

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação  
de Estruturas de Máquinas-Ferramenta**

**Autor: Rosa Cristina Cecche Lintz  
Orientador: Vitor Antonio Ducatti  
Co-orientador: Cecília Amélia C. Zavaglia**

**08/2003**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

## **Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta**

**Autor: Rosa Cristina Cecche Lintz  
Orientador: Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti  
Co-orientador: Profa. Dra. Cecília Amélia C. Zavaglia**

**Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

**Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.**

**Campinas, 2003  
S.P. – Brasil.**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L658e Lintz, Rosa Cristina Cecche  
Estudo de materiais alternativos para fabricação de  
estruturas de máquinas-ferramenta / Rosa Cristina Cecche  
Lintz. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientadores: Vitor Antonio Ducatti e Cecília Amélia  
C. Zavaglia

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Máquinas-ferramenta. 2. Ferro fundido. 3.  
Polímeros. 4. Argamassa fluída. 5. Aço. Compósitos  
poliméricos. I. Ducatti, Vitor Antonio. II. Zavaglia,  
Cecília Amélia. III. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho aos meus queridos avós, pais, Jose e Rose, aos meus irmãos, Renata e Eduardo, e ao meu marido, Amaurí.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, sempre presente em minha vida.

A minha família pelo constante incentivo e ao meu marido professor Amaurí Ernesto Gomes pela ajuda e participação efetiva na realização desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, pelo estímulo à pesquisa e oportunidade oferecida, sem os quais este trabalho não teria se concretizado.

À professora Dr. Cecília Amélia C. Zavaglia, pela co-orientação.

Ao professor Dr. Vitor Antonio Ducatti pela sugestão do tema, orientação e estímulo constante durante todo o período da elaboração desta pesquisa. Agradeço-lhe pela dedicação, apoio e a amizade.

Ao professor Dr. Jose Maria Campos dos Santos pela atenção e orientação na realização dos ensaios dinâmicos e das análises numéricas deste trabalho.

Ao Centro de Tecnologia da Unicamp - aos professores Dr. Pablo Siqueira Meirelles e Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto que viabilizaram a realização de todos os ensaios dinâmicos das bases que constam deste trabalho. Em especial ao Engenheiro Edson José de Oliveira, Mario Valter Albertini por toda ajuda técnica relacionada à execução dos ensaios experimentais de fadiga.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas de Unicamp, Jose R. Marçal, Ademir de Almeida, Marcelo Ramos, Luciano Passos pela participação na execução dos ensaios.

Ao engenheiro Vagner Furlan da Indústria Máquinas Furlan pela doação do protótipo de aço fundido utilizado nesta tese.

Ao Departamento de Mecânica Computacional da Unicamp e as empresas LMS e Smarttech pela cessão de uso gratuito do software CADA-X Versão 3.5C.

## Resumo

LINTZ, Rosa Cristina Cecche, *Estudo de Materiais Alternativos para a Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 104 p. Tese de Doutorado.

As propriedades básicas dos materiais para máquinas-ferramenta incluem grande rigidez estática, características dinâmicas, estabilidade dimensional e baixo coeficiente de dilatação térmica. Aliadas a estas propriedades estão as exigências de facilidade no processo produtivo, o baixo consumo de materiais e a economia global. Materiais tradicionalmente usados como o ferro fundido e o aço soldado que possuem as características citadas mas, apresentam desvantagens como a baixa rigidez e amortecimento, grande consumo de energia e dificuldade de produção levaram os pesquisadores na busca de materiais alternativos, a partir dos anos setenta. Várias tentativas foram feitas, algumas com sucesso, de usar aço doce soldado, granito sintético, concreto de cimento hidráulico e concreto polimérico. Neste trabalho, um modelo simplificado de um barramento de torno foi moldado em ferro fundido, aço fundido, argamassa de cimento hidráulico de alto desempenho armada, argamassa de cimento hidráulico de alto desempenho reforçada com fibras de aço, concreto polimérico e concreto polimérico armado, num total de doze espécimes. Foram realizados ensaios de flexão estática simples para se medir as resistências de ruptura e de primeira fissura, e a rigidez na flexão dos modelos não metálicos. Os modelos foram submetidos a ensaio de sollicitação cíclica na flexão e posteriormente à ruptura, para se verificar a influência do carregamento cíclico na resistência de ruptura à flexão. Também foram ensaiados dinamicamente usando a técnica de análise modal experimental para se determinar os parâmetros modais: frequências naturais, fator de amortecimento e modos de vibração. Com esta experimentação pretende-se contribuir para o estudo sobre a substituição de materiais tradicionais na fabricação de máquinas-ferramenta por argamassas de cimento hidráulico armada de alto desempenho e concreto polimérico (resistência à compressão maior que oitenta megapascals). Os resultados obtidos com os materiais alternativos, segundo os ensaios acima, foram comparados com os dos modelos de materiais tradicionais de aço e ferro fundidos. Esta comparação corroborou os poucos resultados encontrados na literatura internacional, segundo os quais os modelos de argamassas armadas e os de argamassas reforçadas com fibras, correntes, bem como os de concreto polimérico possuem características de amortecimento mais efetivas do que aquelas obtidas nos modelos tradicionais de ferro e de aço.

### Palavras-Chave

- Estruturas de Máquinas-Ferramenta, Ferro Fundido, Aço, Materiais Alternativos, Concreto Polimérico, Argamassa Armada.

## Abstract

LINTZ, Rosa Cristina Cecche, *Study on Alternative Materials for the Fabrication of Machine Tools Structures*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 104 p. Tese de Doutorado.

The basic properties of the materials for construction of machine tools include high static stiffness, dimensional stability, dynamic characteristics and low coefficient of thermal expansion. In conjunction with these properties are the requirements of ease in production, the great amount of materials required and overall economy. Materials like cast iron and steel weldment traditionally utilized in this industry and that own the mentioned characteristics but, present disadvantages like the poor torsional rigidity and damping, great power consumption and difficulty in the production process led researchers to look for alternative materials since the seventies. A number of investigations were done, with some degree of success on the use of mild steel weldments, synthetic granite, hydraulic cement concrete and polymer concrete. In this work, a simplified model of a tool bed was moulded in cast iron, cast steel, high performance ferrocement, high performance mortar reinforced with steel fibers and polymer concrete, amounting to a total of twelve specimens. Simple flexure tests were carried out only with the non-metallic models for measure the first crack and failure loads. The same models were subjected to cyclical effort in bending and subsequently to failure for checking the influence of repeated load on ultimate flexure strength. The models were also tested dynamically by using the experimental modal analysis technique to determine the following modal parameters: natural frequencies, damping ratio and vibration modes. With this experimentation it intends to contribute to the study on replacement of traditional materials by high performance ferrocement and polymer concrete (compressive strengths more than eighty megapascal). The test results obtained with the utilization of alternative materials were compared with those originating in tests with traditional materials. This comparison has confirmed the few results found in the international bibliography, according which both the mortar ferrocement and polymer concrete models own damping characteristics more effective than those made of iron or steel.

