

**CÍCERO THIAGO FIGUEIREDO DE ARAÚJO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE  
JUNTAS DE ARGAMASSA REFORÇADAS  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Alagoas como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil

**MACEIÓ**

**2005**

**CÍCERO THIAGO FIGUEIREDO DE ARAÚJO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE  
JUNTAS DE ARGAMASSA REFORÇADAS  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Aline da Silva Ramos Barboza

**MACEIÓ**

**2005**

Araújo, Cícero Thiago Figueiredo

Estudo do Comportamento de Juntas de Argamassa Reforçadas com Fibras de Polipropileno. Maceió, 2005

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Alagoas – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

1. Fibra 2. Polipropileno 3. Junta 4. Pré-moldado I. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

*Dedico este trabalho ao meu pai Jorge Araújo e minha mãe Edna Figueiredo Araújo, principalmente, pois foram meus grandes incentivadores. Aos meus queridos irmãos Tais e Tássio. À minha namorada Ester Taboza, que me apoiou em todos os momentos difíceis. E a todos que contribuíram direta ou indiretamente à realização deste trabalho.*

## Agradecimentos

À Deus que me concedeu essa oportunidade e ajudou-me a concluí-la.

À professora Aline da Silva Ramos Barboza pela orientação e apoio oferecidos.

À professora Nélia Callado pela indicação ao mestrado.

Aos professores Paulo César Correia Gomes e Flávio Barboza de Lima pelo apoio no programa experimental.

Ao professor Eduardo Nobre Lages pelas importantes sugestões na análise numérica.

Ao técnico de laboratório Alexandre Nascimento de Lima pelo apoio na instrumentação do modelo experimental.

Aos graduandos Sebastião Falcão e Alexandre de Barros pelo companheirismo, apoio e a amizade conquistada durante toda a pesquisa.

À FITESA pela concessão das fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.

À FAPEAL pelo apoio financeiro para a parte experimental e pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos que contribuíram na realização deste trabalho,

Obrigado!

# Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de símbolos</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de abreviaturas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>xv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>17</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>17</b>
1.1. Generalidades.....	17
1.2. Relevância do tema .....	20
1.3. Objetivos .....	20
1.3.1. <i>Objetivo geral</i> .....	20
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	21
1.4. Estrutura da dissertação .....	21
1.4.1. <i>Capítulo 1 – Introdução</i> .....	21
1.4.2. <i>Capítulo 2 – Materiais compósitos</i> .....	21
1.4.3. <i>Capítulo 3 – Juntas de argamassa</i> .....	22
1.4.4. <i>Capítulo 4 – Análise numérica</i> .....	22
1.4.5. <i>Capítulo 5 – Programa experimental</i> .....	22
1.4.6. <i>Capítulo 6 – Conclusões</i> .....	22
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>23</b>
<b>2. Materiais compósitos</b> .....	<b>23</b>
2.1. Introdução .....	23
2.2. Materiais compósitos fibrosos .....	24
2.3. Fibras plásticas .....	27
2.3.1. <i>Mecanismo de atuação das fibras de polipropileno</i> .....	29
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>32</b>
<b>3. Juntas de argamassa</b> .....	<b>32</b>
3.1. Introdução .....	32

3.2. Mecanismo de transferência de tensões .....	33
3.3. Caracterização da argamassa de preenchimento da junta .....	38
3.4. Ferramentas para análise numérica de matrizes cimentícias ....	39
3.4.1. <i>Material concreto armado</i> .....	41
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>42</b>
<b>4. Análise numérica .....</b>	<b>42</b>
4.1. Introdução .....	42
4.2. Modelo numérico .....	42
4.2.1. <i>Modelagem do concreto</i> .....	43
4.2.2. <i>Modelagem das armaduras</i> .....	49
4.2.3. <i>Modelagem da argamassa com adição de fibras</i> .....	52
4.3. Parâmetros .....	52
4.4. Avaliação de superfícies de plastificação .....	56
4.5. Análise numérica com o emprego de fibras de polipropileno à argamassa da junta .....	59
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>72</b>
<b>5. Programa experimental .....</b>	<b>72</b>
5.1. Introdução .....	72
5.2. Materiais .....	72
5.2.1. <i>Concreto</i> .....	72
5.2.2. <i>Argamassa</i> .....	73
5.2.3. <i>Armadura</i> .....	76
5.2.4. <i>Fibras de polipropileno</i> .....	77
5.3. Construção do modelo experimental .....	79
5.4. Instrumentação .....	80
5.5. Ensaio e resultados .....	81
5.6. Análise dos resultados.....	86
5.6.1. <i>Tensão de ruptura</i> .....	86
5.6.2. <i>Deformações horizontais e verticais na região de         instrumentação.....</i>	87
5.6.3. <i>Fissuras</i> .....	88
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>89</b>
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>89</b>
6.1. Considerações finais.....	89
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>92</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>94</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1	Índices de consumo de concreto pré-moldado por habitante	18
Figura 1.2	Índices de consumo de concreto pré-moldado	18
Figura 2.1	Disposição geométrica entre fibra e matriz	26
Figura 2.2	Relação comprimento da fibra <i>vs.</i> tensão de ruptura	26
Figura 2.3	Disposição fibra / fissura idealizada	27
Figura 2.4	Relação densidade <i>vs.</i> diâmetro <i>vs.</i> número de fibras	29
Figura 2.5	Gráfico de representação do mecanismo de combate às fissuras de retração plástica com a incorporação de fibras de polipropileno	30
Figura 3.1	Exemplo de aplicação de junta de argamassa entre elementos pré-moldados	32
Figura 3.2	Comportamento de junta de argamassa submetida à compressão	33
Figura 3.3	Configuração de ruína dos modelos	34
Figura 3.4	Distribuição de tensões horizontais na argamassa e no elemento pré-moldado para a solicitação axial	38
Figura 4.1	Modelo numérico adotado nas simulações	43
Figura 4.2	Superfície de plastificação definida por von Mises	44
Figura 4.3	Superfície de plastificação definida por Drucker-Prager	46
Figura 4.4	Superfície de plastificação definida por WILLAM-WARNKE (1975)	46
Figura 4.5	Disposição dos elementos de reforço no elemento SOLID65	47
Figura 4.6	Janela de configuração das armaduras presentes no SOLID65	48
Figura 4.7	Disposição das armaduras nos blocos pré-moldados	49
Figura 4.8	Tensões de contato devido à fricção entre concreto e aço e regiões de influência	50
Figura 4.9	Elementos finitos da malha que hipoteticamente envolvem as armaduras	50
Figura 4.10	Propriedade <i>Rebar</i> do elemento finito SOLID65	51
Figura 4.11	Janela de inserção dos parâmetros do modelo constitutivo <i>Linear Isotropic</i>	53
Figura 4.12	Janela de inserção dos parâmetros do modelo constitutivo <i>Drucker Prager</i>	54
Figura 4.13	Janela de inserção dos parâmetros do modelo constitutivo <i>Concrete</i>	54
Figura 4.14	Plano de falha criado na direção normal à direção da fissura	55
Figura 4.15	Gráfico tensão <i>vs.</i> deformação das superfícies de plastificação (taxa 0%)	57
Figura 4.16	Gráfico comparativo do deslocamento vertical máximo atingido	57
Figura 4.17	Fissuração lateral (16MPa)	58

