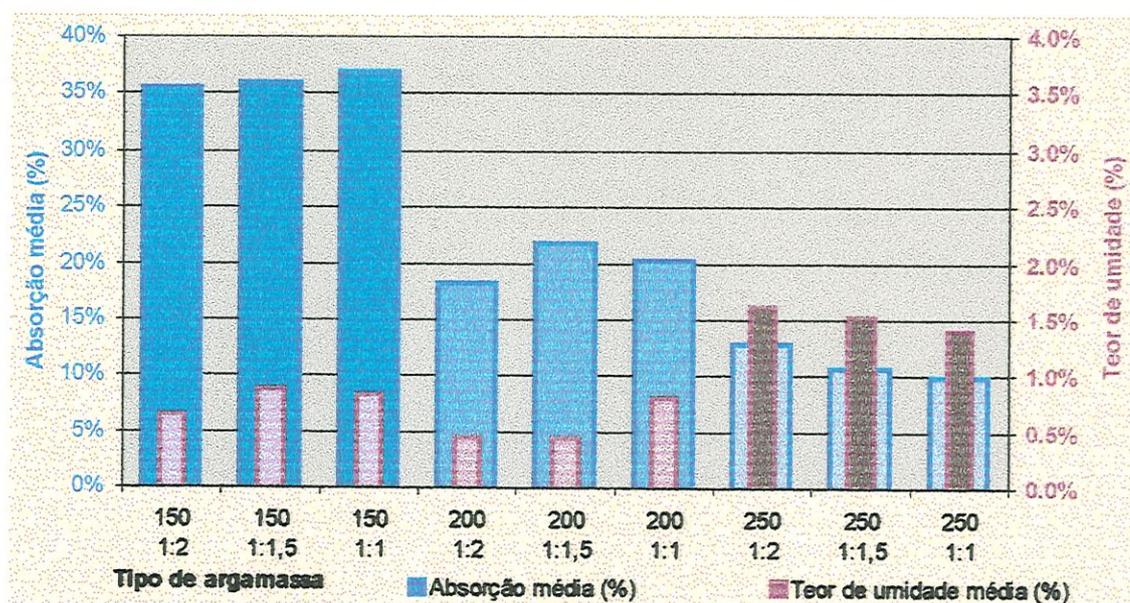


GRÁFICO 19 ABSORÇÃO MÉDIA E UMIDADE MÉDIA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA POLIMÉRICAS CELULARES

Independentemente das relações de polímero presentes em cada grupo, a diferença tanto na absorção, quanto no teor de umidade dos corpos de prova foi pequena entre si, o que estaria dentro do erro experimental. Testes mais extensos deveriam ser realizados para aferir se realmente há influência da relação de polímero sobre o grau de absorção de água e o teor de umidade desses compósitos.

Pela análise dos dados contidos na Tabela 24 e pela observação do Gráfico 19 pode-se observar que:

- Naturalmente, por conter um volume muito maior de vazios, as argamassas de mais baixa densidade tiveram uma absorção de água maior que as de densidades mais altas (na média, 36% para as com 150,0g de carga, 20% para as de 200,0g e 11% para as de 250,0g)
- O teor de umidade, entretanto, variou entre uma densidade e outra. Esse teor não se apresenta de modo linear conforme a variação das quantidades de carga das argamassas, pois se obtiveram os valores mais baixos nos corpos de prova de 200,0g de carga, valores um pouco maiores para os de 150,0g de carga e sensivelmente maiores nos de 250,0g.

A Tabela 25 expressa em números essas duas observações:

TABELA 25 TEOR DE UMIDADE DAS ARGAMASSAS			
QUANTIDADE DE CARGA	150,0	200,0	250,0
Absorção de água (em números absolutos)	36,1%	20,1%	11,1%
Absorção relativa (CPs de 200,0g = 1)	1,8	1,0	0,6
Teor de umidade (em números absolutos)	0,77%	0,53%	1,50%
Teor de umidade relativo (CPs de 200,0g = 1)	1,4	1,0	2,8
Valores calculados baseados em dados experimentais			

Por esses números, pode-se notar que:

- No primeiro caso, para uma absorção média de 20,1% nas argamassas de 200,0g de carga, as argamassas de 150,0g absorvem um volume de água 80% maior, e as de 250,0g absorvem apenas 60% do volume de água das *argamassas padrão* (com 200,0g de carga e 20% de polímero)
- O teor de umidade das argamassas de 200,0g é o menor entre as três ensaiadas, sendo que a de 150,0 gramas apresenta 40% mais umidade que a de 200,0g, e a de 250,0g apresenta 180% a mais de umidade que a de 200,0g.

As argamassas ensaiadas foram todas com porcentagens de polímero de 20%; obviamente, porcentagens maiores de polímero irão reduzir essa absorção para níveis bem inferiores, como se pode observar no segundo ensaio realizado expresso na Tabela 26.

Convém notar, entretanto, que este ensaio foi realizado utilizando-se os corpos de prova anteriormente ensaiados a retração; assim, ao invés de se ter um corpo de prova de 50 x 100 mm tem-se agora um de 50 x 200 mm. Esse fato, entretanto, não invalida o ensaio, já que a norma não prescreve um determinado corpo de prova com volume definido; ao contrário, comenta-se que se pode ensaiar até pedaços de argamassas e concretos. Esses corpos de prova foram elaborados utilizando-se a resina REC-02.

TABELA 26 ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES COM VARIÇÃO NA DENSIDADE E NAS PORCENTAGENS DE POLÍMEROS (REC-02)

Argamassa	Massa do CP seco ao ar (g)	Massa do CP seco em estufa (g)	Teor de umidade do CP (g)	Teor de umidade do CP (%)	Massa do CP saturado (g)	Massa de água absorvida (g)	% em relação massa seca	Densidade (seco ao ar) (g/cm ³)	Densidade (seco em estufa) (g/cm ³)
200 20% 1:2	476,5	474,4	2,1	0,4%	541,6	67,2	14,2%	1,21	1,21
250 20% 1:2	580,7	577,8	2,9	0,5%	659,1	81,3	14,1%	1,48	1,47
150 30% 1:2	378,6	376,6	2,0	0,5%	444,1	67,5	17,9%	0,96	0,96
200 30% 1:2	509,9	501,4	8,5	1,7%	544,4	43,0	8,6%	1,30	1,28
250 30% 1:2	592,9	581,7	11,2	1,9%	622,2	40,5	7,0%	1,51	1,48
125 40% 1:2	339,1	336,3	2,8	0,8%	392,2	55,9	16,6%	0,86	0,86
150 40% 1:2	406,3	405,9	0,4	0,1%	449,0	43,1	10,6%	1,03	1,03
200 40% 1:2	545,8	529,8	16,0	3,0%	557,3	27,5	5,2%	1,39	1,35