### Key- Words

- Machine Tools Structures, Cast Iron, Cast Steel, Alternative Materials, Polymer Concrete, Ferrocement.

# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>v</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>01</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>04</b>
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>46</b>
<b>4 Resultados e Discussões</b>	<b>78</b>
<b>5 Conclusões</b>	<b>93</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>97</b>



## Lista de Figuras

Figura	pág.
2.1: Estrutura de uma base de máquina fresadora, Koblischek (1991).	16
2.2: Montagem da base composta de material 1 (Yamauchi e Yokoyama, 1983).	18
2.3: Amplitude de aceleração para a vibração mecânica gerada nos pontos 1 e 2 (Yamauchi e Yokoyama, 1983).	18
2.4: Arranjos das fibras nos compósitos (Bentur e Mindess, 1990).	28
2.5: Distribuição não uniforme das fibras de aço no concreto, observado por raios X (Bentur e Mindess, 1990).	29
2.6: Zona de transição nos compósitos de cimento reforçados com fibras de aço (Bentur e Mindess, 1990).	31
2.7: Geometria do arrancamento para simular a interação fibra-matriz (Bentur e Mindess, 1990).	33
2.8: Curva de deslocamento por tração com acentuada transição proveniente da transferência de tensão elástica para a tensão de atrito constante (Bentur e Mindess, 1990).	34
2.9: Orientação das fibras (a) orientação constante da fibra; (b) flexão da fibra na região da solitação da fissura (Bentur e Mindess, 1990).	35
2.10: Influência da fração volumétrica de fibras na resistência a compressão das argamassas, Fanella e Naaman (1985).	37
2.11: Influência do fator de forma na curva tensão-deformação das argamassas, Fanella e Naaman (1985).	37

2.12: Curva tensão-deformação para argamassas reforçadas com fibras (1,73% de fibras pelo volume) (Shah et al, 1978).	39
2.13: Índices de tenacidade calculados a partir da curva carga por deslocamento vertical (ACI 544.2R, 1989).	43
3.1: Dimensões principais da geometria do barramento do torno.	47
3.2: Curva granulométrica da areia situada na zona 3 (NBR 7211).	52
3.3: Armadura longitudinal	56
3.4: Tela de aço do protótipo.	57
3.5: Consistência da argamassa com 0 % de fibras	58
3.6: Consistência da argamassa com 1 % de fibras	59
3.7: Consistência da argamassa com 2 % de fibras	59
3.8: Consistência da argamassa com 3 % de fibras	60
3.9: Ensaio de resistência à compressão (ASTM C 109-93 adaptada).	61
3.10: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222).	62
3.11: Ensaio de resistência à tração na flexão (ASTM C78 – 94).	62
3.12: Ensaio à compressão axial simples para a determinação do módulo de elasticidade (NBR 8522).	63
3.13: Mistura dos componentes líquidos.	64
3.14: Mistura dos componentes líquidos com os agregados.	64
3.15: Ensaio de resistência à tração na flexão.	65
3.16: Molde de fibra de vidro e a armadura em forma de tela.	66
3.17: Fluidez da mistura e homogeneidade das fibras de aço.	68
3.18: Forma no momento que precedia a moldagem.	69
3.19: Lançamento da argamassa.	69
3.20: Acabamento da peça.	70
3.21: Preparo e lançamento do material.	71

3.22: Acabamento dos compósitos poliméricos.	71
3.23: Montagem do experimento estático.	73
3.24: Pontos de aplicação das cargas.	73
3.25: Ensaio cíclico realizado nos protótipos.	74
3.26: Esquema do ensaio experimental.	75
3.27: Montagem experimental do barramento de torno: (a) vista geral; (b) detalhe das molas pneumáticas.	75
3.28: Montagem da excitação e medição do sistema: (a) excitação horizontal; (b) excitação vertical e medição da velocidade vertical com LDV.	76
3.29: Configuração da geometria de medição.	77
4.1: Resistência à compressão em função do teor de fibras de aço.	79
4.2: A evolução da resistência à tração em função do teor de fibras de aço.	79
4.3: A evolução do módulo de ruptura em função do teor de fibras de aço.	80
4.4: Curva carga x deslocamento vertical das bases no ponto B.	82
4.5: Fissuras na ruptura no ensaio estático (ponto B).	83
4.6: Protótipos ensaiados à fadiga.	86
4.7: Resultados identificados: (a) frequências naturais e (b) amortecimentos modais.	89
4.8: Amortecimentos modais medianos.	90
4.9: Formas dos modos de vibrar dos barramentos.	91
4.10: Verificação da identificação do modelo AR2: (a) matriz do critério de confiança modal (MAC); (b) FRF's medias e sintetizadas.	92

## Lista de Tabelas

Tabela	pág.
2.1: Propriedades típicas do concreto polimérico (ACI 548.6R, 1996).	09
2.2: Frequências naturais das bases de ferro fundido e Motema-AC, Koblischek (1991).	15
2.3: Frequências naturais de 0 a 500 Hz, Koblischek (1991).	16
2.4: Fator de amortecimento para os diferentes materiais, Koblischek (1991).	16
2.5: Propriedades mecânicas dos materiais poliméricos (Yamauchi e Yokoyama, 1983).	17
2.6: Propriedades dos polímeros epóxi e poliéster (Vipulanandam et al., 1988).	19
2.7: Fator de amortecimento de vibração em função do teor de resina epóxi (Kane, 1991).	21
2.8: Características dinâmicas dos materiais (Paturuev et al., 1987).	24
2.9: Características mecânicas dos concretos poliméricos (Yeon et al., 1991).	24
2.10: Ensaio de caracterização (Rahman e Mansur, 1992).	25
2.11: Resultados dos ensaios estáticos e de fadiga (Rahman e Mansur, 1992).	26
2.12: Ensaio dinâmico (Rahman e Mansur, 1992).	26
2.13: Dosagem para os compósitos de cimento reforçados com fibras de aço (ACI 544.1R, 1982).	30
3.1: Composição química do aço (ASTM A 216 grau WCB).	48
3.2: Exigências de tração do aço (ASTM A 216 grau WCB).	48

3.3: Características físicas do cimento CP V ARI (Fonte: Boletim Técnico do Fabricante).	50
3.4: Características químicas do cimento CP V ARI (Fonte: Boletim Técnico do Fabricante).	50
3.5: Massa específica dos agregados miúdos.	51
3.6: Massa unitária a solto dos agregados miúdos.	51
3.7: Análise granulométrica do agregado miúdo.	52
3.8: Características do superplastificante (Fonte: Manual Técnico da MBT do Brasil).	54
3.9: Análise química da sílica ativa (Boletim Técnico do Produto).	55
3.10: Análise física da sílica ativa (Boletim Técnico do Produto).	55
3.11: Composição das argamassas.	58
3.12: Resultados dos ensaios mecânicos de caracterização.	61
4.1: Valores da carga de primeira fissura e da carga de ruptura.	81
4.2: Carga de ruptura antes e depois do ensaio de fadiga.	84
4.3: Freqüências naturais identificadas.	87
4.4: Amortecimentos modais identificados.	87
5.1: Resultados dos Ensaios Estáticos	94