Figura 4.18	Tensões horizontais para tensão aplicada de 16MPa	59
Figura 4.19	Gráfico comparativo da tensão de ruína dos diversos modelos	59
Figura 4.20	Comportamento das tensões horizontais $\sigma_x$ (tensão aplicada de 16MPa)	62
Figura 4.21	Comportamento das deformações horizontais totais $\epsilon_x$ (tensão aplicada de 16MPa)	63
Figura 4.22	Fissurações dos modelos (tensão aplicada de 16MPa)	64
Figura 4.23	Esmagamento localizado da argamassa da junta para uma taxa de 20% de fibras de polipropileno	65
Figura 4.24	Deformação vertical ao longo da altura do modelo (valores tomados no eixo central vertical)	65
Figura 4.25	Deformação vertical atingida para tensão aplicada de 16MPa	66
Figura 4.26	Deslocamento horizontal ao longo da altura do modelo (valores tomados no eixo central, ao longo da face)	66
Figura 4.27	Deformação horizontal atingida para tensão de 16MPa	66
Figura 4.28	Gráfico tensão vs. deslocamento do modelo numérico (tensão aplicada de 30MPa)	68
Figura 4.29	Tensão de compressão vs. taxa de fibras (tensão aplicada de 30MPa)	68
Figura 4.30	Deslocamento vertical na ruptura (tensão aplicada de 30MPa)	68
Figura 4.31	Variação do módulo de elasticidade equivalente do modelo para diferentes taxas de fibras	69
Figura 4.32	Tenacidade dos modelos	70
Figura 5.1	<i>Slump</i> de 18cm para o concreto simples	74
Figura 5.2	<i>Slump</i> de 3cm para o concreto com adição de fibras de polipropileno	74
Figura 5.3	Aspecto da argamassa fluida	75
Figura 5.4	Gráfico tensão vs. deformação da argamassa adotada no ensaio experimental	76
Figura 5.5	Aspecto da argamassa com adição de fibras de polipropileno	76
Figura 5.6	Armadura adotada no modelo experimental	77
Figura 5.7	Fibra de polipropileno adotada no modelo experimental	77
Figura 5.8	Moldagem e armação dos blocos do modelo experimental	79
Figura 5.9	Moldagem da junta com argamassa com adição de fibras de polipropileno	80
Figura 5.10	Modelo experimental	80
Figura 5.11	<i>Strain Gages</i> do tipo KFG-10 posicionados próximos à junta	81
Figura 5.12	Prensa hidráulica utilizada no ensaio com capacidade para 50 toneladas	81
Figura 5.13	Posicionamento do modelo experimental	81
Figura 5.14	Surgimento da primeira fissura visível do modelo ME0 (83% da tensão última)	82
Figura 5.15	Ruptura do modelo ME0 (presença do deslocamento da camada externa da argamassa)	82
Figura 5.16	Surgimento da primeira fissura visível do modelo ME1 (90% da tensão última)	83

Figura 5.17	Ruptura do modelo ME1 (sem presença do descolamento da camada externa da argamassa)	84
Figura 5.18	Surgimento da primeira fissura visível do modelo ME2 (93% da tensão última)	85
Figura 5.19	Ruptura do modelo ME2 (sem presença do descolamento da camada externa da argamassa)	85
Figura 5.20	Gráfico tensão vs. deformação dos extensômetros verticais	85
Figura 5.21	Gráfico tensão vs. deformação dos extensômetros horizontais	86
Figura 5.22	Comparativo da tensão última numérica e experimental	87
Figura 5.23	Gráfico tensão vs. deformação vertical na região da instrumentação experimental (comparativo)	87
Figura 5.24	Gráfico tensão vs. deformação horizontal na região da instrumentação experimental (comparativo)	88
Figura 5.25	Fissuras no modelo numérico antes da ruptura	88

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Elementos pré-moldados de uso freqüente	18
Tabela 2.1	Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras	28
Tabela 4.1	Parâmetros de entrada na simulação numérica	53
Tabela 4.2	Propriedades físicas do aço CA 50-A adotadas no modelo numérico	55
Tabela 4.3	Propriedades físicas das fibras de polipropileno adotadas no modelo numérico	55
Tabela 4.4	Taxas de fibras utilizadas nas análises numéricas	60
Tabela 4.5	Evolução das deformações verticais e horizontais máximas (tensão aplicada de 16MPa)	67
Tabela 4.6	Comparativo entre os módulos de elasticidade	70
Tabela 5.1	Traço do concreto de 30MPa	73
Tabela 5.2	Resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova moldados com o concreto utilizado na pesquisa	73
Tabela 5.3	Traço do concreto de 15MPa	74
Tabela 5.4	Traço da argamassa fluida para uma massa de cimento de 800g	75
Tabela 5.5	Propriedades geométricas e físicas das fibras de polipropileno adotadas no modelo experimental	78
Tabela 5.6	Comparativo entre fibras de polipropileno	78
Tabela 5.7	Comparativo entre os modelos propostos e o resultado obtido no modelo experimental (0% de fibras)	83

## Lista de Símbolos

$A_{ef}$	área efetiva da junta
$A_c$	área de concreto
$A_s$	área de aço
$a_j$	menor largura da junta
$b, p, h$	dimensões do elemento finito
$c$	coesão
$d$	diâmetro da fibra
$e$	espaçamento
$f_y$	tensão de escoamento do aço
$f_c$	resistência à compressão
$f_t$	resistência da fibra à tração
$f_a$	resistência da fibra à aderência
$f_{cj}$	resistência à compressão da argamassa da junta
$f_{ck,adj}$	menor resistência do concreto dos elementos adjacentes à junta
$f$	superfície de falha
$f_{cb}$	resistência última à compressão biaxial
$f_1$	tensão última de compressão para um estado de compressão biaxial sobre o estado de tensões hidrostáticas
$f_2$	tensão última de compressão para um estado de compressão uniaxial sobre o estado de tensões hidrostáticas
$h_j$	espessura da junta
$I_1$	primeiro invariante do tensor de tensões
$J_2$	segundo invariante do tensor de tensões deviatóricas

$l_f$	comprimento da fibra
$l_c$	comprimento crítico
$l$	comprimento da barra
$V_{ef}$	volume do elemento finito
$V_s$	volume de aço (armadura)
$Y_m$	tensão de plastificação
$\alpha, k_m$	parâmetros do material (Superfície de Drucker-Prager)
$\alpha_e$	coeficiente de eficiência da junta
$\delta$	relação entre a área comprimida da área da junta e a espessura da junta
$\kappa$	relação entre a resistência à compressão da argamassa da junta e da menor resistência dos elementos adjacentes à junta
$\eta_0$	coeficiente de redução de área
$\eta_m$	coeficiente de redução de resistência
$\sigma_{m,adm}$	tensão admissível na junta seca
$\sigma$	tensão de compressão na junta
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	tensões principais
$\sigma_{fu}$	tensão de ruptura da fibra
$\sigma_{ft}$	tensão de tração na fibra
$\varphi$	ângulo de atrito
$\phi$	diâmetro do aço

## Lista de Abreviaturas

ME0	Modelo Experimental com 0% de fibras de polipropileno
ME1	Modelo Experimental com 1% de fibras de polipropileno
ME2	Modelo Experimental com 2% de fibras de polipropileno
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas

## Resumo

Neste trabalho estuda-se o comportamento da ligação entre elementos pré-moldados através de juntas de argamassa com adição de fibras de polipropileno, avaliando o desempenho das mesmas quando solicitadas a tensões de compressão. O modelo proposto para análise do comportamento da ligação é composto de dois blocos de concreto armado com dimensões 10x10x20cm, unidos entre si por uma argamassa de cimento e areia com adição de resíduo oriundo do beneficiamento de mármore e granito, desenvolvida em laboratório em uma dissertação de mestrado, a qual recebeu adição de fibras de polipropileno. Faz-se uma avaliação numérica do modelo proposto através do programa de elementos finitos ANSYS 7.1® considerando argamassas com adição até 50% de fibras de polipropileno que é posteriormente validado em um programa experimental. Pelos dados obtidos numericamente, constata-se que o incremento de fibras até a taxa de 3% propicia um melhor desempenho da junta e, conseqüentemente, do modelo. Observa-se um ganho na capacidade de deformação horizontal e vertical da mesma, prorrogando, com isso, o descolamento do modelo, fazendo com que o sistema mantenha por mais tempo sua capacidade resistente, o que significa um aumento da ductilidade da ligação. Entre 4% e 10% o modelo mantém-se sem alteração no seu comportamento e a partir de 15%, começa a perder resistência e rigidez. Os modelos experimentais apresentam ganho de capacidade de carga com o acréscimo de fibras e modos de fissuração semelhantes ao modelo numérico e aos modelos propostos na literatura. Entretanto os teores práticos de fibras só atingem 2%, o que impossibilita os estudos para os demais teores.

*Palavras-Chave: fibras, polipropileno, junta de argamassa, pré-moldados*

## Abstract

In this work the connection behavior between precast elements using cement mortar with polypropylene fibers addition is studied to evaluate its performance when compression loads is applied. A numerical analysis with the finite elements program ANSYS 7.1® was made considering mortars range from 0% to 50% of polypropylene fibers addition. The numerical model considered in the analysis was composed of two reinforced concrete blocks with 10x10x20cm dimensions, joined between themselves by a cement mortar with marble and granite residue addition, developed in laboratory, which will receive polypropylene fibers addition. The numerical analysis was later validated by an experimental program. With the gotten results, it was evidenced that lower than 3% tax fibers propitiated better performance of the joint and, consequently, of the model. A profit in the horizontal and vertical deformation capacity was observed prorroguing the mortar splitting in the model, which makes high system strength capacity, resulting in an increase of the connection ductility. Between 4% and 10% the model kept any behavior alteration and from 15%, it started to lose strength and rigidity. The experimental models had presented load capacity profit with fibers addition and similar cracked ways of numerical model and the models observed in literature. However 2% fibers taxes higher were not possible to investigate because a lower workability performance had been gotten.