Dados obtidos experimentalmente

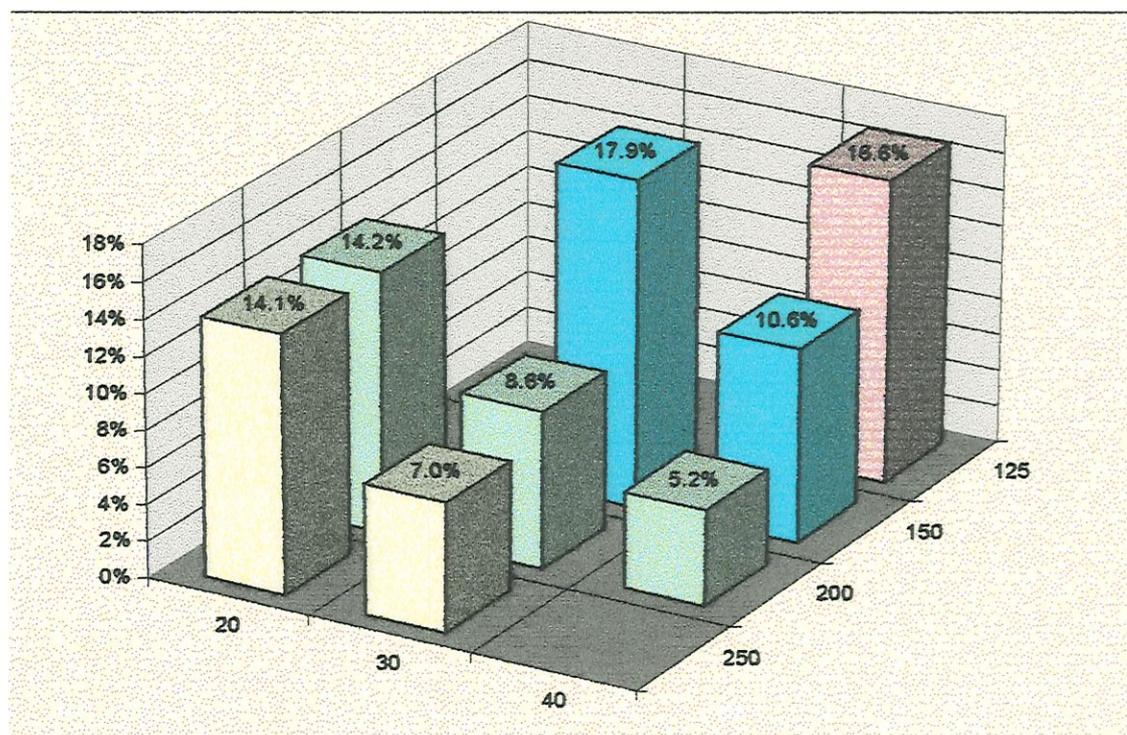


GRÁFICO 20 ABSORÇÃO MÉDIA E UNIDADE MÉDIA DE ARGAMASSAS COM DENSIDADES E PORCENTAGENS DE POLÍMERO DIFERENTES

Comparando-se os resultados deste segundo ensaio com os obtidos no primeiro, pode-se notar que os valores, para argamassas de mesma configuração, são pouco inferiores que dos precedentes, o que vem ao encontro com o aumento da qualidade das argamassas obtidas com a REC-02.

Essa melhora na diminuição da absorção das argamassas pode ser explicada tanto pelo uso da resina REC-02, que conferiria uma maior impermeabilidade às argamassas, quanto pelo aprimoramento das condições de moldagem, que resultaria em corpos de prova mais homogêneos e sujeitos a um menor número de falhas.

4.3.3 Comentários sobre os resultados físicos obtidos

Os resultados desta etapa de ensaios de propriedades físicas revelaram que as argamassas poliméricas celulares superaram as expectativas iniciais pois, mesmo se tratando de um material com alto índices de vazios e baixa rigidez, ela apresentou desempenho superior a muitos materiais de uso comum.

4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Não foi o objetivo deste trabalho levantar o comportamento químico dos compósitos estudados.

De antemão, já se sabe que a resistência química das poliuretanas de mamona é alta, comparável, e em muitos casos superior, aos melhores polímeros encontrados no mercado.

Embora se trate de um material leve, de alto índice de vazios, as argamassas poliméricas celulares devem atender à maioria dos quesitos de resistência química para materiais de uso corriqueiro. Evidentemente, um estudo mais aprofundado no futuro revelaria quais as verdadeiras fronteiras desse material.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Sob muitos aspectos, as argamassas poliméricas celulares e principalmente seu agente aglomerante, o poliuretano derivado do óleo de mamona, são materiais de enormes potencialidades junto à Construção Civil. A versatilidade de usos, aliada às suas características físicas, químicas e mecânicas, o coloca entre os principais materiais inovadores hoje em dia. Isso é ainda mais potencializado pelas características de sustentabilidade que ele apresenta.

Entretanto, o que se desenvolveu até aqui em termos de conhecimento e uso desses compósitos e desses aglomerantes não é o suficiente para se ter um real domínio do material; novos estudos relativos ao levantamento das características das argamassas poliméricas celulares se fazem necessários para se poder objetivar melhor as necessidades de desenvolvimento.

5.1 PROBLEMAS ENFRENTADOS NA REALIZAÇÃO DESSE ESTUDO

Como já foi amplamente comentado ao longo deste trabalho, os problemas decorrentes de não se dispor de métodos mecânicos de mistura, reduziram muito o volume e a amplitude dos ensaios. Os processos manuais de mistura provocaram também o aparecimento de falhas de moldagem de algum modo que comprometiam a qualidade das amostras.

Sem dúvida, as dificuldades de atingir uma boa uniformidade da massa fresca do compósito e subsequente moldagem e adensamento antes que esta massa iniciasse seu processo de polimerização e, por conseqüência, a formação de pele superficial, foram o principal fator que gerou uma dispersão dos dados nos ensaios de resistência a compressão.

5.2 POTENCIALIDADES DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS CELULARES

Embora já de posse de uma ampla gama de dados referentes aos materiais e compósitos desenvolvidos, estes ainda carecem de um aprofundamento maior nas suas características físicas e químicas para que se possam explicar adequadamente certos comportamentos e incompatibilidades ainda não totalmente entendidos.

Outros ensaios referentes a determinação de condutibilidade térmica, absorção acústica, desprendimento de gases tóxicos em situações de incêndio¹¹⁸, condutibilidade elétrica, entre outros, não foram visualizados neste trabalho, mas estão em vias de serem realizados por outras pesquisas, embora os dados iniciais fornecidos pela equipe do GQATP-IQSC mostrem que, para alguns desses casos mencionados, as características da espuma de poliuretano vegetal são amplamente favoráveis à sua utilização.