## **Nomenclatura**

### **Siglas**

AA - argamassa armada

ACI - American Concrete Institute

AF - aço fundido

AME - Análise Modal Experimental

AR1 - argamassa reforçada com 1% de fibra de aço

AR2 - argamassa reforçada com 2% de fibra de aço

AR3 - argamassa reforçada com 3% de fibra de aço

ASTM - American Society for Testing and Materials

B-1 - base de argamassa reforçada com 1% de fibras

B-2 - base de argamassa reforçada com 2% de fibras

B-3 - base de argamassa reforçada com 3% de fibras

B-4 - base de argamassa reforçada com 3% de fibras

B-5 - base de argamassa reforçada com 3% de fibras

B-6 - base de argamassa reforçada com 3% de fibras

CH - hidróxido de cálcio

CP - concreto polimérico

CPA - concreto polimérico armado

CIP - concreto impregnado com polímero

CMP - concreto modificado com látex

CSH - silicatos de cálcio hidratados

FAM - fator de amortecimento modal

FB - base de ferro fundido

FF - ferro fundido

Freq. - frequência natural

LDV - vibrômetro laser doppler

LMS CAD-X3.5C - programa computacional comercial de análise modal

MAC - Critério de Confiança Modal

MAPM - metacrilato de alto peso molecular

MMA - metilmetacrilato

RILEM - Reunion Internationale des Laboratories d'et de Recherches sur les Matériaux et les Structures

SPI - Society of the Plastics Industry

## Letras Gregas

$\ddot{a}$  - deslocamento vertical da primeira fissura

$\ddot{A}$  - decremento logarítmico

$c_r$  - deslocamento vertical correspondente à primeira fissura

$u$  - deslocamento vertical correspondente à carga de ruptura

$\alpha$  - coeficiente de amortecimento

$\tau_{au}$  - tensões de cisalhamento tangencial

$\tau_{fu}$  - tensão de cisalhamento de atrito

## Letras Latinas

$\frac{a}{c}$  - relação água/cimento

E - módulo dinâmico

$f_1$  - frequência do 1º modo

fc - resistência à compressão

$f_{LD}$  - resistência à tração por compressão diametral

ft,sp - resistência à tração

ft,fl - módulo de ruptura

$F_t$  - fator de tenacidade na flexão

I - momento de inércia

$l_c$  - comprimento mínimo

$l/d_f$  - fator de forma (comprimento/diâmetro da fibra)

$P_{cr}$  - carga correspondente à primeira fissura

$P_u$  - carga correspondente à ruptura na flexão

$v$  - velocidade

$V_f$  - taxa volumétrica de fibras de aço nos compósitos

W - peso específico



# Capítulo 1

## Introdução

Máquinas-ferramenta, também denominadas máquinas operatrizes, são destinadas à realização de qualquer trabalho de acabamento mecânico no material, como por exemplo, as prensas, martelos, tornos, fresadoras, plainas. As máquinas-ferramenta são equipamentos formados por uma reunião de componentes que transmitem ou modificam forças, mecanismos e energia de uma maneira pré-estabelecida. Na fabricação de bases de máquinas-ferramenta são exigidas propriedades como altas rigidezes estáticas à flexão e à torção, características dinâmicas apropriadas, estabilidade dimensional a longo prazo, baixo coeficiente de dilatação térmica, facilidade na produção da peça e baixos custos. Uma característica importante no comportamento dinâmico de subestruturas de máquinas-ferramenta está associada à vibração auto-excitada (*chatter*) gerada durante o processo de usinagem. Tais vibrações provocam níveis de amplitude de deslocamento relativo entre a ferramenta de corte e a peça trabalhada que comprometem o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais exigidas no processo de fabricação da peça acabada. Este mecanismo impede a utilização de velocidades de corte mais elevadas, no processo de usinagem, caracterizando-se como um óbice à redução dos tempos de produção e, conseqüentemente dos custos do produto final.

Os materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de bases de máquinas-ferramenta são o aço e o ferro fundido. Estes materiais possuem as propriedades requeridas, em níveis aceitáveis, e ainda oferecem grandes facilidades de moldagem em formas complexas e de usinagem, apresentando alto grau de precisão. Entretanto apresentam desvantagens, tais como: baixo amortecimento, grande retração durante o arrefecimento, elevado consumo de energia na

fundição antes da moldagem, tempo de produção longo, alto custo e necessidade de tratamento anticorrosivo.

Na década de 70 foram propostos como materiais alternativos: o concreto armado (Heitmann e Venkatraman, 1970), o granito sintético (Koblischek, 1978), o concreto polimérico e posteriormente a argamassa reforçada com fibras (Chua et al., 1987).

No Instituto de Tecnologia de Darmstadt, em 1977, Koblischek e seus colaboradores empregaram, na fabricação de base máquina-ferramenta, um concreto polimérico feito com calcita, quartzo e resina de polimetacrilato denominado Motema-AC. Segundo Koblischek (1987) este compósito possui comportamento dinâmico superior ao do ferro fundido, apresentando um amortecimento de vibração seis vezes maior e grande estabilidade térmica.

Um dos pioneiros na aplicação do concreto polimérico em substituição ao ferro fundido e aço na estrutura e componentes de máquinas-ferramenta foi o Professor Patrick McKeown, especialista em Engenharia de Precisão, da Cranfield University, em Cranfield, na Inglaterra. O Professor McKeown colaborou, na década de 80, durante muito tempo na indústria Cranfield Moulded Structures Ltd, no desenvolvimento de um concreto polimérico à base de granito, denominado Granitan S-100. Este compósito foi sendo aperfeiçoado recebendo aditivos químicos e agregado de quartzo, conferindo ao material maior resistência mecânica e durabilidade, passando a se chamar Zanite.

Kreienbühl em 1988 empregou o concreto à base de resina epóxi na fabricação de uma base de máquina-ferramenta. O autor verificou alguns benefícios trazidos pelo uso do concreto polimérico em substituição aos materiais tradicionais, como: economia de 30 % no custo do material, capacidade de amortecimento de oito a dez vezes maior, melhora na qualidade das superfícies usinadas e aumento do tempo de vida útil da máquina-ferramenta em 30% (Kreienbühl, 1991).

A Universidade Nacional de Singapura vem realizando estudos e verificando a possibilidade de substituir os materiais tradicionais pela argamassa armada (Rahman e Mansur, 1992) e concreto impregnado com polímeros (Rahman et al., 2001).