*Keywords: fibers, polypropylene, mortar joint, precast*

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Generalidades

A Construção Civil tem sido considerada como uma indústria atrasada quando comparada a outros ramos industriais. A razão de assim considerá-la é baseada no fato dela apresentar, de uma maneira geral, baixa produtividade, desperdícios de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade.

Uma das formas de se buscar a redução desse atraso é com o emprego de técnicas associadas à utilização de elementos pré-moldados de concreto. O emprego destas técnicas recebe a denominação de concreto pré-moldado ou de pré-moldagem e as estruturas formadas pelos elementos pré-moldados recebem a denominação de estruturas pré-moldadas de concreto ou estruturas de concreto pré-moldado.

É na parcela relativa às formas e ao cimbramento, normalmente de maior incidência no custo do concreto armado, que a utilização do concreto pré-moldado pode atuar no sentido de diminuir os custos. A pré-moldagem estaria ainda melhorando as condições de trabalho na construção civil, que normalmente é considerado sujo, difícil e perigoso (EL DEBS, 2000).

Os índices de consumo de concreto pré-moldado por habitante e o consumo de cimento referentes ao emprego em concreto pré-moldado em diversos países, incluindo o Brasil, estão mostrados nas Figuras 1.1 e 1.2, respectivamente.

Estes índices sinalizam que o emprego do concreto pré-moldado no Brasil é relativamente baixo comparado com países mais desenvolvidos. A Finlândia e a Espanha são os maiores consumidores de concreto pré-moldado.

Os elementos pré-moldados apresentam uma grande diversidade. Na Tabela 1.1 estão mostrados alguns dos principais tipos de elementos.

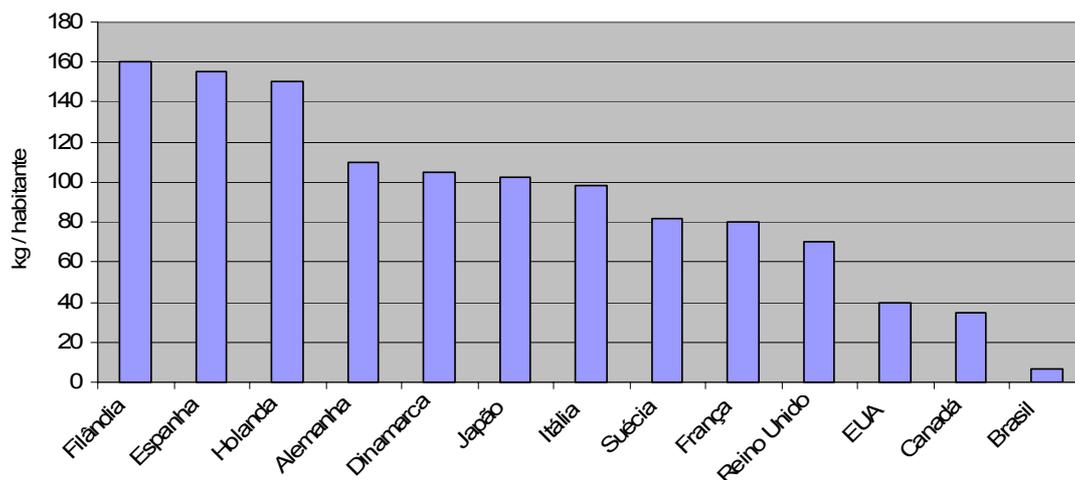


Figura 1.1 – Índices de consumo de concreto pré-moldado por habitante

Fonte: EL DEBS (2000)

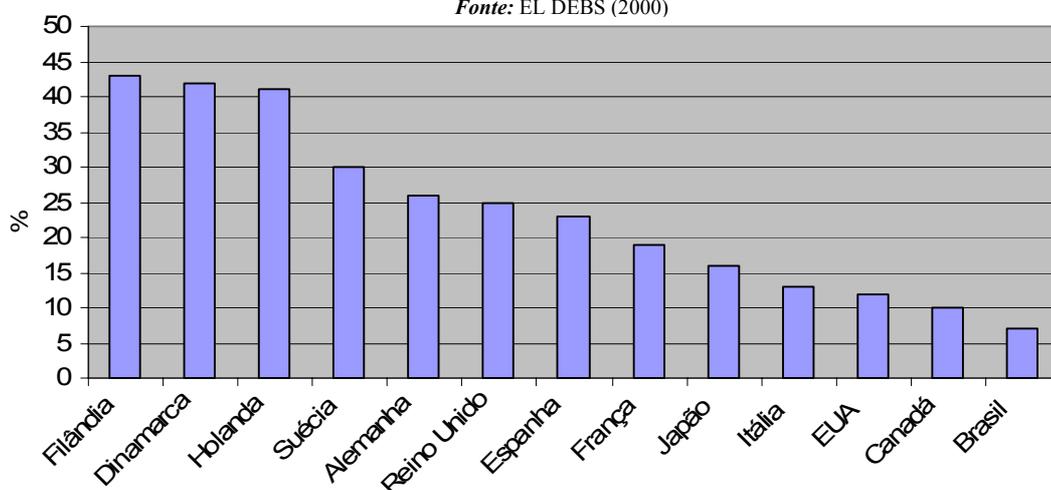
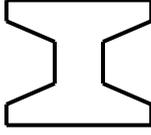
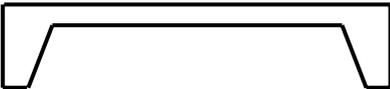
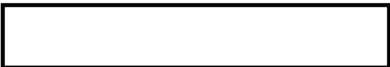


Figura 1.2 – Índices de consumo de concreto pré-moldado

Fonte: EL DEBS (2000)

Tabela 1.1 – Elementos pré-moldados de uso frequente

<b>Lajes e Paredes</b>	<b>Vigas e Pilares</b>
 <b>Painel Alveolado</b>	 <b>Seção Retangular</b>
 <b>Painel II</b>	 <b>Seção Duplo T ou I</b>
 <b>Painel U</b>	 <b>Seção T Invertido</b>
 <b>Painel Maciço</b>	 <b>Seção Vazada</b>

As ligações assumem um papel relevante no projeto das estruturas pré-moldadas. Elas são de fundamental importância tanto para a produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e execução das ligações propriamente dita) como para o comportamento da estrutura montada. As ligações mais simples normalmente acarretam estruturas mais pobres, do ponto de vista do comportamento estrutural. Em contrapartida, as ligações que tendem a reproduzir o comportamento das estruturas monolíticas, através de transmissão de momentos fletores entre os elementos, requerem mais trabalho, reduzindo em parte as vantagens da pré-moldagem (EL DEBS, 2000).

As ligações entre elementos pré-moldados, em geral, não se comportam da forma considerada na análise estrutural, onde são idealizadas de maneira a permitir ou impedir os deslocamentos relativos entre os elementos. Sabe-se que aquelas classificadas como articulações possuem razoável rigidez à flexão e resistência. Outras classificadas como rígidas podem apresentar deformações à flexão e ao cisalhamento consideráveis. Enfim, as ligações entre elementos de concreto pré-moldado apresentam certa deformabilidade quando solicitadas, e por isso são denominadas na literatura de semi-rígidas.

CHEFDEBIEN (1996) afirma que o desenvolvimento de modelos, devidamente calibrados por meios de resultados experimentais, capazes de simular o comportamento das ligações pré-moldadas, parece ser uma tendência bastante atrativa. Porém, essa é uma tarefa difícil devido à multiplicidade de interfaces e materiais utilizados. Uma outra opção é a realização de simulações numéricas através da utilização de programas de computador baseados no Método dos Elementos Finitos.