Por esses dados já se pode concluir que compósitos de resina poliuretana de mamona na forma de espuma rígida, com adição de cargas minerais, se prestam para a fabricação de blocos e chapas pré-fabricados para uso tanto em ambientes moderadamente agressivos, quanto para necessidades termo-acústicas diferenciadas.

Assim, baseado nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se afirmar que as argamassas poliméricas celulares possuem as características necessárias para conformarem blocos utilizáveis em alvenaria de fechamento ou mesmo para alvenaria estrutural armada. Também pode-se afirmar que, desde que se faça uso de equipamentos adequados, as argamassas poliméricas celulares podem ser usadas como argamassa projetada. Em ambos os casos se beneficiaria de um material leve, de boa resistência e de menor impacto ambiental que os de uso comum atualmente.

5.2.1 Viabilidade dos compósitos poliméricos para a obtenção de peças pré-moldadas ou moldadas *in situ*

* Conforme comentado, desde que se tenha meios de aplicar as argamassas ainda frescas dentro dos moldes, não há o menor problema em utilizar este compósito para a elaboração de peças pré-moldadas pois este material atende aos preceitos que um bom material para pré-moldados necessita:

- Seu tempo de início de polimerização é reduzido, viabilizando-o não apenas para pré-moldados, mas também para ser jactado diretamente sobre superfícies.
- Em cerca de 30 minutos ele pode ser desformado, tendo adquirido resistência mecânica suficiente para poder ser manipulado e transportado. Esse tempo de desforma garante uma altíssima reutilização dos moldes.
- Não requer cura úmida ou de outro tipo qualquer, podendo ser estocado sem maiores problemas.

¹¹⁸ O artigo de AGNELLI J. A. M. & GALLO J. B. *Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio*. In: POLÍMEROS: CIÊNCIA E TECNOLOGIA - ABPol, ano 8, nº 1 - Jan/Mar 1998, pgs. 23 a 37 trata detalhadamente da problemática do comportamento dos polímeros sob condições de incêndio.

- Algumas horas depois de elaborado, o componente já pode ser utilizado pois já adquiriu grande parte de sua resistência mecânica final.
- É extremamente leve se comparado a outros materiais empregados em pré-moldados, facilitando o transporte e manuseio das peças
- O peso próprio do material é pequeno se comparado com sua resistência.
- OBS.: Essas características contribuem para na possibilidade de utilizar este compósito na moldagem de painéis do tipo sandwich (de paredes duplas) em obra, desde que se tenha em mãos equipamentos específicos para tal.

Não se tem como objetivo deste trabalho o desenvolvimento de aplicações para esse compósito; contudo, pode-se vislumbrar algumas aplicações bastante convenientes para ele.

A principal seria na forma de blocos, painéis e outros elementos pré-moldados para uso tanto em fechamentos verticais, como paredes e divisórias, como, para placas de forros e até de pisos. Em todos esses casos os elementos atuariam não apenas como elementos de fechamento, mas também como isolantes térmicos e também acústicos.

Se comparadas as resistências mecânicas das argamassas poliméricas celulares com concretos celulares convencionais, pode-se ver que seus valores são próximos. Como é natural, os concretos celulares são mais resistentes quando possuem massas específicas mais elevadas, mas quando esses valores decrescem para $1,2 \text{ g/cm}^3$ ou menos, os valores das resistências a compressão passam a se equiparar.

Podem-se notar, no quadro abaixo, os valores obtidos experimentalmente para as argamassas poliméricas celulares com os valores apresentados pelo catálogo técnico de um fabricante de concretos celulares convencionais.

As argamassas em questão são as que possuem 20% de polímero em relação à carga de inertes e a proporção dos componentes do polímero é de 1:2 (poliol/prepolímero). Esta relação é a mais econômica em termos de custo de produção e, por isso, a mais indicada para fazer frente aos concretos celulares convencionais. Em ambos os casos estão se comparando materiais de idades semelhantes: 28 dias para o concreto convencional e 31 dias para as argamassas poliméricas celulares.

DENSIDADE (g/cm ³)	ARGAMASSAS C/ 20% DE POLÍMERO (MPa)	ARGAMASSAS C/ 40% DE POLÍMERO (MPa)	CONCRETO CELULAR CONVENCIONAL (MPa) *
1,8	15,4	--	26,4
1,6	11,3	19,8	16,8
1,5	7,5	15,0	13,7
1,2	5,6	12,4	5,4
1,1	2,5	9,4	3,8
1,0	2,1	8,0	2,0

* fonte: Catálogo técnico do concreto celular Leichtbeton da Leichtbauer

As curvas de resistência para cada um desses materiais são diferentes. Apresentam ganhos maiores nos concretos celulares convencionais, como pode-se ver no Gráfico 20 em seqüência, mas nota-se que, para as densidades iguais ou inferiores a 1,2 g/cm³, ambas as curvas possuem valores semelhantes.

Fica lógico concluir que, assim que for possível um maior aprofundamento no conhecimento das cargas mais favoráveis e se puder contar com uma maior eficiência no preparo, de resultaria em uma melhor eficiência mecânica, as argamassas poliméricas celulares poderão fazer frente aos concretos celulares convencionais.