## **1.1 – Objetivos**

Esta pesquisa tem como proposta o estudo do comportamento estrutural de bases de máquinas-ferramenta fabricadas com cinco tipos de materiais diferentes, submetidos a ensaios estáticos, dinâmicos e de fadiga. A peça escolhida como modelo, para a realização dos ensaios, representa um barramento de torno em escala natural. Seguindo este modelo são produzidos doze protótipos: um de aço, um de ferro fundido, dois de argamassa armada, seis de argamassa reforçada com fibras e dois de concreto polimérico.

São realizados ensaios estáticos nas peças e determinadas suas rigidezes, cargas de primeira fissura e cargas de ruptura. Posteriormente são executados ensaios dinâmicos para identificar os três modos principais de vibração, quais sejam flexão vertical, flexão horizontal e torção. Por meio dos ensaios dinâmicos são obtidos os parâmetros modais: frequência natural, fator de amortecimento e formas dos modos de vibração. Em seguida as peças são submetidas a ensaios de fadiga e verificada a influência do carregamento repetido na carga de ruptura.

Os resultados obtidos nos ensaios propostos são analisados e comparados, servindo de critério para orientação na seleção de materiais alternativos ao ferro fundido e ao aço na construção de subestruturas de máquinas-ferramenta.

## **1.2 - Organização do Trabalho**

A tese foi desenvolvida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo descreve resumidamente os objetivos pretendidos.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica do concreto polimérico aplicado em máquinas-ferramenta, da argamassa armada e dos benefícios trazidos pela adição das fibras de aço a estruturas de concreto de cimento portland.

O terceiro capítulo descreve os materiais empregados neste estudo, as características das argamassas com e sem fibras no estado fresco, os ensaios mecânicos de caracterização realizados no estado endurecido, as propriedades do concreto polimérico utilizado, a fabricação dos protótipos de argamassa e de polímero, e os procedimentos seguidos nos ensaios estáticos de flexão, ensaios de fadiga e ensaios dinâmicos.

O quarto capítulo apresenta a discussão dos resultados obtidos e o quinto capítulo, as conclusões.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 – Introdução: Concretos Contendo Polímeros

Os concretos que contêm polímeros podem ser classificados em três grandes categorias:

- concreto polimérico (CP);
- concreto modificado com látex ou concreto de cimento portland polimérico ou concreto de cimento portland modificado por polímero (CMP);
- concreto impregnado com polímero (CIP).

O concreto polimérico (CP) é formado pela polimerização de uma mistura de monômeros e agregados. Este material foi utilizado pela primeira vez no começo dos anos 50 como granito sintético nos Estados Unidos. Na década de 60 foi desenvolvido na Alemanha o concreto polimérico aplicado em reparos estruturais. Entretanto este material passou a ser largamente empregado a partir de 1970 nos Estados Unidos na fabricação de pré-moldados e em reparos de concreto de cimento portland.

Vários comitês foram organizados para coletar e disseminar informações sobre o concreto polimérico, como o Comitê 548 em 1971, pelo ACI e o Comitê do Concreto Polimérico em 1986 pelo Composites Institute da Society of the Plastics Industry (SPI). Em 1981 aconteceu o primeiro Congresso Internacional de Polímeros no Concreto, que se repete a cada três anos, e posteriormente foi formado o Comitê do Concreto Polimérico TC-105 pela RILEM (Fowler, 1989).

Atualmente o concreto polimérico é utilizado na construção de elementos estruturais, estruturas subterrâneas e submersas, componentes estruturais em forma de sanduíche, painéis de

parede suscetíveis a abalos sísmicos e vento, abóbada subterrânea que resiste a pressão lateral do solo, retenção de lixos radioativos, camadas de pavimentação e tabuleiros de pontes, amortecedores de vibrações, bases de máquinas, componentes de máquinas-ferramenta sujeitas a grande variação de carregamento, e dormentes de estradas de ferro submetidos a cargas dinâmicas e estáticas.

### **2.1.1 - Concreto impregnado com polímero (CIP)**

O concreto impregnado com polímero (CIP) é um concreto de cimento portland endurecido impregnado com um monômero que é posteriormente polimerizado no local. Os monômeros mais utilizados são metilmetacrilato e estireno. A polimerização pode ser feita utilizando-se três métodos. O primeiro consiste do uso de uma mistura monômero-catalisador para penetração e subsequente polimerização do monômero pelo aquecimento do concreto com água quente, aquecedores infravermelhos ou vapor. O segundo método envolve uma combinação de endurecedores químicos e catalisadores e a polimerização acontece à temperatura ambiente. No terceiro processo a polimerização é induzida por raios gama, realizada à temperatura ambiente.

O concreto pode ser impregnado parcialmente ou totalmente. A impregnação parcial é realizada na superfície do concreto, a pequenas espessuras, para protegê-lo de agentes agressivos. A impregnação parcial é largamente aplicada em tabuleiros de pontes de concreto, vertedouros e tubos de concreto. A impregnação total é mais profunda que a parcial, e consiste em preencher a maior quantidade possível de poros capilares presentes no concreto. Para obtê-la é necessário primeiro retirar a água livre presente no material, submetendo-o a temperaturas próximas de 150° C, posteriormente impregnar a peça com monômero por imersão ou sob pressão e então ativar a polimerização pela reação mais adequada.

As peças de CIP geralmente não têm função estrutural. A impregnação com polímeros é feita em concretos que necessitam de elevada resistência à abrasão e durabilidade evitando a ação do gelo e degelo e ao ataque de soluções químicas.

### **2.1.2 - Concreto modificado com polímero (CMP)**

O concreto modificado com látex também denominado concreto de cimento portland polimérico ou concreto de cimento portland modificado por polímero (CMP) é definido pelo ACI

548.1R (1997) como um concreto de cimento portland comum, obtido pela substituição de parte da água de amassamento por polímeros orgânicos. Os polímeros utilizados são: copolímero estireno-butadieno, copolímero estireno acrílico, poliacetato de vinila. Os polímeros mais empregados hoje são à base de látex, definidos como partículas de polímero orgânico dispersas em água.

Na produção dos CMP, a cura deve ser feita ao ar e à temperatura ambiente, para que o material produza um filme de polímero contínuo que revista os produtos de hidratação do cimento, as partículas de agregado, os poros capilares e as microfissuras (ACI 548.1R, 1997). O endurecimento do látex se dá por secagem ou perda de água, ao contrário da polimerização de monômeros por aditivos e ativação térmica.

O CMP tem a característica de aderir fortemente ao concreto antigo e resistir à entrada de água e de soluções agressivas. É aplicado no concreto armado para proteger as armaduras da corrosão, na recuperação de pisos deteriorados, pavimentos e tabuleiros de pontes.