Atualmente, existem programas computacionais acadêmicos e comerciais capazes de simular fenômenos complexos em determinadas circunstâncias, tais como: atrito, escorregamento, contato, interação, aderência, entre outros. Entretanto ainda existem dificuldades na elaboração de um modelo capaz de representar de maneira precisa o comportamento real da ligação entre elementos de concreto pré-moldado pela diversidade de esforços envolvidos e pelo particular comportamento do concreto (não-linearidade física), que tem sido motivo de muita pesquisa.

## **1.2. Relevância do tema**

Na colocação de um elemento pré-moldado sobre outro ou sobre elemento de concreto moldado no local, pode-se empregar uma camada de argamassa para promover o nivelamento e distribuir as tensões de contato. Essa ligação, denominada junta de argamassa, está em geral sujeita a esforço principal de compressão, que pode ser, em alguns casos, acompanhada de cisalhamento. A transferência de forças de compressão é governada pela deformabilidade relativa da argamassa da junta com o concreto dos elementos pré-moldados e pela ocorrência de estrangulamento da seção da junta. Como, em geral, a argamassa possui módulo de elasticidade mais baixo que o concreto dos elementos pré-moldados, ela tende a deformar mais, produzindo tensões de tração no elemento pré-moldado. Ainda devido ao fato da argamassa ser mais deformável, a parte externa, como não é confinada, praticamente não trabalha, acarretando, para efeito de transmissão de tensões, um estrangulamento da seção.

BARBOZA (2002) desenvolveu um trabalho numérico e experimental envolvendo juntas de argamassa, determinando os principais parâmetros que influenciam no seu comportamento, visando uma melhoria da capacidade resistente do sistema pré-moldado. Os resultados mostraram que juntas com espessura de 20mm e a utilização de argamassas com alta resistência foram as que obtiveram os melhores desempenhos com relação à resistência. Mostraram ainda que a capacidade resistente da ligação está fortemente ligada à capacidade de deformação e fissuração da mesma.

Assim, como complemento deste estudo, as fibras de polipropileno adicionadas à argamassa podem melhorar o comportamento dessas ligações, fazendo com que o sistema tenha um acréscimo de desempenho promovido pelo aumento de deformabilidade e diminuição das fissuras propiciado pelas fibras na região de ligação.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento de juntas de elementos pré-moldados preenchidos com argamassa com adição de fibras de

polipropileno, obtendo informações que possam caracterizar maior ductilidade para a junta em função do teor de fibras adicionadas.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Especificamente, citam-se os seguintes objetivos:

- a) Analisar numericamente o comportamento da ligação procurando obter seu desempenho de acordo com o volume de fibras de polipropileno;
- b) Avaliar experimentalmente a deformabilidade e a resistência da ligação, validando os resultados obtidos no modelo numérico;
- c) Buscar recomendações práticas para utilização em projeto das fibras de polipropileno nestas ligações.

## **1.4. Estrutura da dissertação**

A dissertação está dividida nos seguintes capítulos:

### **1.4.1. Capítulo 1 - Introdução**

Faz-se uma breve introdução sobre elementos pré-moldados, citando suas vantagens e a importância do estudo de suas ligações.

### **1.4.2. Capítulo 2 - Materiais compósitos**

Faz-se uma abordagem do conceito de material compósito, dando ênfase ao desenvolvimento do mesmo com fibras de polipropileno e o emprego em ligações entre elementos pré-moldados.

### **1.4.3. Capítulo 3 – Juntas de argamassa**

Faz-se uma introdução do conceito de junta de argamassa, bem como seu mecanismo de transferência de tensões, citando também trabalhos experimentais desenvolvidos no intuito de se obter um melhor detalhamento do seu comportamento.

### **1.4.4. Capítulo 4 – Análise numérica**

Apresenta-se a análise numérica desenvolvida, com todos os detalhes de sua construção, apresentando os devidos resultados obtidos.

### **1.4.5. Capítulo 5 – Programa Experimental**

Apresenta-se o programa experimental desenvolvido, caracterizando os materiais utilizados, montagem, instrumentação e análise dos resultados, confrontando com os obtidos na análise numérica.

### **1.4.6. Capítulo 6 – Conclusão**

Apresentam-se as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Materiais compósitos

#### 2.1. Introdução

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes isoladamente não apresentam. Eles são, portanto, constituídos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço, e são desenvolvidos para aperfeiçoar os pontos fortes de cada uma das fases (BUDINSKI, 1996).

Na indústria mecânica, os compósitos são largamente empregados e geralmente são constituídos por matriz dúctil e fibra de ruptura frágil, como, por exemplo, os plásticos reforçados com fibras de vidro. Na construção civil, os compósitos são tipicamente constituídos por matriz frágil reforçada com fibra dúctil, como as argamassas reforçadas com fibras de polipropileno, embora haja exceções, como o cimento amianto, possivelmente o mais popular compósito da engenharia civil, no qual a matriz (pasta de cimento) e as fibras (amianto) apresentam ruptura frágil.

Ainda segundo BUDINSKI (1996), os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos. Os produtos baseados em cimento Portland são considerados como materiais cerâmicos por apresentarem características típicas a este grupo de materiais, como, por exemplo, alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência de fissuração por secagem.

Os polímeros são caracterizados por terem baixo módulo de elasticidade, ductibilidade variável e resistência à tração moderada. São extremamente versáteis e, dentro de certos limites, podem ser modificados para adaptar-se segundo necessidades específicas (TAYLOR, 1994).

Os materiais compósitos, originados da combinação das cerâmicas e dos polímeros, apresentam características mais apropriadas de resistência mecânica, rigidez, ductibilidade, fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e

comportamento pós-fissuração, quando comparado com os materiais que lhes deram origem.

Em todas as áreas do conhecimento um grande número de novos materiais pode ser desenvolvido a partir da combinação de outros. Para tanto, é necessário que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados.

## **2.2. Materiais Compósitos Fibrosos**

A história da utilização de compósitos reforçados com fibras como materiais de construção tem mais de 3.000 anos. Há exemplos do uso de palhas em tijolos de argila, mencionados no Êxodo, e crina de cavalo reforçando materiais cimentados. Outras fibras naturais têm sido utilizadas para conferir ductibilidade aos materiais de construção essencialmente frágeis (ILLSTON, 1994).

Contrastando com esses antigos materiais naturais, o desenvolvimento de polímeros nos últimos cem anos foi impulsionado pelo crescimento da indústria do petróleo. Desde 1930 o petróleo tem sido a principal fonte de matéria-prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos a partir dos quais são fabricados plásticos, fibras, borrachas e adesivos (ILLSTON, 1994).

Uma grande quantidade de polímeros, com variadas propriedades e formas, têm sido desenvolvidos desde 1955. Para TAYLOR (1994), os materiais baseados em cimento Portland são opções naturais para a aplicação de materiais fibrosos a base de fibras poliméricas, uma vez que são baratos, mas apresentam problemas relativos à ductibilidade, resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia por deformação.

Segundo JOHNSTON (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, retração restringida, tração direta ou na flexão e cisalhamento, e, secundariamente, elas melhoram a ductibilidade e a tenacidade de uma matriz frágil.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e

pela aderência entre as duas fases (HANNANT, 1994).

JOHNSTON (1994) acrescenta ainda o efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura, ou fissura, influencia fortemente sua habilidade de transmitir cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo.

TAYLOR (1994) apresenta os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentícios, assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente:

- a. **Teor de Fibra** – Um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- b. **Módulo de Elasticidade das Fibras** – Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao alto teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras.
- c. **Aderência entre a Fibra e a Matriz** – As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentícios reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito.
- d. **Resistência da Fibra** – Aumentando a resistência das fibras aumenta também a ductibilidade do compósito, assumindo que não ocorre o rompimento das ligações de aderência. A resistência da fibra dependerá, na prática, das características pós-fissuração desejadas, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz.
- e. **Deformabilidade da Fibra** – A ductibilidade pode ser aumentada com a utilização de fibras que apresentem alta deformação de ruptura. Isto se deve ao fato de compósitos com fibras de elevado grau de deformabilidade consumirem energia sob a forma de alongamento da fibra.
- f. **Compatibilidade entre a Fibra e a Matriz** – A compatibilidade química, física e geométrica entre as fibras e a matriz é muito importante. A curto prazo, as fibras que absorvem água podem causar excessiva perda de trabalhabilidade do

concreto. Além disso, as fibras que absorvem água sofrem variação de volume, e a aderência fibra/matriz é comprometida. A longo prazo, alguns tipos de fibras poliméricas não possuem estabilidade química frente à presença de álcalis, como ocorre nos materiais a base de cimento Portland. Nesses casos, a deterioração rápida das propriedades da fibra e do compósito pode ser significativa. Assim também, incompatibilidades geométricas entre a fibra e a matriz fazem com que as fissuras não sejam combatidas adequadamente, conforme demonstrado na Figura 2.1.