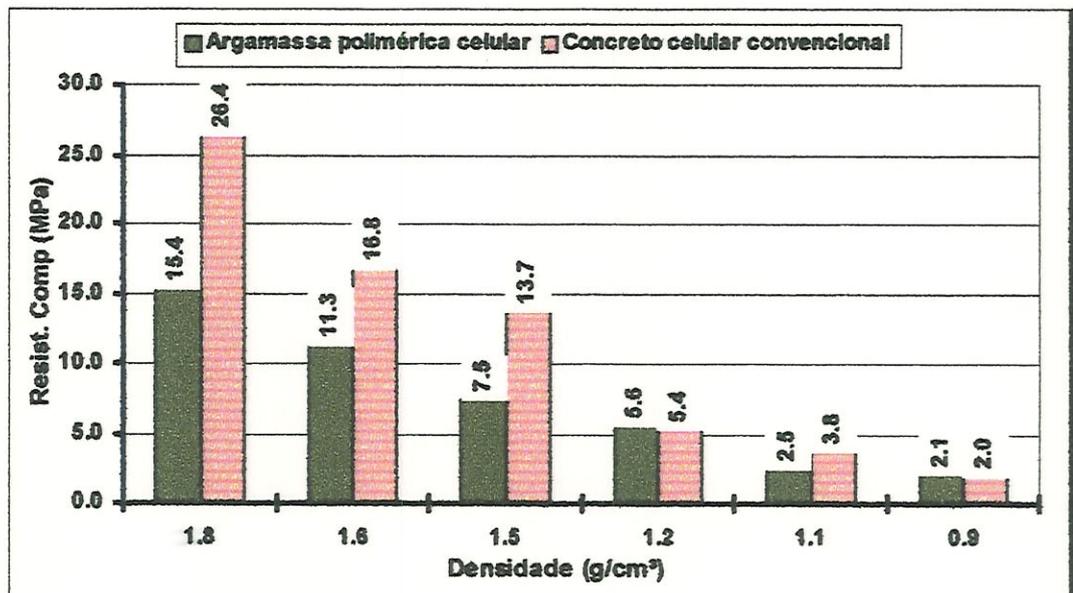


GRÁFICO 20 DESEMPENHO DOS COMPÓSITOS CELULARES

Elementos mais leves, como os blocos do tipo PUMEX ou SIPOREX, com densidades variando de 0,30 e 0,85 g/cm³ também podem ser comparados às argamassas poliméricas

celulares e, nesses casos, os compósitos poliméricos são bastante vantajosos no que diz respeito às resistências mecânicas, de valores um pouco mais altos que os apresentados por esses blocos.

Apenas utilizando-se esses dois exemplos, vislumbra-se uma ampla gama de aplicações das argamassas poliméricas como matéria-prima para a obtenção de peças pré-moldadas leves.

Pode-se, aqui, fazer referência ao bloco de argamassa polimérica desenvolvido pela Thermoblock¹¹⁹, empresa americana que desenvolveu um bloco celular, aglomerado com polímero, e o está comercializando como alvenaria de fechamento e alvenaria estrutural armada para residências. Pelos dados colhidos desse fabricante, esses blocos aliam extrema leveza, bom isolamento térmico e acústico e podem ser grouteados; podem também ser revestidos, cortados e montados com extrema facilidade, são hidrófobos e possuem boas características de segurança em condições de incêndio.

5.2.2 Comportamento com relação a transmissão de calor

Paralelamente ao estudo das argamassas, foi realizado um ensaio simples de desempenho como isolamento térmico que envolveu o tratamento de coberturas, tanto na forma de poliuretanas de alta como de baixa densidade.

Utilizando-se telhas de fibrocimento, foi revestida internamente uma delas com uma camada de 1 centímetro de espuma de poliuretano sem adição de cargas, uma outra telha foi tratada superficialmente com uma camada externa de resina poliuretana de alta densidade, contendo 10% de dióxido de titânio, na forma de revestimento e uma terceira foi ensaiada sem nenhum tipo de tratamento.

As Figuras 15 e 16 melhor demonstram as intervenções feitas nessas telhas.

¹¹⁹ Ver o site da empresa Thermoblock em <http://www.thermoblock.com>, para maiores detalhes técnicos e detalhamento construtivo.

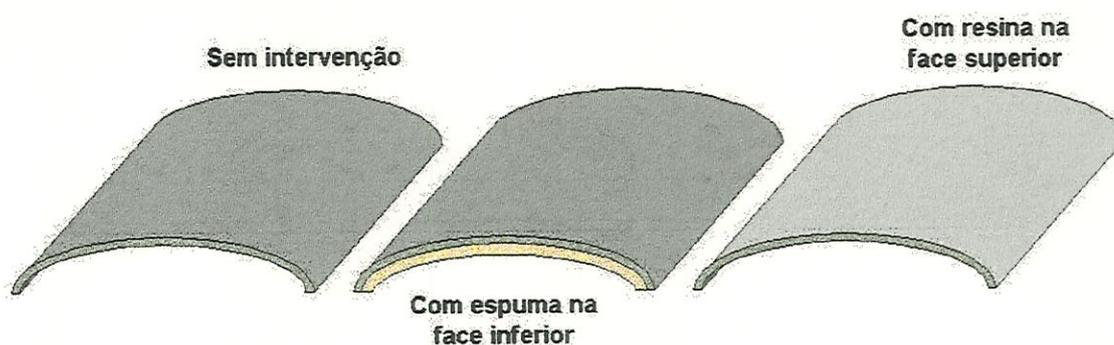


FIGURA 15 ENSAIO DE DESEMPENHO DE COBERTURAS

A Figura acima representa seções esquemáticas de uma telha modular, sua modulação real pode ser vista nas fotos abaixo.

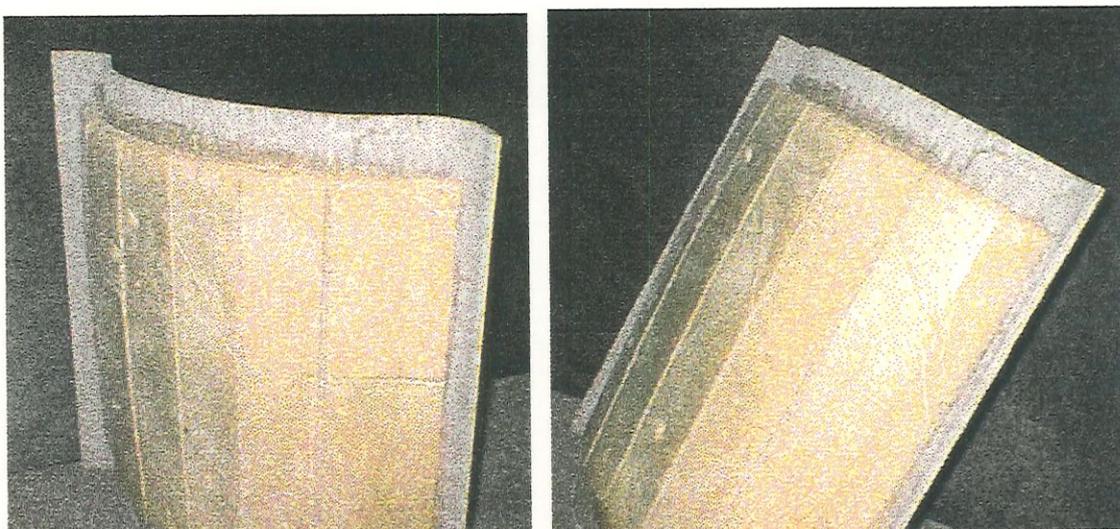


FIGURA 16 DETALHE DA TELHA COM ESPUMA NA FACE INFERIOR

Em cada uma dessas telhas foram colocados três termopares para medição das temperaturas na sua superfície interna. Esses conjuntos de termopares foram ligados a um *datalogger* CR10 (Campbel Scientific Inc.), que operou como uma estação aquisidora de dados digitais ligada às telhas e a uma estação meteorológica que monitorou as condições climáticas (temperatura, direção e velocidade do vento, radiação solar global, pressão atmosférica e umidade relativa do ar). As telhas foram dispostas lado a lado, sobre um suporte de madeira, que teve suas laterais fechadas para simular as condições de uma edificação.