### **2.1.3 - Concreto polimérico (CP)**

O concreto polimérico é um compósito no qual o agregado é colado entre si numa matriz com um aglomerante polimérico. Estes compósitos não contêm a fase de cimento portland hidratado, embora o cimento portland possa ser usado como agregado ou filler. Segundo ACI 548.6R (1996) os monômeros mais utilizados são: metacrilatos, epóxi, furfurool, estireno, trimetilpropano de trimetacrilato, poliéster insaturado e éster de vinila. A produção do CP é feita pela mistura de um ou mais monômeros na forma líquida ao sistema de agregados. Aceleradores e catalisadores de polimerização são empregados na mistura para completar a polimerização dos monômeros.

Os agregados mais utilizados são: areia silicosa, granito, cascalho de rio, basalto, cinzas volantes, carbonato de cálcio e pó de sílica. Os agregados devem ser secos (menos que 0,2% de umidade) e livres de sujeiras e de materiais orgânicos. A textura superficial influencia no estado fresco do concreto. Agregados lisos oferecem maior trabalhabilidade à mistura e requerem menor quantidade de resina para envolvê-los.

São definidos a seguir os concretos poliméricos mais comuns:

- concreto à base de metacrilato - o metilmetacrilato (MMA) e o metacrilato de alto peso molecular (MAPM) são os monômeros primários utilizados na produção do concreto polimérico

de metacrilato. O MMA tem sido usado na indústria de CP por vários anos e apresenta características como: baixa viscosidade, excelente resistência de aderência e durabilidade a longo prazo. O monômero MMA é um líquido altamente volátil como um ácido claro (translúcido), fino (não denso), com cheiro pungente (azedo) e o tempo de cura é de 30 a 60 minutos podendo ser formulado para curar sob grande variação de temperatura, adequado para o uso no inverno. O concreto polimérico de metilmetacrilato MMA mais utilizado, é produzido pela reação de polimerização que ocorre entre o monômero estireno e metilmetacrilato com o catalisador peróxido de benzoila e o endurecedor amino;

- concreto à base de epóxi - o concreto polimérico de epóxi é formado por um sistema de agregados e dois componentes cuja proporção da relação resina: endurecedor é 1:1 ou 2:1 (em massa). As resinas epóxi são resistentes quimicamente e podem ser formuladas para curar sob várias condições de temperatura e umidade. Apresenta alta viscosidade, baixa retração na cura, excelente resistência à abrasão e à tração e oferecem forte aderência ao concreto de cimento portland, aço e a maioria dos materiais de construção.

#### **2.1.4 - Propriedades dos concretos poliméricos**

Os compósitos poliméricos no estado endurecido são constituídos por uma matriz sólida, contínua, formada pelo entrelaçamento de longas cadeias complexas, criadas pelas reações de polimerização do monômero reativo. O comportamento estrutural do compósito após a realização do processo de polimerização é controlado pelo volume, distribuição e características do polímero, juntamente com a composição, dimensão máxima e distribuição dos agregados.

As propriedades mecânicas dos concretos poliméricos estão no intervalo de valores apresentados pelos concretos de cimento portland e os metais. O CP possui propriedades diferentes sob compressão axial e tração axial. Sob condições normais de aplicação de cargas estáticas a curto prazo, a relação entre as resistências à compressão e à tração varia de 6 a 10. Aumentando-se o tempo de aplicação da carga, a resistência à tração limite diminui, devido à natureza viscoelástica do aglomerante e dos efeitos da retração. Na resistência à compressão a influência do tempo de duração da carga é menos pronunciada. Para a maioria dos concretos poliméricos, a resistência à compressão está na faixa de 80 a 100 MPa e a resistência à tração varia de 10 a 20 MPa. Esses valores apresentados dependem do tipo de aglomerante empregado, da granulometria característica dos agregados utilizados no concreto (ACI 548.6R, 1996).

A resistência à tração na flexão é influenciada pela natureza do polímero. Concretos poliméricos que empregam polímeros flexíveis exibem comportamento mais dúctil que aqueles que utilizam polímeros rígidos. A resistência à tração na flexão para um CP varia de 14 a 28 MPa.

A deformação do CP depende do módulo de elasticidade, do alongamento máximo do aglomerante polimérico e da porcentagem de resina usada. Com a diminuição do teor de aglomerante na mistura (aproximadamente 5% por volume), o módulo de elasticidade passa a ser progressivamente influenciado pelo agregado. Os polímeros rígidos possuem módulo de elasticidade acima de 40 GPa e as resinas flexíveis, 4 GPa. O coeficiente de Poisson, outra propriedade determinada para o CP de metacrilato, está próximo de 0,35.

Quanto à resistência ao cisalhamento, os concretos poliméricos assim como os concretos comuns sofrem rupturas de tração diagonal, nas regiões de cisalhamento puro. Os valores dessas propriedades para o CP variam de 2 a 26 MPa.

A resistência à fadiga das peças de CP está relacionada com a tensão aplicada. Aumentando-se a tensão, diminui-se o tempo de vida pela fadiga. Hsu e Fowler (1985) verificaram que vigas que não foram submetidas ao ensaio de fadiga apresentaram maiores valores de rigidez e resistência à tração na flexão quando ensaiadas estaticamente.

A densidade depende dos filers utilizados na produção do CP. Empregando-se os mesmos agregados do concreto comum e porcentagens de resinas menores de 15%, em massa, a densidade se encontra na faixa de 2200 a 2400 kg/m<sup>3</sup>. As argamassas poliméricas apresentam densidade próxima a 2200 kg/m<sup>3</sup>. Para o CP de peso leve, em que são empregados filers de baixa densidade, os valores caem para a faixa de 1100 a 1400 kg/m<sup>3</sup>, podendo chegar a 640 kg/m<sup>3</sup>, para materiais especiais. A tabela 2.1 apresenta as propriedades mais comuns para diferentes concretos poliméricos.

Quanto às propriedades dinâmicas o CP apresenta características excelentes de amortecimento de vibração sendo utilizado na fabricação de bases de máquinas-ferramenta. O fator de amortecimento para o concreto de epóxi varia de 0,003 a 0,005 e para o ferro fundido 0,0003 (Kane, 1991).



Tabela 2.1: Propriedades típicas do concreto polimérico (ACI 548.6R, 1996).

aglomerantes	metacrilato	epóxi	furano	poliéster-estireno	éster de vinila
consumo em peso (%)	6 a 12	20	-	8 a 18	7
resistência à tração na flexão (MPa)	8 a 62	17 a 34	21 a 24	28 a 59	17 a 149
resistência à compressão (MPa)	70 a 140	59 a 120	62 a 102	70 a 140	62 a 110
resistência à tração (MPa)	8 a 14	9 a 24	9,6 a 14	11 a 70	10 a 90
resistência ao cisalhamento (MPa)	26	-	-	2	-
densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2388	2180 a 2596	-	-	2404
coeficiente de Poisson	0,23 a 0,35	-	-	-	0,22
retração (%)	1,5 a 5,0	0,02 a 0,20	0,1 a 0,2	0,3 a 3	-

### 2.1.5 - Aplicações do CP em máquinas-ferramenta

#### - Granito sintético

O granito sintético (Granitan S-100) é um concreto feito com duas partes, em massa, de granito de alta qualidade para uma parte de resina comercial epóxi/endurecedor. Este material foi desenvolvido na década de 80 pelo Professor Patrick McKeown, para substituir o ferro fundido e aço na estrutura e componentes de máquinas-ferramenta (Cranfield Moulded Structures, 1987).