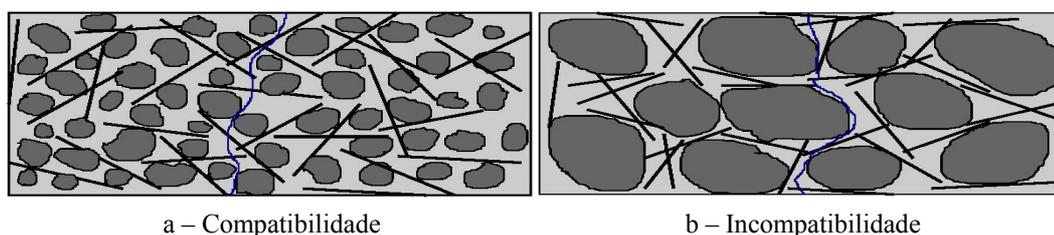


Figura 2.1 – Disposição geométrica entre fibra e matriz

- g. Comprimento da Fibra** – Quanto menor for o comprimento das fibras, maior será a possibilidade de elas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais bem utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual à sua resistência à tração, conforme visto na Figura 2.2. Na verdade, não basta raciocinar tão-somente em cima do comprimento da fibra. Há de se considerar o seu diâmetro, pois depende dele a capacidade da fibra em desenvolver as resistências ao cisalhamento e à tração.

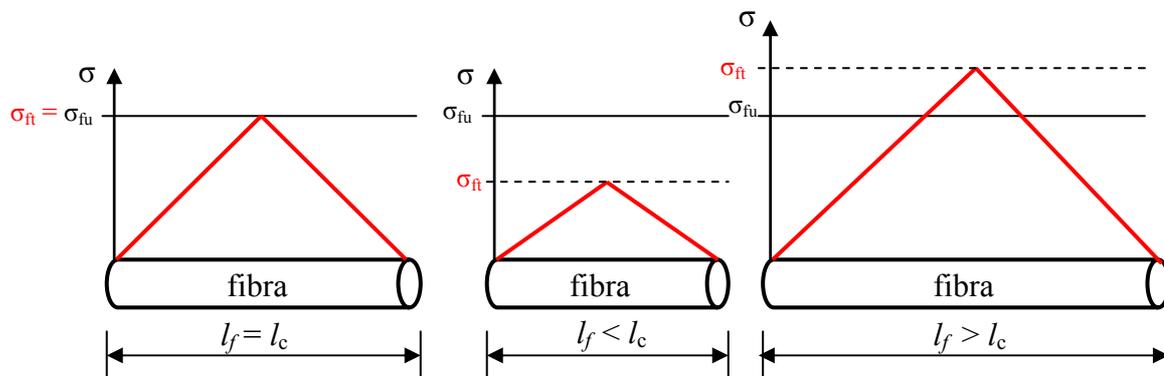


Figura 2.2 – Relação comprimento da fibra vs. tensão de ruptura

A Figura 2.3 apresenta uma disposição idealizada da fibra em relação à fissura, seguida de um equacionamento onde fica evidente a importância da relação  $l/d$ , onde “ $l$ ” é o comprimento e “ $d$ ” é o diâmetro da fibra.

A relação  $l/d$  é proporcional ao quociente entre a resistência à tração ( $f_t$ ) da fibra e a resistência de aderência fibra/matriz ( $f_a$ ), na ruptura. Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos depende da seguinte condição: se uma fibra tem uma alta resistência à tração, por exemplo, como o aço, então ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada ou fibras de alta relação  $l/d$  deverão ser utilizadas (TAYLOR, 1994).

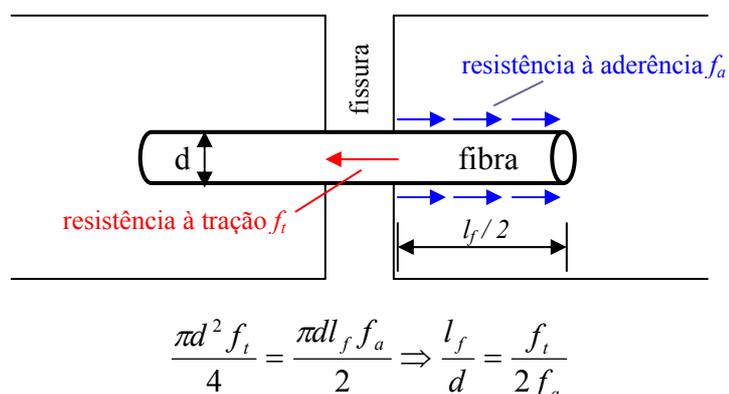


Figura 2.3 – Disposição fibra/fissura idealizada

Fonte: FITESA (2002)

### 2.3. Fibras Plásticas

Na construção civil são empregados diversos tipos de fibras, desde as naturais – como as de celulose, amianto, sisal, juta e até pêlo de elefante – às artificiais, como as de plástico, vidro e aço.

Dentro do universo das fibras plásticas, as mais conhecidas são as de polipropileno, nylon e poliéster. As principais propriedades desses tipos de fibras estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras

Tipo de fibra	Densidade relativa	Diâmetro (microns)	Comprimento (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	7,86	100-600	10-60	200	700-2000	3-5
Amianto	2,55	0,02-30	5-40	164	200-1800	2-3
Vidro (E-glass)	2,70	12,5	10-50	70	600-2500	3,6
Poliéster	1,34 – 1,39	20-25	20-30	< 17	800-1300	8-15
Polipropileno (fibrilada)	0,91	400-500	20-75	< 8	400	8
Polipropileno	0,91	18	6-24	4	450	80
Nylon	1,15	21	10-20	8	800	25
Celulose	1,50	20-120	0,5-5	10-50	300-1000	20

Fonte: FITESA (2002)

O baixo módulo de elasticidade, alta deformação na ruptura e elevada resistência à tração propiciados pelas fibras de polipropileno as tornam um material interessante na aplicação em argamassas de ligação de elementos pré-moldados, onde um acréscimo de desempenho promovido pelo aumento de deformabilidade é desejável.

Para cada tipo e aplicação de fibra, existe um teor recomendado que maximiza as propriedades desejadas. Um dos fatores determinantes para que haja um bom desempenho do compósito fibroso é o número de fibras por metro cúbico de concreto. O número de fibras necessário para melhorar alguma propriedade do concreto no estado plástico, como, por exemplo, diminuir a incidência de fissuras de retração plástica ou diminuir a exsudação e a segregação, é sensivelmente menor que o número de fibras necessário para alterar alguma propriedade do concreto no estado endurecido, como, por exemplo, a resistência ao impacto. O número de fibras por metro cúbico de concreto varia muito em função do diâmetro e da densidade da fibra. A Figura 2.4 mostra em um gráfico esta variação, em que é calculado o número de fibras por quilograma, considerando-as com 10 mm de comprimento.

Percebe-se que quanto menor a densidade da fibra e o seu diâmetro, maior será o número de fibra por unidade de massa. Por outro lado, fibras com maior densidade e diâmetro apresentam uma frequência de fibras consideravelmente menor.