Este ensaio se realizou expondo-se essas telhas ao mesmo tempo à radiação solar global. Os valores coletados pelos termopares instalados sob as telhas foram medidos a cada 5 segundos e suas médias parciais foram armazenadas a cada 5 minutos.

De cada telha, foi calculada uma média das três médias geradas a cada 5 minutos dos dados colhidos pelos termopares. No Gráfico 21 têm-se também a média de TBS (temperatura de bulbo seco¹²⁰) e a média da radiação solar global (todas com valores expressos de suas médias a cada 5 minutos).

Essa estratégia de ensaio pode ser mais bem entendida na obra de VECCHIA(1997). Em resumo, ela mede, comparativamente, o desempenho das coberturas (ou outro sistema qualquer) sob condições dinâmicas do clima. Assim, pode-se testar em um curto espaço de tempo¹²¹ o desempenho de um sistema ou subsistema construtivo.

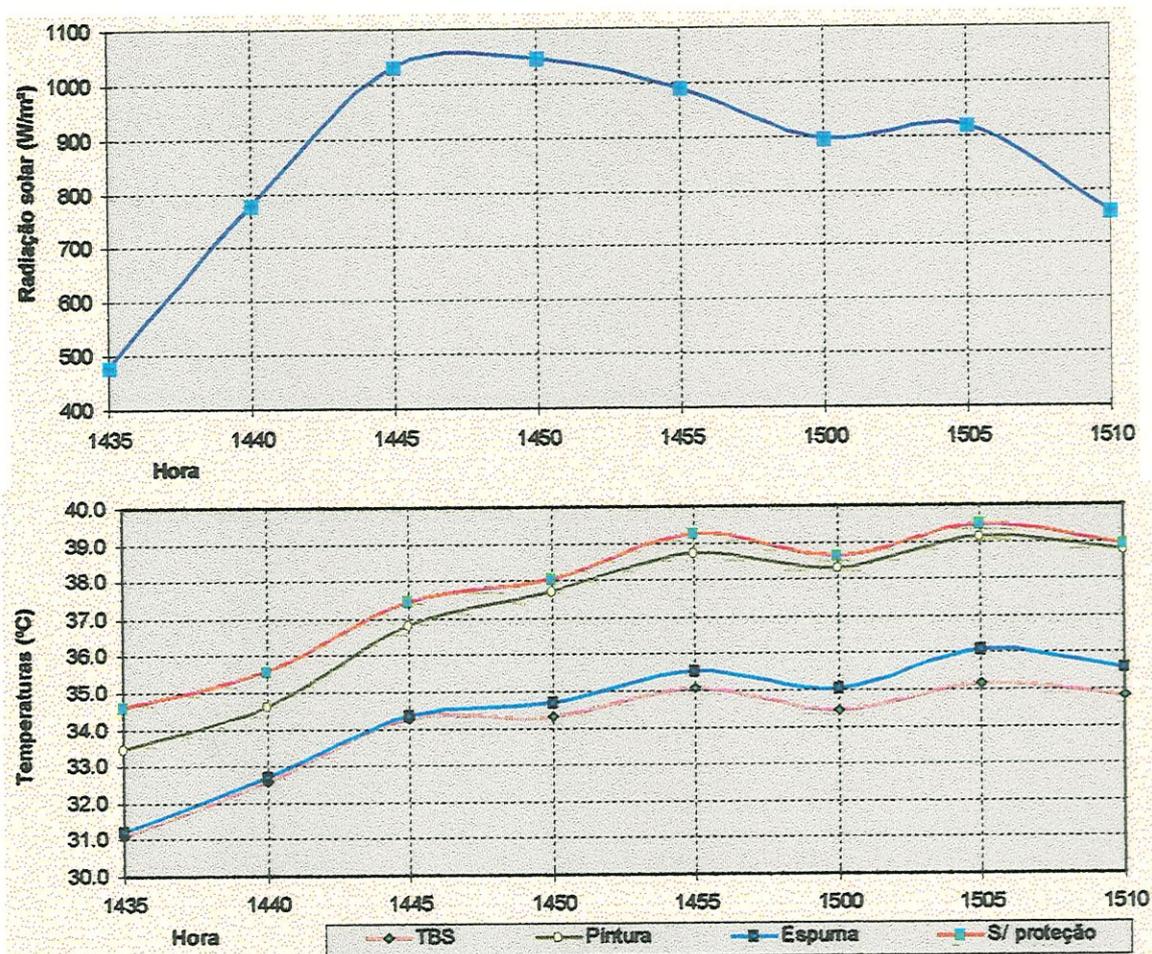


GRÁFICO 21 DESEMPENHO DE COBERTURAS TRATADAS COM RESINA POLIURETANA

Este ensaio foi realizado no dia 28 de dezembro de 1997 em São Carlos, SP (22° 01' latitude sul a 836 metros do nível do mar). As condições climáticas durante a realização do

¹²⁰ Que mediu a "temperatura ambiente" interna ao suporte onde as telhas foram colocadas.

¹²¹ O tempo de um episódio climático qualquer, devidamente acompanhado e analisado.

ensaio apresentavam uma nebulosidade média, com nuvens esparsas (pelo gráfico da radiação solar pode-se notar a atividade dessas nuvens). O tempo total de ensaio foi de 35 minutos, durante os quais a umidade relativa do ar ficou na casa dos 53% (+/-2%); o vento permaneceu no quadrante WSW (247° (+/-3°)) com velocidade de 0,3m/s (+/- 0,1m/s) e a pressão barométrica se manteve constante em 926 mB.

* Por esses gráficos pode-se notar que o desempenho das poliuretanas, principalmente na forma de espuma, é extremamente favorável como isolamento térmico, ficando os valores relativos à temperatura superficial interna muito próximos dos valores da temperatura do ar ambiente (TBS).

O tratamento das coberturas com resina de alta densidade contendo adições de dióxido de titânio também mostra valores mais moderados de temperatura superficial inferior.

Considerados esses dois processos em um mesmo subsistema de cobertura (resina de alta densidade com dióxido de titânio na sua face superior e espuma de poliuretano na inferior), podem-se obter valores ainda mais favoráveis ao conforto térmico, além de prover a cobertura de um eficiente sistema impermeabilizante.