O processo de fabricação se inicia com a mistura de uma das cinco granulometrias de granito disponíveis com a resina epóxi. Os grãos de granito devem ter formato aproximadamente cúbico para fornecer a compactação da mistura e conseqüentemente a sua rigidez e a resina deve ter um mínimo de viscosidade e tensão superficial para oferecer um alto poder de molhagem dos grãos de pedra. A mistura é vibrada de forma controlada de modo a distribuir regularmente os grãos em todo seu volume, resultando na mais alta compactação possível para essa combinação de grãos. Em seguida ela é vertida nos moldes sobre uma mesa vibratória, para que ela reproduza fielmente as nuances do molde.

Os moldes utilizados para a fabricação das peças podem ser de aço, alumínio ou madeira. Os moldes de madeira são adequados para a fabricação de protótipos, peças de baixa precisão ou para serem usados uma só vez. Miolos de isopor são usados para reduzir a massa total das peças através da criação de seções vazadas. Partes metálicas e inserções de peças para rosqueamento

podem ser embutidas na hora da moldagem. Superfícies de bom acabamento do moldado podem ser obtidos para posterior colagem com partes metálicas de apoio das máquinas-ferramenta.

O tempo de vibração do material dentro do molde deve ser o necessário para que o compósito alcance o seu mais alto grau de empacotamento. Depois do período da vibração o conjunto deve ficar curando entre 8 e 10 horas. A peça é removida do molde após o período de cura mas o material só alcançará sua plena resistência mecânica e estabilidade volumétrica após 5 a 6 dias.

Após a remoção do molde o material pode ser usinado ou furado usando as máquinas adequadas de corte ou furadeiras de alvenaria. Essas operações pós desmoldagem podem ser evitadas se durante a fase de moldagem das peças forem feitas as inserções de partes metálicas e volumes de isopor citados anteriormente. Além dos benefícios proporcionados a nova técnica permite também a incorporação de condutos elétricos, tubagem de resfriamento e lubrificação fixados nas suas posições corretas durante a moldagem do CP.

Em condições normais, tolerâncias de planicidade da ordem de 0,08 cm/m podem ser transmitidas pelas paredes do molde. Para mais alta precisão do que esta, um material mais liso para as paredes do molde deve ser usado. Da mesma forma, assentos metálicos retificados podem ser colados à superfície e mantidos de forma precisa e segura na posição pelo emprego de um gabarito tanto no plano horizontal como no plano vertical, enquanto a cola dá a pega. Novamente, tolerâncias bem apertadas podem ser mantidas sem a necessidade de posterior usinagem.

Uma vez que a usinagem até as dimensões finais, juntamente com outras operações tais como, longo ciclo de tratamento térmico, usinagens grosseiras, trabalho de ajustagens, obturações e às vezes até a pintura podem ser totalmente eliminadas ou reduzidas, uma economia de até 50%, comparado com o aço fundido, pode ser conseguido. Além disso, o produto final apresenta alta estabilidade dimensional com corpos-de-prova mostrando deformações diferenciais (retração) menores de 6  $\mu\text{m}$  após um período de 6 anos. Outras características incluem alta rigidez e superior capacidade de amortecimento comparando-se com o aço. Esta última característica é de importância crescente tanto para estruturas sujeitas a alto impacto mecânico e vibração bem como para eliminar os efeitos da ressonância intrínseca de máquinas-ferramenta destinadas a produzir peças de alta precisão.

## - Concreto polimérico à base de quartzo

O concreto polimérico à base de quartzo foi desenvolvido mais tarde, sendo constituído de epóxi de alta resistência misturado com agregado de composição granulométrica cientificamente selecionada, recebendo o nome comercial Zanite. Além destes componentes básicos, o compósito passou a contar também com aditivos químicos para aumentar a sua resistência mecânica e durabilidade. Diferentemente do produto anterior, Granitan S-100, o Zanite tem como agregado na sua composição somente o quartzo. O Granitan S-100 era obtido com o granito, rocha composta de vários minerais como o quartzo, o feldspato e a mica, com composição sujeita à variação conforme a pedreira. Já o quartzo possui 99,6% de  $\text{SiO}_2$  puro, oferecendo dureza superior, maiores resistências mecânicas e química.

O campo de aplicação do novo concreto polimérico também foi expandido, passando a ser empregado além de em máquinas-ferramenta, em bases de máquinas na área médica (raio-x, escaneadores) e na área de metrologia.

O desempenho do Zanite pode ser melhor avaliado pela leitura dos valores numéricos das propriedades fornecidas por catálogo do produto:

Resistência à compressão	137 N/mm <sup>2</sup>
Resistência à tração na flexão	29 N/mm <sup>2</sup>
Resistência à tração pura	19 N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	40 kN/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,25
Densidade	2,3 kg/dm <sup>3</sup>
Limites de temperatura	- 45° C a 120° C
Coefficiente de dilatação térmica	1,2 x 10 <sup>-5</sup> ° C
Condutibilidade térmica	1,6 W/m. ° C
Calor específico	960 J/kg. ° C
Razão de amortecimento	0,157
Absorção de água	0,01 %
Resistência química	excelente

A resistência química do compósito é assegurada pela pureza do agregado empregado (99,6% de  $\text{SiO}_2$ ) e pela formulação da resina epóxi que resiste bem aos solventes comuns, aos

ácidos e aos álcalis. Para casos de extrema resistência química, como tanques de ácidos em alta temperatura, o sistema polimérico da resina pode ser especialmente formulado.

A espessura mínima das paredes pré-moldadas com o concreto polimérico Zanite deve ser de no mínimo duas vezes o diâmetro máximo dos grãos de quartzo. Seções mais finas poderão ser moldadas desde que utilizada dimensão adequada de agregados. O tamanho médio das peças pré-moldadas feitas com o concreto polimérico Zanite padrão varia de 350 kg a 900 kg. A retidão dos componentes, localização dos furos, diâmetro dos furos são todas medidas de precisão. A precisão dos componentes moldados é determinada pelo projeto do molde, pela construção e pelas variáveis do processo. Usando um molde de aço de alta qualidade projetado adequadamente, componentes podem ser moldados com uma planicidade de 0,004 cm/m, tolerância característica de 0,008 cm/m e diâmetros dos furos de 0,004 cm/m. Quando tolerâncias mais apertadas nas medidas são exigidas, ou um molde de baixo custo vai ser usado, as tolerâncias podem ser alcançadas usando processos de usinagem secundária, fresamento ou de grauteamento.