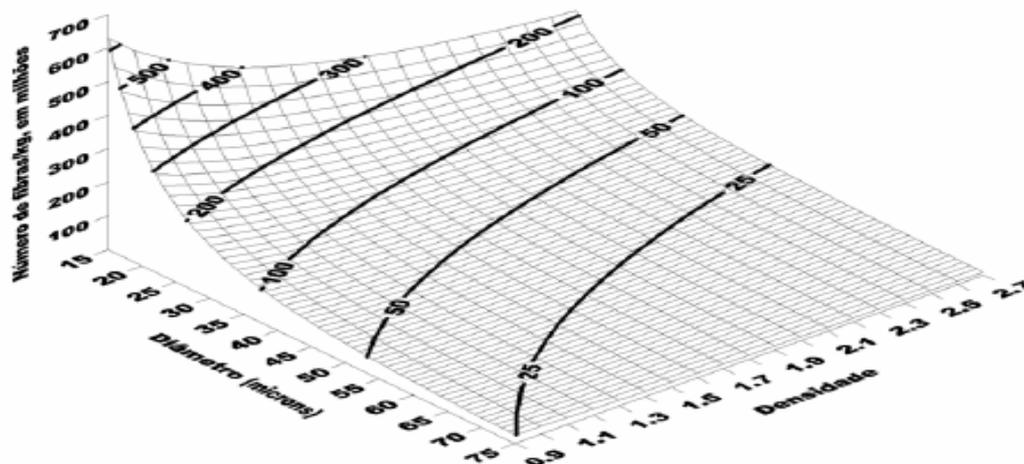


Figura 2.4 – Relação densidade vs. diâmetro vs número de fibras

Fonte: FITESA (2002)

### 2.3.1. Mecanismo de Atuação da Fibra de Polipropileno

O emprego de fibras sintéticas como auxiliares no combate ou redução das fissuras de retração plástica tem sido largamente difundido por diversos pesquisadores, embora o mecanismo pelo qual isso ocorra não seja bem conhecido. Há vertentes que advogam que os complexos mecanismos das pressões nos poros capilares desempenham importante papel na redução da retração e, conseqüentemente, das fissuras, enquanto outros preferem atribuir às fibras a redução dos efeitos danosos da retração (PADRON *et al.*, 1990). Provavelmente, e pelos resultados de pesquisas experimentais, ambas as teorias são válidas, sendo que a questão da redução da porosidade capilar afeta basicamente a retração por exsudação, enquanto que a fibra, como material de reforço, atua nos estágios subseqüentes, quando o módulo de elasticidade da fibra plástica é superior ao da pasta de cimento.

Matrizes mais ricas (alta relação cimento/areia) respondem mais eficientemente à adição de fibras e o concreto leve apresenta maior potencial de redução de fissuras do que o convencional, quando são empregados teores e tipos idênticos de fibras (BALAGURU, 1994).

O mecanismo principal de atuação das fibras pode ser modelado como:

- a) O concreto simples, logo após o lançamento, é fluido. Aos poucos o concreto endurece e com isso perde a sua fluidez e, conseqüentemente, reduz sua capacidade de deformação.

- b) Em contrapartida, com a evaporação da água de exsudação, a retração aumenta até que em um determinado momento o nível de deformação de retração é maior do que a capacidade do concreto de absorver estas deformações, e então as fissuras aparecem.
- c) O concreto com fibras de polipropileno de elevado nível de deformação e de baixo módulo é mais deformável nas primeiras idades. As fibras transferem a sua natural capacidade de deformação para o concreto. A deformação de retração pode ser a mesma, porém não maior do que a capacidade do concreto em absorvê-las. Assim, as fissuras são inibidas ou sua frequência e tamanhos são reduzidos. A Figura 2.5 ilustra de maneira qualitativa a explicação acima.

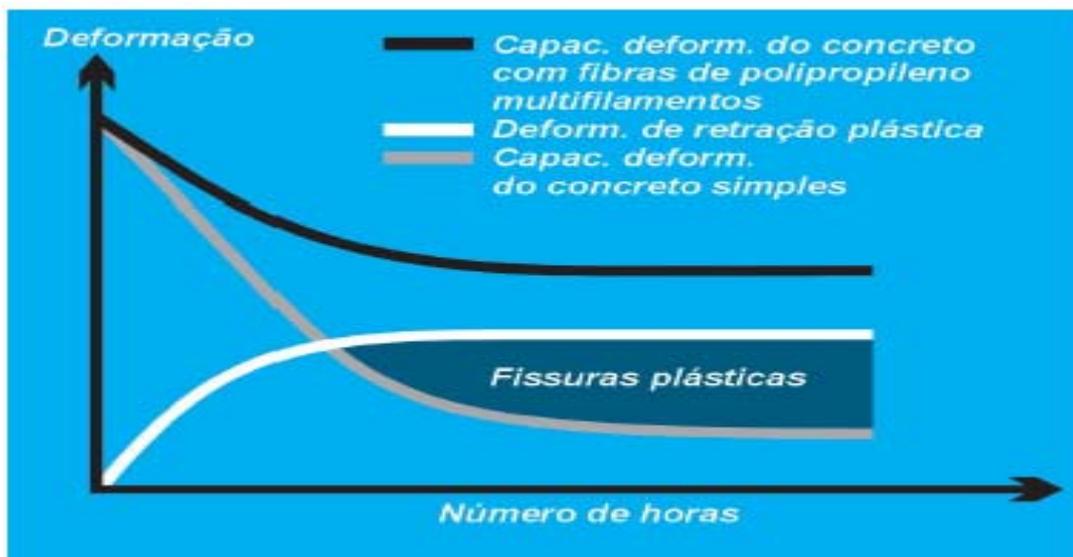


Figura 2.5 – Gráfico de representação do mecanismo de combate às fissuras de retração plástica com a incorporação de fibra de polipropileno

Fonte: FITESA (2002)

BALAGURU (1994) desenvolveu um extenso programa de ensaios com diversos tipos de fibras sintéticas e também de aço, e suas principais conclusões podem ser resumidas em:

- a) A adição de fibras sintéticas, mesmo em teores tão baixos como  $0,45\text{kg/m}^3$  promove alguma redução na quantidade de fissuras;
- b) Reduções mais acentuadas são conseguidas com dosagens entre  $0,45\text{kg/m}^3$  e  $0,90\text{kg/m}^3$ ;

- c) Para fibras longas, aquelas que apresentam menor módulo de elasticidade são as que propiciam melhor desempenho;
- d) Para dosagens de  $0,90\text{kg/m}^3$ , praticamente não se observa, nos experimentos, fissuras de retração plástica;
- e) A quantidade de fibras – número de fibras por quilograma – é um parâmetro importante de dosagem;
- f) Fibras longas apresentam melhor desempenho em argamassas mais pobres (baixo teor de cimento) e concretos, enquanto que as microfibras apresentam melhores resultados nas misturas mais ricas (alto teor de cimento);
- g) Com as fibras sintéticas, não ocorre apenas a redução da quantidade de fissuras, mas também a abertura delas é menor.

## Capítulo 3

### Juntas de argamassa

#### 3.1. Introdução

Na colocação de um elemento pré-moldado sobre outro ou sobre elemento de concreto moldado no local, pode-se empregar uma camada de argamassa para promover o nivelamento e distribuir as tensões de contato, conforme ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Exemplo de aplicação de junta de argamassa entre elementos pré-moldados

A espessura da junta deve ser a menor possível, dentro de limites de execução e tolerâncias. Recomenda-se que a espessura da junta não seja maior que 10% da menor dimensão da seção transversal dos elementos a serem conectados (EL DEBS, 2000).

### 3.2. Mecanismo de transferência de tensões

As juntas de argamassa estão, em geral, sujeitas a esforço principal de compressão, que pode ser acompanhado de cisalhamento.

A transferência de forças de compressão é governada pela deformabilidade relativa da argamassa da junta com o concreto dos elementos pré-moldados e pela ocorrência de estrangulamento da seção da junta.

Como, em geral, a argamassa possui módulo de elasticidade mais baixo que o concreto dos elementos pré-moldados, ela tende a deformar conforme a Figura 3.2-a, produzindo tensões de tração no elemento pré-moldado. Ainda devido ao fato da argamassa ser mais deformável, a parte externa, como não é confinada, praticamente não trabalha, acarretando, para efeito de transmissão de tensões, um estrangulamento da seção. Assim, as tensões de compressão transmitidas na junta têm o aspecto da Figura 3.2-b. Devido a este efeito, também ocorrem tensões de tração nos elementos pré-moldados, como conseqüência do bloco parcialmente carregado.

EL DEBS (2000) afirma que o dimensionamento das juntas, em relação aos esforços de compressão, consiste em verificar as tensões de compressão na junta e verificar os elementos pré-moldados considerando as citadas tensões de tração. Para a verificação dos elementos pré-moldados considera-se de forma simplificada o efeito de bloco parcialmente carregado com a seção da junta reduzida, considerando que as partes externas, com duas vezes a espessura da junta, não trabalham, como mostrado na Figura 3.2-c.