* O uso de dióxido de titânio ou outra carga mineral qualquer como adição nas resinas utilizadas para impermeabilização e também como isolamento térmica é de vital importância para a proteção desta resina contra a ação dos raios UV. Como a maioria dos polímeros, a poliuretana vegetal é atacada pela ação do UV, deixando-a quebradiça em sua superfície¹²². Assim, qualquer tipo de carga incorporada à resina ainda fresca a protege, elevando muito sua vida útil, principalmente em aplicações externas ou que venham a ser sujeitas a grandes níveis de iluminação natural, mesmo que refletida.

Particularmente o dióxido de titânio é ainda mais favorável devido à sua coloração branca, que reflete os raios solares e contribui para uma menor carga térmica na cobertura.

5.3 COMENTÁRIOS FINAIS E PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

O campo da Construção Civil é, cada vez mais, palco de uma intensa busca por novos materiais. Paralelamente, o setor da Construção Civil está cada vez mais voltado para a racionalização de sistemas, para o emprego de materiais com maior envolvimento tecnológico e se distanciando da construção artesanal, que, embora ainda plenamente

¹²² Em um dado experimento, uma laje pré-moldada foi revestida, em sua face superior, com uma placa de espuma poliuretana de mamona. Após um período de tempo de 60 dias esta se apresentava extremamente frágil e com uma coloração bem mais escura que a inicial, o que demonstra que as espumas deste tipo, se não forem protegidas contra o ataque do UV tendem a se degradar ao longo do tempo.

disseminada pelo nosso país, principalmente em obras de pequeno porte, vem rapidamente perdendo força diante de obras de maior complexidade.

O emprego de materiais alternativos, que demandem um menor custo ambiental e que possuam potencialidades de desenvolvimento, entram nesse contexto de forma bastante destacada, já que vem atender a uma demanda tecnológica e respondem favoravelmente aos novos anseios de sustentabilidade.

As argamassas poliméricas celulares demonstraram, neste estudo, que são viáveis como materiais para uso em Construção Civil, pois, além das características propícias ao seu uso aqui levantadas, possuem uma grande versatilidade e podem, com pouco esforço, se adaptar a demandas distintas.

Embora só se tenha contemplado ensaios relativos às suas principais qualidades mecânicas, o que torna claro que estudos subseqüentes devam ser realizados para se ampliar o conhecimento desse material, estes se revelaram suficientemente promissores para que se diga que este compósito pode perfeitamente compor ou mesmo substituir alguns dos sistemas tradicionais que se usa hoje em dia.

Ao longo deste trabalho foi levantada uma série de questões que podem vir a completar e se constituírem novas pesquisas, entre as quais podem-se destacar as seguintes:

- Avaliação do comportamento de matrizes poliméricas com poliuretanas de alta densidade como aglomerante em argamassas e concretos.
- Desenvolvimento de concretos sem finos, com aglomerantes a base de resina poliuretana de alta densidade, para uso como filtros de sólidos no tratamento de efluentes domésticos e industriais.
- Aprofundamento do estudo das argamassas poliméricas celulares com relação (em massa) polioli/prepolímero de 1:1,5 que, conforme foi levantado neste estudo, é o mais adequado para se obter compósitos de melhor desempenho mecânico que os de relação 1:2.
- Contribuição das fibras no desempenho das argamassas poliméricas celulares, que, pelo ensaio preliminar efetuado, mostraram grandes possibilidades para o desenvolvimento de uma argamassa celular de bom desempenho mecânico.
- Estudo mais aprofundado das cargas, minerais ou orgânicas, possíveis de serem aglomeradas com as resinas poliuretanas de baixa densidade, além das que foram contempladas neste estudo.

- Ainda nesta mesma linha, o estudo sobre o encapsulamento de rejeitos industriais aglomerados com poliuretana de origem vegetal. Esta proposta é particularmente interessante pois, sabendo-se de antemão pelas pesquisas já realizadas, que as poliuretanas de possuem uma alta resistência química, rejeitos que normalmente atacam quimicamente matrizes de cimento podem ser encapsulados com esta resina poliuretana. Ou, ainda, em utilizações onde os aglomerantes minerais não possam ser utilizados devido à sua rigidez, como em pisos especiais constituídos de pneus triturados encapsulados com resina.
- Estudo do comportamento de compósitos poliméricos celulares utilizáveis na melhoria das condições ambientais das edificações quanto ao seu isolamento térmico.

Além dessas possibilidades, poder-se-ia listar uma ampla gama de caracterizações e aplicações das poliuretanas de origem vegetal, de alta e baixa densidade, como adesivos; em impermeabilizações; como argamassa injetável em taludes para a contenção de encostas e outros elementos estabilizadores; como suportes para a agricultura hidropônica; em aparelhos de apoio de elementos estruturais; como placas para juntas de dilatação, entre muitas outras aplicações.

Também seria necessário, para ampliar ainda mais este estudo, a realização de uma investigação no campo das características termo-acústicas bem como os estudos do comportamento dos compósitos sobre condições de incêndio.

Não se pode deixar de propor também um estudo que envolvendo um maior aprofundamento da abordagem estatística nos ensaios e pesquisas com novos materiais utilizáveis na Construção Civil. Abordagens estatísticas mais elaboradas e voltadas para o tratamento de dados experimentais, poderiam ampliar o grau de conhecimento e a complexidade das análises, contribuindo para um maior entendimento dos fenômenos, reduzindo a necessidade de repetir, além do necessário, ensaios por vezes complexos e dispendiosos.

Enfim, o horizonte da utilização das resinas poliuretanas de origem vegetal em Construção Civil é extremamente vasto, e os estudos já realizados vislumbraram a imensa gama de potencialidade que este material pode vir a ter.

Além disso, é um material em constante desenvolvimento, podendo ser formulado em inúmeras variações dependendo das necessidades de emprego, o que lhe confere um caráter ainda mais versátil.

5.4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho sobre argamassas poliméricas celulares envolveu alguns aspectos que se revelaram importantes no seu andamento. De início tornou-se claro que o estudo teórico do uso dos polímeros como aglomerantes em argamassas e concretos daria a sustentação necessária para que se pudesse desenvolver apropriadamente os ensaios com as argamassas propostas.

Já de posse desse embasamento teórico, os trabalhos se iniciaram com o levantamento para definição das cargas minerais que poderiam resultar em compósitos mais eficientes para uso em Construção Civil.

Na elaboração das primeiras argamassas testou-se os métodos mais vantajosos para a obtenção dos corpos de prova. Nesta fase foram empregadas várias técnicas e se tentou minimizar os problemas de dosagem, mistura, lançamento, adensamento e cura dos compósitos. Um dos problemas que vieram a tona foi a necessidade de adequar as condições de desmoldagem dos corpos de prova a este novo material.

Por fim, este estudo se concentrou no preparo e na elaboração dos ensaios envolvendo as argamassas produzidas e na análise dos dados obtidos.