Os componentes são usualmente envasados de cabeça para baixo, com a parte de cima do molde aberta. Na maioria dos casos a altura do componente moldado é mantida na faixa ¼ polegada (6,35 mm). Esta superfície moldada (a parte de baixo do componente) é, portanto, muito grosseira e não controlada precisamente. Quando a medida da altura global do componente moldado tiver que ser precisa, será necessário acabamento pós-moldagem aumentando-se o custo da produção do moldado.

A maioria das máquinas-ferramenta é submetida à carga de compressão. Quando os componentes são solicitados a esforços de tração, a espessura da seção deve ser mantida e empregado reforços internos. Esses reforços podem ser barras de aço do concreto armado, cantoneiras, barras roscadas, barras de fibra de vidro ou qualquer outra estrutura rígida.

Os componentes moldados de Zanite podem ser pintados com qualquer tinta comercial, incluindo as recentes tintas à base de água. Não é necessário utilizar o primer porque não há o risco de ferrugem. É necessário limpar adequadamente a superfície do moldado para remover o desmoldante da superfície do componente, senão a pintura não aderirá. A maioria dos componentes não é pintada. Diferente das estruturas metálicas que enferrujam ou sofrem corrosão, os moldados com Zanite não podem enferrujar ou serem corroídos e são impermeáveis à maioria dos solventes comuns. As cores predominantes nos moldados são a preta, a branca e o

bronze. É possível moldar em outras cores, mas isto exige produção volumétrica significativa e a combinação de cores não é possível. O acabamento da superfície do moldado reproduzirá exatamente a superfície do molde, de alto brilho a acabamento fosco.

Com cálculo adequado o moldado feito com Zanite apresenta uma das mais baixas taxas de fluência (deformação lenta) do que qualquer material de construção. Os moldados metálicos não só sofrem deformação lenta, mas também sofrem distorção devido aos esforços internos. É muito importante que a mistura do concreto polimérico seja adequadamente calculada e processada. Agregados graduados e compactação adequada são necessários para assegurar um mínimo de vazios de ar, juntamente com o contato sólido agregado-agregado, minimizando, portanto qualquer retração.

O CP de quartzo tem massa específica  $2,27 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente a mesma do alumínio. Como a espessura das paredes será maior do que uma moldagem de alumínio, o peso do componente será maior. A densidade pode ser aumentada usando materiais de enchimento mais densos como limalhas de ferro, minerais de ferro ou materiais cerâmicos.

A cura padrão é de 8 horas, usualmente durante a noite. Uma cura mais rápida é usada para componentes simples, onde a produção de grande volume é exigida e a precisão não. Para componentes muito complexos, ou de alta precisão, a velocidade de cura é retardada para 24 horas.

Orifícios com roscas são criados moldando inserções roscadas na posição. Essas inserções são feitas de aço, aço inox e latão. As localizações destes orifícios são determinadas pelo molde, o que significa uma vez que o molde é qualificado, a inspeção subsequente do moldado é minimizada.

Na maioria das vezes a inserção é forte bastante para permitir um parafuso de grau 8 ser apertada com o torque adequado. Para casos de extrema carga no parafuso, as inserções devem ser ancoradas mais fundo na moldagem. As inserções padrão têm uma configuração externa hexagonal, com uma seção central saliente para permitir a ancoragem no compósito. As inserções devem ser aplicadas no mínimo um diâmetro da aresta do componente.

O compósito depois de moldado não pode ser furado para ser rosqueado. Se um orifício com rosca é necessário após a moldagem, um buraco é furado e uma inserção é grauteada na posição usando um gabarito.

Os moldados de Zanite podem ser lixados usando lixadeira de óxido de alumínio e líquido refrigerador para reduzir a poeira. A superfície pode também ser usinada utilizando ferramentas de carbetto.

A pobre transferência de calor do compósito permite a base resistir as transferências de calor. No caso de base de máquinas-ferramenta, isto significa que as distorções devidas a geração de calor numa seção transferindo distorção para outra seção, não ocorrerão. Transientes de cargas de calor externos devido a janelas abertas ou a luz do sol vindo da janela terá pouco efeito numa base. As estruturas metálicas tendem a distorcer rapidamente devido às mínimas cargas térmicas. Quando a transferência de calor for importante, furo para ventilação ou linhas de refrigeração internas pode ser embutido nas peças.

Zanite é feito de polímero termorrígido, portanto ele não fundirá. Como qualquer outro material a resistência diminui conforme a temperatura aumenta. A resistência é levemente reduzida quando a temperatura alcança 160 °F (71 °C). Componentes podem ser usados até temperaturas de 250 °F (121 °C). O custo por peso não é comparável aos moldados metálicos porque os componentes feitos de concreto polimérico são moldados já com tolerâncias dimensionais finais, portanto o custo é para o componente acabado. Os moldados metálicos são cotados em preço por peso, mas eles requerem usinagem secundária tal que o preço por quilo na entrega é muito maior.

Os moldes podem ser feitos de chapas de aço, alumínio fundido, madeira, chapas de metais e de fibra de vidro. Os moldes de fibra de vidro são usados para componentes de grandes volumes e com baixa precisão. Os moldes de chapa de aço são usados para componentes de custo baixo, de grande volume e precisão média nas medidas. Os moldes de alumínio fundido são usados quando o componente tem configuração complicada e moldes múltiplos são requeridos. Componentes de alta precisão podem ser somente moldados usando moldes pesados de aço.

A vida útil de um molde depende do seu projeto, sua construção e manipulação. Um molde de aço de boa qualidade deve durar centenas de moldagens com um mínimo de manutenção. Os moldes de fibra de vidro também produzem centenas de componentes.

### **- Concretos poliméricos em geral**

O estudo com o concreto à base de metacrilato foi iniciado em 1977, no Instituto de Tecnologia de Darmstadt. Koblischek (1987) desenvolveu um concreto polimérico feito de

calcita de estrutura cristalina romboédrica, quartzo de estrutura cristalina tetragonal, 99,5% de SiO<sub>2</sub> e resina de polimetacrilato, denominado Motema-AC. Os componentes eram misturados e compactados com vibradores e o endurecimento se dava em uma hora.

Em 6 de maio de 1980, foi fabricada a primeira fresadora cuja base era constituída de ambos materiais, ferro fundido e Motema-AC. Foram realizados ensaios de vibrações na peça antes e após o lançamento do Motema-AC. Foi comprovada uma absorção 6 vezes maior e uma melhora na estabilidade térmica após o emprego de 2,10 toneladas de Motema-AC. A frequência natural estimada passou de 115 Hz para 195 Hz e de 150 Hz para 232 Hz. A amplitude que apresentou um valor de 10 µm reduziu para 1 µm após a aplicação do Motema-AC (Koblischek, 1987).