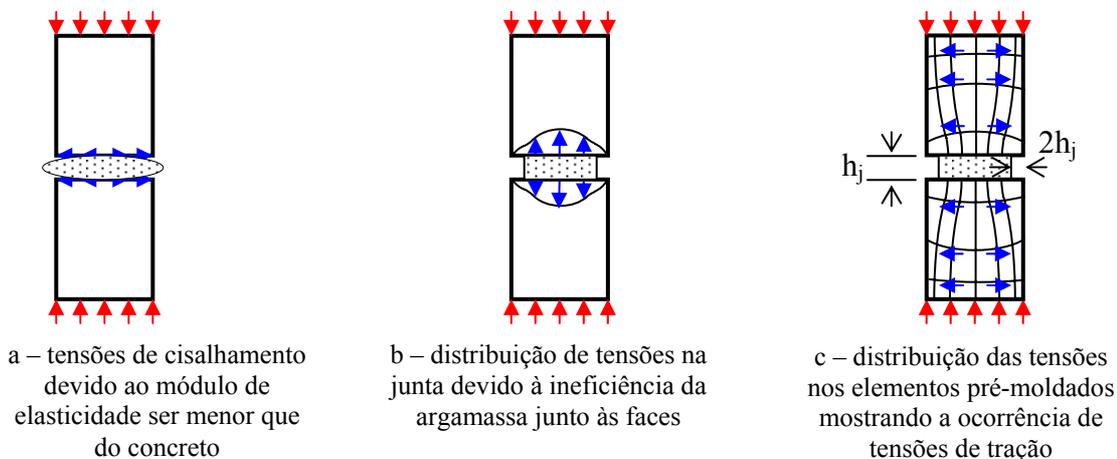


Figura 3.2 – Comportamento de junta de argamassa submetida à compressão

Fonte: EL DEBS (2000)

No trabalho de BARBOZA (2002), foram ensaiados alguns modelos da ligação com juntas de argamassa colocando-se entre os segmentos pré-moldados uma almofada de apoio flexível à base de cimento com adição de fibras e modificada com látex, como uma alternativa ao apoio com elastômero na ligação viga-pilar (Figura 3.3). Os primeiros resultados mostraram um bom comportamento na distribuição das tensões de contato, resultando em uma melhor acomodação dos elementos pré-moldados, conseqüentemente menor danificação da região de ligação, mesmo para elementos com superfície rugosa. Observou-se que a adição de fibras na argamassa da junta é uma forma de aumentar sua capacidade de deformação sem haver ruptura, mantendo-a íntegra por um maior período de tempo, durante a aplicação das cargas. As fibras atuam como um reforço aos esforços de tração que ocorrem no interior da argamassa, retardando sua fissuração e ruptura, proporcionando um maior desempenho do sistema.



a – Modelo com almofada de apoio contendo fibras



b – Modelo com almofada de apoio sem fibras

Figura 3.3 – Configuração de ruína dos modelos

Fonte: BARBOZA (2002)

Segundo VAMBERSKY (1990), a resistência à compressão da argamassa da junta é dada pela expressão:

$$f_{cj} = \eta_0 \alpha_e f_{ck,adj} \quad (3.1)$$

onde

$f_{ck,adj}$  - a menor resistência do concreto dos elementos adjacentes à junta.

$\eta_0$  - coeficiente da redução da área, de forma a considerar a área efetiva da junta.

$\alpha_e$  - coeficiente de eficiência da junta, definido como a relação entre as capacidades de suporte de pilar com junta e de pilar similar sem junta.

De acordo com resultados experimentais, o coeficiente de eficiência pode ser calculado com

$$\alpha_e = \kappa \frac{5(1-\kappa) + \delta^2}{5(1-\kappa) + \kappa\delta^2} \quad (3.2)$$

onde

$\delta$  - a relação entre a altura da parte comprimida da área da junta e a espessura da junta. A altura da parte comprimida coincide com a altura da seção da junta no caso de compressão centrada. Para compressão excêntrica, a altura da parte comprimida é calculada considerando diagrama elástico-linear de tensão até o valor de  $f_{mk}$  e plástico-perfeito a partir desse valor.

$\kappa$  - a relação entre a resistência à compressão da argamassa da junta e da menor resistência do concreto dos elementos adjacentes à junta, com a seguinte expressão:

$$\kappa = \eta_m \frac{f_{cj}}{f_{ck,adj}} \quad (3.3)$$

sendo

$\eta_m$  - coeficiente de redução, que leva em conta a diferença da qualidade da argamassa da obra com a da argamassa feita em condições laboratoriais. Os valores indicados para este coeficiente são

0,75 – se o controle de qualidade do concreto é feito por meio de corpos de prova padronizados, ensaiados após permanecerem em condições controladas de umidade e temperatura.

1,0 – se controle for feito por meio de testemunhos extraídos de juntas e curados nas mesmas condições das juntas.

Para o coeficiente de redução da área  $\eta_0$  são indicados os seguintes valores:

0,9 – para argamassa auto-adensável (estado coloidal)

0,7 – para argamassas secas (*dry packed mortar*)

0,3 – se o elemento é colocado sobre um berço de argamassa

As juntas sem argamassa, chamadas juntas secas, podem ser empregadas em determinadas situações, quando a tensão de contato for baixa e houver grande precisão de execução e montagem. A resistência ao cisalhamento que acompanha os esforços de compressão pode ser verificada, de forma simplificada e a favor da segurança, pela teoria de atrito de Coulomb. Neste sentido é indicada para elementos de barra uma tensão admissível, calculada com o coeficiente de segurança de 2,5, dada por

$$\tau_{m,adm} \leq \begin{cases} 0,3\sigma_c & \text{para superfície plana} \\ 0,5\sigma_c & \text{para superfície rugosa} \end{cases} \quad (3.4)$$

onde

$\sigma_c$  - tensão de compressão na junta

Assim também, BRUGGELING & HUYGHE (1991) estabeleceram que a capacidade resistente da ligação entre elementos pré-moldados com junta de argamassa moldada no local, solicitada por compressão axial, é obtida combinando-se a resistência à compressão da argamassa e a resistência à compressão do concreto do elemento pré-moldado, de acordo com a seguinte expressão:

$$f_{cj} = f_{ck,adj} - \left(1 - \frac{a_j}{10h_j}\right)^2 (f_{ck,adj} - f_m) \quad (3.5)$$

onde

$f_{ck,adj}$  - menor resistência à compressão do concreto do elemento pré-moldado adjacente à junta;

$f_m$  – resistência à compressão da argamassa;

$a_j$  – menor largura da junta;

$h_j$  – espessura da junta.

- se  $h_j < 0,1a_j$ , a resistência da ligação é igual a do concreto adjacente a ela;
- se  $h_j > 0,5a_j$  a resistência da ligação é igual a da argamassa.

Ainda segundo os autores, devido à deformabilidade diferenciada dos materiais da junta, o detalhamento dos elementos pré-moldados adjacente à junta deve considerar os seguintes efeitos:

- A transferência de forças através da ligação acontece em uma situação de bloco parcialmente carregado, ou seja, parte da junta de argamassa definida a partir de uma distância  $2h_j$  da borda não contribui para a transferência de cargas através da junta. A área efetiva ( $A_{ef}$ ) será determinada usando-se a Equação 3.6 e estará submetida a uma carga concentrada cujo valor último é dado pela Equação 3.7.

$$A_{ef} = (a - 4h_j)(b - 4h_j) \quad (3.6)$$

$$F_u = A_{ef} 0,6 f_c \sqrt{A_c / A_{ef}} \quad (3.7)$$

onde

$A_c$  – é a área total da seção transversal;

a e b – dimensões da seção transversal da junta.

- Uma vez que a rigidez da argamassa na direção transversal é geralmente menor que a do concreto adjacente, aparecerão tensões de tração no elemento pré-moldado numa zona ainda próxima da interface, como mostra a Figura 3.4. Apesar de ser bastante complexo calcular o valor dessas tensões, elas devem ser consideradas para evitar a fissuração na região. Esta fissuração deve ser combatida prevendo-se uma armadura na região, com valor dado através da Equação 3.8.

$$A_s = 0,0015abf_y \quad (3.8)$$

onde

$A_s$  – área de aço;

$a$  e  $b$  – dimensões da seção transversal da junta;

$f_y$  – tensão de escoamento do aço.