5.4.1 Resultados

Na etapa experimental, foram abordados basicamente dois aspectos distintos que se mostram importantes no conhecimento e na utilização prática das argamassas poliméricas celulares de poliuretana de origem vegetal:

- O primeiro deles diz respeito às características das cargas utilizadas para comporem essas argamassas. Ficou claro que, desde que as cargas utilizadas possuam pH neutro ou próximo disso e que não sofram nenhum processo de carbonatação, estas, em princípio, podem ser utilizadas para comporem compósitos com as resinas poliuretanas vegetais. O problema da carbonatação consome com o CO₂ gerado na polimerização, produzindo uma argamassa que não se expande ou se expande deficientemente; já o pH, se este não estiver próximo de 7, haverá interferências na formação do polímero, resultando compósitos de baixa eficiência.

O uso de fibras incorporadas ao compósito induz a um aumento significativo nas suas qualidades mecânicas cabendo para tanto se investigar o comportamento com a utilização de diversos tipos de fibras, vegetais ou sintéticas.

- Outro aspecto diz respeito à qualidade e uniformidade dos compósitos que, se forem produzidos por processos mecânicos, garantiriam uma melhor qualidade e uma menor dispersão dos resultados, ao contrário do que ocorreu neste trabalho, onde não houve essa possibilidade.

Nos processos manuais é essencial que se garanta uma boa trabalhabilidade na massa fresca para que esta possa ser adequadamente homogeneizada e também ser lançada nos moldes sem que se tenha a necessidade de adensar a mistura. O tempo da última etapa de preparo da argamassa, como descrito na Figura 9 deve ser o menor possível para que não surjam descontinuidades nos corpos de prova ocasionadas pela presença de pele no seu interior.

Do resultado da análise dos dados obtidos dos ensaios das argamassas poliméricas celulares pode-se concluir que:

- Das três relações entre os componentes da poliuretana, a que melhor apresentou resultados foi a de 1:1,5, ou seja: uma parte de polioliol para uma e meia partes de prepolímero, em massa. Isso ficou claro nos ensaios de determinação das resistências à compressão.
- O ganho de resistência dos compósitos sofre incremento até os 30 dias, após essa idade, a resistência tende a se manter (exceto o de relação de componentes de polímero de 1:1, que perde resistência a partir do oitavo dia)¹²³.
- O aumento da massa específica aparente das argamassas poliméricas induz a um aumento nas suas resistências mecânicas e na sua eficiência (relação entre resistência e densidade).
- O aumento do teor de polímero presente nas argamassas também provoca o incremento das suas resistências mecânicas e na sua eficiência.
- O módulo de elasticidade é comparativamente mais baixo que o apresentado pelas argamassas de aglomerantes minerais de mesma resistência mecânica, revelando que essas argamassas poliméricas, em comparação com as de aglomerantes minerais, tendem a deformar com maior intensidade antes de se romperem.
- A retração aos primeiros dias é comparativamente igual ou ligeiramente superior aos apresentados pelas argamassas de aglomerantes minerais.
- Devido os compósitos poliméricos celulares possuírem um grande volume de vazios, a absorção de água dessas argamassas é relativamente alta. Essa absorção tende a diminuir drasticamente com o aumento do teor de polímero.

¹²³ Ver item 4.3.1.1

6. BIBLIOGRAFIA

AGNELLI J. A. M.; GALLO J. B. Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio. In: POLÍMEROS: CIÊNCIA E TECNOLOGIA - ABPol, ano 8, nº 1 - Jan/Mar 1998, pgs. 23 a 37.

AGNESINI, M. V. C. *Argamassas Hidráulicas Simples de CP-32 e Areia Natural Quartzosa Destinadas à Execução de Peças Fabricadas de Argamassa Armada.* São Carlos - EESC-USP, 1988 (pub. 023/88).

_____ *Concretos Com Ar Incorporado.* São Carlos, EESC-USP, 1988 (pub. 024/88)

ALFREY, T.; GURNEE, E. F. *Polímeros Orgânicos.* São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda./EDUSP, 1971.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI *Guide For Polymers Concrete Overlays.* ACI Committee 548. ACI Materials Journal, sept/oct 1993. Detroit, 1993b. Part 5.

_____ *Guide for Use of Polymers in Concrete.* ACI Committee 548. Manual concrete of practice 1993. Detroit, 1993. Part 5.

_____ *Guide to Durable Concrete: Reported by ACI Committee 201.2R.* In: ACI Manual of concrete practice. Detroit, 1991.

_____ *State-of-the-Art Report on High Strenght Concrete.* Detroit, 1992.

_____ *State-of-the-art report.* ACI Committee 548, ACI journal, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C-267 *Chemical Resistance of Mortars, Grouts and Monolithic Surfacing.*

_____ ASTM D-638M - 91a - *Tensile Properties of Plastics [Metric].*

_____ ASTM D-695M - 90 - *Compressive Properties of Rigid Plastics [Metric].*

_____ ASTM D-3410 - *Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading.*

ANDRADE PERDRIX, M. del C. *Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras*. Tradução e adaptação Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992.

ARAÚJO, L. C. R. *Caracterização Química, Térmica e Mecânica de Poliuretanas Elastoméricas Baseadas em Materiais Oleoquímicos*. São Carlos, 1992. Dissertação (mestrado) - Instituto Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5739 *Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto*.

_____ NBR 7211 *Agregado para concreto*.

_____ NBR 7215 *Ensaio de cimento Portland*.

_____ NBR 7217 *Agregados - Determinação da composição granulométrica dos agregados*.

_____ NBR 7218 *Determinação do teor de argila em torrões nos agregados*.

_____ NBR 7219 *Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados*.

_____ NBR 7220 *Avaliação das impurezas orgânicas das areias para concreto*.

_____ NBR 7222 *Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*.

_____ NBR 7251 *Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária*.

_____ NBR 8522 *Determinação do módulo de deformação estática e diagrama, tensão deformação*.

_____ NBR 9778 *Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica*.

_____ NBR 9778 *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica*.

_____ NBR 12127 *Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó*.

-
- _____ **NBR 12129 Gesso para construção – Determinação das propriedades mecânicas.**
- BAUER, L. A. F.** *Materiais de Construção.* Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1987, Vols. 1 e 2.
- BICKAL, P. J.; DOKSUM K. A.** - *Mathematical Statistics - Basic ideas and selected topics,* San Francisco, Holdem-Day Inc., 1977
- CHAVES, M.** *A Indústria da Construção Civil no Brasil: Desenvolvimento, Estrutura e Dinâmica.* Rio de Janeiro, 1985. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Economia Industrial, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CINCOTTO, M. A.** Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil. In: *Rev. A Construção*, nº 1855, p. 27-30, 1983.
- COSTA NETO, P. L.** *Estatística,* São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
- CRAWFORD, R. J.** *Plastics Engineering.* Belfast, Queen's University-Pergamon Press, 1987
- DIEGUES, F.; AFFINI, M.** Petróleo Verde. In: *REVISTA SUPERINTERESSANTE*, ano 5, nº 12, Dezembro de 1991 - Editora Abril , pgs.51 a 54
- FLAUZINO, W. D.** *Durabilidade de Materiais e Componentes das Edificações - Metodologias e Suas Aplicações no Caso de Pinturas Externas e Chapas Onduladas de Plásticos.* São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FERREIRA, O. P.; ALMEIDA, A. E. F. S.** *Revestimentos Poliméricos Para Proteção à Corrosão Bacteriológica do Concreto.* In: *ANAIS DO 41º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON 99,* Salvador, BA, setembro de 1999.
- FOWLER, D. W.** *Current Status of Polymers in Concrete. Production, Performance; Potential of Polymers in Concrete* In: *5TH. INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMERS IN CONCRETE,* Brighton Polytechnic, 1987.
- _____ *Status of polymer in concrete.* In: *SOCIETY OF PLASTICS INDUSTRY; REINFORCED PLASTICS/COMPOSITES INSTITUTE, ANNUAL CONFERENCE. PROCEEDINGS 43RD.*, pub. by SPI, Washington, D.C. U.S.A, p 16B.1-16B.5,1988.
- _____ *Future trends in polymer concrete. Polymers in concrete: advances and applications,* SP-116, American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp. 129-143.

- GUEDES, M. F.** *Caderno de Encargos*. São Paulo, Editora PINI, 2ª edição, 1987.
- HELENE, P. R. L.** - *Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Concreto*; [consultor Maurício Gerschenstein; coordenação Paulo Sérgio F. Oliveira, Fernando A. P. Guimarães, Sérgio Guerra]. 2ª edição - São Paulo: Pini, 1992.
- HOWEL, D.; BIRD, K.; GAUTIER, D.** O Mundo Sem Petróleo. In: REVISTA SUPERINTERESSANTE, nº 6, ano 7, in 10 Anos de Revista em Um CD-ROM, Abril Multimídia, 1997.
- KALBFLEISCH, J. G.** *Probability and Statistical Inference*, New York, Springer-Verlag, 1981, Vol I; II
- KRUGER, D.; PENHALL, D.** *Polymers in concrete: a protective measure. Protection of concrete*. Proceedings of the International Conference University of Dundee Scotland, UK., on 11-13 September, 1993, pp. 653-663.
- LIECHTENSTEIN, N. B.** *Patologia das Construções: Procedimento para formulação do Diagnóstico de falhas e Definição de Conduta Adequada à Recuperação de Edificações*. São Paulo, 1985. 191pgs. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- MANO, E. B.** *Introdução aos Polímeros*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda. 1985.
- _____ *Polímeros Como Materiais de Engenharia*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda. 1988.
- McGILL, L. P.; HUMPAGE, M.** *Prolonging the life of reinforced concrete structure by surface treatment*. In PROTECTION OF CONCRETE. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE HELD AT THE UNIVERSITY OF DUNDEE Scotland, UK, on 11-13, Sept. 1990, pp. 191-200.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.** *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo. Pini, 1994.
- NEVILLE, ADAM M.** *Propriedades do Concreto*, São Paulo, PINI, 1982.
- OHAMA, Y.** *Principle of Latex Modification and Some Typical Properties of Modified-Modified Mortars and Concretes*. In: ACI MATERIALS JOURNAL, pp. 511-518, n 84, nov./dec. 1987.

- PABLOS, J. M. *Utilização de Resíduo Sólido Gerado pelo Descarte das Areias de Fundição Aglomeradas com Argila no Setor da Construção Civil*. São Carlos, 1995. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, A.; SILVA, S.; SAKAMOTO, W.; CHIERICE, G. *Estudo da Dosagem de Solo-Polímero para Construção de Habitações de Interesse Social*. In: ANAIS DO 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, São Paulo, ABPol, Outubro de 1993, pgs. 55 a 59.
- PETRUCCI, E. *Materiais de Construção*, Porto Alegre, Globo, 1975.
- PICCI, F. A. *Impermeabilização para Coberturas*. São Paulo, PINI/IBI, 1986.
- PINTO, T. P. *Utilização de Resíduos de Construção. Estudo em Argamassas*. São Carlos, 1986. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RAY, I.; GUPTA, A. P.; BISWAS, M. *Effect Of Latex And Superplasticiser On Portland Cement Mortar* In: THE HARDENES STATE. CEMENT; Concrete Composites, vol. 16, pp. 309-3016, 1994.
- RIBAS, S. *Materiais de Construção*, São Paulo, PINI, 1991.
- ROCHA, A. C. P. *Materiais Plásticos para Construção Civil*. Laboratório Nacional de Engenharia. ICT. Lisboa, 1990.
- SANTOS, J. M. V. *O Uso de Polímeros na Construção Civil; Aplicações, Experimentos e Perspectivas de Uso Futuro*. Trabalho Disciplinar para a disciplina SAP 811 - Materiais de Construção. São Carlos, 1996.
- SILVA, I. J. *Contribuição ao Estudo da Utilização da Resina Poliuretana a Base de Óleo de Mamona na Construção Civil*, São Carlos. 1996. 163p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SOLOVJOV, K. G. et alli *Furan resin polymer concrete in the Commonwealth of Independent States (CIS)*. In: ACI MATERIALS JOURNAL, march-april, 1994, pp. 158-160.
- SOLY, A. B. *Botânica - Introdução a Taxionomia Vegetal*. Ed. USP, 2ª edição, 1975
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. São Paulo, Makron Books, 1993.

TEZUKA, Y. *Trabalhabilidade de Concreto de Resina Poliéster*. São Paulo, 1977. 235pgs. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

_____ *Concretos Polímeros*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. São Paulo, 1979.

_____ *Concreto de Cimento e Polímero*. ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, nov. 1988.

VAN VLACK, L. M. *Princípios de Ciências dos Materiais*, São Paulo, Blucher, 1970.

VECCHIA, F *Clima e Ambiente Construído - A abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano*. São Paulo, 1997. 316 pgs. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo..

_____ *Conceitos de Arquitetura Sustentável: Desenvolvimento Sustentável no Ambiente Construído*. Notas de aula, Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, 1999.

VERÇOSA, E. J. *Impermeabilização na Construção*. Porto Alegre, Ed. Sagra, 1993.

YIMPRASERT, P. et alli *Durability, Strength, and method of application of polymer-impregnated concrete for slabs*. Center for Highway research - CFHR - Austin, Texas, January, 1976.