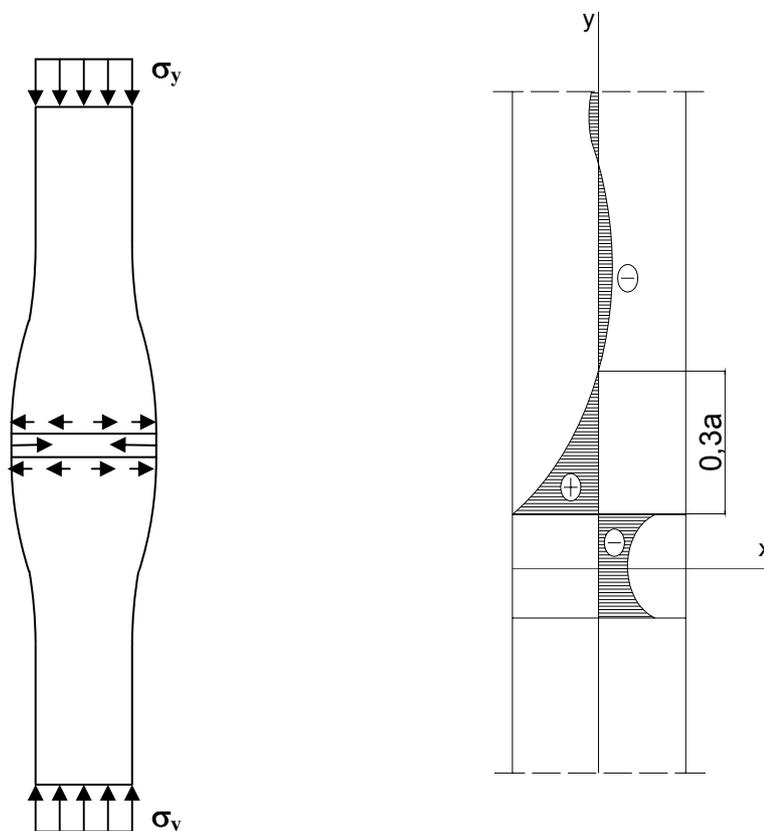


Figura 3.4 – Distribuição de tensões horizontais na argamassa e no elemento pré-moldado para a solicitação axial

*Fonte:* BRUGGELING & HUYGHE (1991)

### 3.3. Caracterização da argamassa de preenchimento da junta

A junta em estudo neste trabalho consiste em uma camada de argamassa de granulometria fina moldada entre dois elementos pré-moldados. É um tipo de ligação que possui aplicações diversas, podendo ser encontrada entre segmentos de pilares, entre painéis em estruturas de parede portante, entre pilar e laje, entre painéis de vigas e ainda em partes comprimidas de ligações submetidas à flexão.

Essa camada pode ser executada com:

- a) argamassa de assentamento – permite corrigir imperfeições existentes na superfície dos elementos e uniformiza a distribuição de tensões;
- b) argamassa de enchimento seca (*dry packed joint*) ou fluida – é inserida entre os elementos após a montagem dos mesmos;
- c) argamassa de enchimento a base de epoxi – é uma mistura de resina epoxi e areia usada quando se deseja alta resistência na camada.

Como, em geral, a resistência da argamassa é menor do que a resistência do concreto dos elementos pré-moldados, a capacidade resistente da ligação é considerada menor que a dos elementos pré-moldados. Isto faz com que a capacidade resistente destes elementos não seja completamente utilizada devido à limitação imposta pela camada de argamassa.

Por sua vez, a resistência da ligação está ligada com sua capacidade de deformação e conseqüente fissuração (BARBOZA, 2002). Assim, a adição de fibras à argamassa da junta poderá propiciar uma maior deformabilidade e resistência da ligação através da redução do número de fissuras presentes.

### **3.4. Ferramentas para análise numérica do comportamento de matrizes cimentíceas**

As análises e projetos das estruturas de concreto têm sido baseados em simples condições de equilíbrio e empirismos por quase um século. Um número de hipóteses simplificadoras tem sido adotado pelos métodos tradicionais de resistência dos materiais e da teoria das estruturas na ordem que os problemas tornam-se tratáveis.

A Teoria da Elasticidade assume uma resposta linear dos materiais e tem sido empregada no projeto de elementos estruturais. Embora esse método tenha geralmente resultado em projetos seguros, contém inconsistências inerentes e não refletem o comportamento real. Sob uma carga crescente, os materiais comportam-se de uma maneira cada vez mais inelástica e a estrutura frequentemente sofre uma redistribuição das tensões internas. Assim, durante a plastificação, a teoria linear não é mais válida para estimar a verdadeira distribuição de tensões e assim o fator de segurança torna-se desconhecido.

Os projetos de estruturas de concreto requerem não só a satisfação dos critérios de resistência (carga de colapso), mas também a verificação das condições de serviço. Essas últimas condições referem-se ao comportamento das estruturas às cargas de serviço com referência particular às fissuras e deformações. A Teoria Elástica Linear tem sido usada para analisar estruturas em cargas de serviço desde que geralmente assumindo que seus comportamentos não estão longe da linearidade das cargas de serviço (FIGUEIRAS, 1983). Algumas correções são feitas para se obter valores mais verdadeiros, como tomar as deformações como simples múltiplos das deformações elásticas. Entretanto, com o advento dos últimos métodos de cálculo, com auxílio de computadores e materiais de alta resistência, as estruturas passaram a ser mais esbeltas e, conseqüentemente, mais flexíveis, exigindo que as condições de serviço necessitem de novos métodos de análise.

As objeções previamente indicadas para os métodos tradicionais de análise, as novas aplicações de concreto armado, como em usinas nucleares, para as quais os tradicionais métodos de análise são claramente inadequados, e o desenvolvimento de computadores avançados têm proporcionado condições para o surgimento dos novos métodos. Os computadores têm permitido o desenvolvimento de métodos mais gerais de análise que podem prever as respostas da estrutura durante toda a aplicação da carga. Um desses métodos, o Método dos Elementos Finitos, tem sido constantemente usado na análise de estruturas de concreto armado.

O comportamento complexo dos componentes e estruturas de concreto armado, denominados fissuração do concreto, propriedade do material em estado multiaxial de tensões não linear e comportamento de interface complexa, antes ignorados ou tratados por métodos muito aproximados, podem ser incorporados mais racionalmente na análise.

O Método dos Elementos Finitos representa uma grande ferramenta para pesquisa e para interpretação de resultados experimentais. Respostas estruturais completas e realísticas referentes à carga de colapso podem ser analisadas utilizando esse método, associando todos os aspectos de segurança na análise.

Conseqüentemente, o Método dos Elementos Finitos é também uma ferramenta essencial para ser usada diretamente na análise e projetos de estruturas complexas,

como cobertas de grandes dimensões, sistemas de construção com grandes painéis, pontes, torres de vento e usinas nucleares.

### **3.4.1. Material Concreto Armado**

Concreto armado é um material constituído de aço para reforço e concreto, tendo esses dois elementos uma grande quantidade de diferentes propriedades. As propriedades mecânicas do aço são geralmente conhecidas. No entanto, as do concreto são mais difíceis para definir, dependendo de condições particulares de mistura, armazenagem, cura, natureza e taxa de carga e condições do ambiente.

A armadura é geralmente assumida capaz de transmitir apenas esforços axiais. Uma relação tensão-deformação é suficiente para um uso geral (FIGUEIRAS, 1983). Um modelo elasto-plástico perfeito ou um elasto-plástico com endurecimento para o comportamento do aço é comumente usado. Para o concreto, no entanto, um conhecimento do comportamento tensão-deformação sob estado biaxial e triaxial é normalmente necessário. Estudos experimentais extensos têm sido desenvolvidos para caracterizar as respostas e a resistência última do concreto sob estados multiaxiais de tensões.

Está provado ser uma tarefa muito difícil descrever o comportamento complexo do concreto e uma larga variedade de modelos tem sido proposto para caracterizar as relações tensão-deformação e o comportamento de falha do material concreto sob estado multiaxial de tensões. Todos esses modelos têm certas vantagens e desvantagens que dependem de uma larga escala de suas aplicações particulares.

Na modelagem das estruturas de concreto armado, não só as relações constitutivas do aço e do concreto devem ser definidas, mas também as relações de aderência entre ambos têm que ser conhecidas. Uma aderência perfeita é normalmente assumida na análise global para reduzir o número de graus de liberdade e evitar as dificuldades inerentes em assumir propriedades de aderência apropriadas. A complexa interação aço-concreto é então simplificada assumindo tal comportamento (aderência perfeita) e as propriedades dos materiais são frequentemente modificadas para simular os efeitos de relaxação e transferência de cisalhamento.