Em 1983 foram produzidas duas bases de máquina de igual peso, uma composta de ferro fundido e outra de Motema-AC. As frequências naturais das bases foram determinadas e são apresentadas na tabela 2.2. Verificou-se que a principal vantagem apresentada pela base polimérica é a não ocorrência de ponto de ressonância crítico na principal área de excitação da peça (Koblischek, 1991).

Tabela 2.2: Frequências naturais das bases de ferro fundido e Motema-AC, Koblischek (1991).

<b>Frequências Naturais (Hz)</b>						
ferro fundido	40,60	52,50	127,20	164,40	248,10	318,90
Motema-AC	32,90	-	-	-	247,40	321,60

A partir daí novas pesquisas foram realizadas no Instituto de Tecnologia de Darmstadt, e fabricadas bases de fresadoras de alta velocidade cuja geometria é mostrada na figura 2.1. Estas bases eram compostas de diferentes materiais: resina de epóxi, resina de poliéster insaturado e Motema-AC. O comportamento dinâmico foi analisado através do espectro de frequências obtido a partir da análise modal das bases numa faixa de frequência de 0 Hz a 500 Hz. A tabela 2.3 mostra que a quarta frequência do Motema-AC está acima de 500 Hz, e a tabela 2.4 apresenta os resultados do fator de amortecimento (Koblischek, 1987).

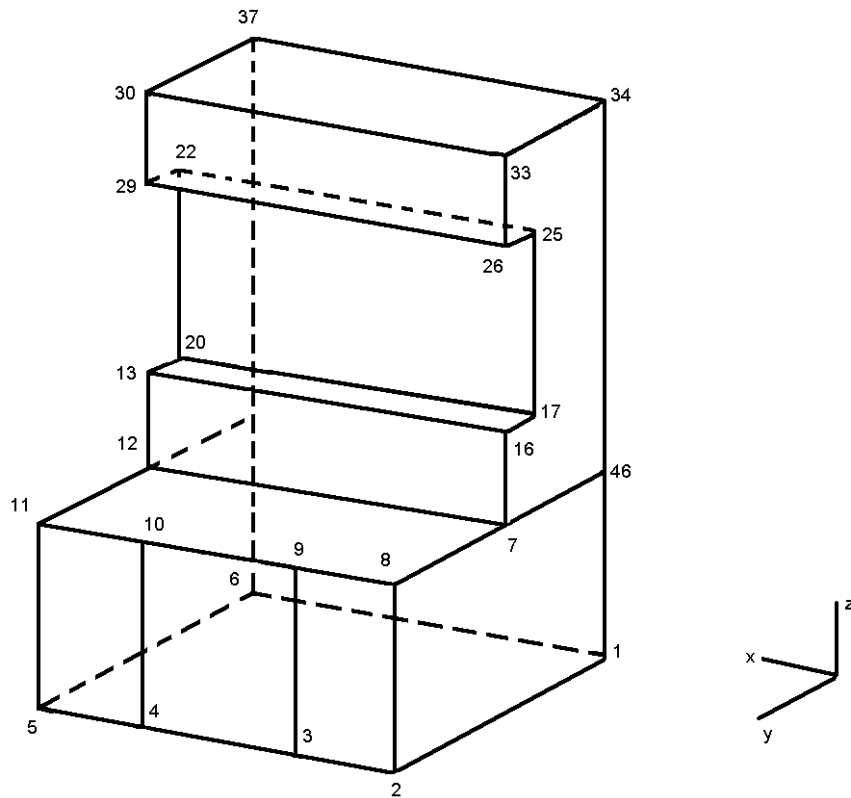


Figura 2.1: Estrutura de uma base de máquina fresadora (Koblischek, 1991).

Tabela 2.3: Frequências naturais de 0 a 500 Hz, Koblischek (1991).

<b>Frequências Naturais (Hz)</b>				
<b>BASES</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
resina de epóxi	202,5	249,1	383,8	474,5
resina de poliéster insaturado	208,8	252,7	404,8	460,8
Motema-AC	217,2	265,8	412,9	-

Tabela 2.4: Fator de amortecimento para os diferentes materiais, Koblischek (1991).

<b>Fator de Amortecimento (%)</b>	
ferro fundido	1
resina de epóxi	4
resina de poliéster insaturado	6
Motema-AC	10



Koblischek (1991) verificou a influência da dimensão máxima do agregado na resistência à fadiga do CP. Realizado o ensaio de flexão com carregamento cíclico a uma frequência de 5 Hz e 2 milhões de ciclos de carga foi verificado que os agregados absorvem os esforços solicitantes, e que os mesmos devem possuir dimensão máxima característica de 8 mm, pois acima deste valor observa-se a ocorrência de um aumento de fissuração nas partes da máquina dinamicamente solicitadas. Pode-se comprovar que o limite de resistência à fadiga não depende da matriz da argamassa, que é composta de areia, calcita e resina, mas, da granulometria do agregado graúdo presente mistura. Koblischek sugere ainda utilizar a parábola de FULLER para se ter uma granulometria contínua.

Yamauchi e Yokoyama (1983) estudaram o fator de amortecimento de vários protótipos moldados com resina polimérica misturada com grãos de ferrita de 1  $\mu$ m de diâmetro. Foram produzidos dois materiais com densidades diferentes 3500 kg/m<sup>3</sup>, denominado material 1, e 2200 kg/m<sup>3</sup>, material 2. O material 1 possui alta rigidez e o material 2 excelente capacidade de amortecimento apresentando um decremento logarítmico de 0,6 a 1,1 e módulo de elasticidade de 2,0 MPa, sendo originalmente desenvolvido para absorver vibrações em máquinas. As características mecânicas destes materiais são apresentadas na tabela 2.5:

Tabela 2.5: Propriedades mecânicas dos materiais poliméricos (Yamauchi e Yokoyama, 1983).

<b>Propriedades</b>	<b>Material 1</b>	<b>Material 2</b>
resistência à compressão (MPa)	150	30
resistência à tração na flexão (MPa)	30	-
módulo de elasticidade (GPa)	30	2
decremento logarítmico	0,04 a 0,06	0,6 a 1,1

O material 1 foi inserido, na forma de argamassa, numa base de concreto de um aparelho de ar condicionado que pesa 13 toneladas, como mostra a figura 2.2. Nos pontos 1 e 2 indicados na figura 2.2, foram medidas as amplitudes geradas pelas excitações mecânicas, provenientes do funcionamento do equipamento, que são apresentadas na figura 2.3. Verificou-se que, para a maioria das frequências indicadas, a amplitude medida no ponto 2 é menor que a medida no ponto 1, principalmente a frequência de 50 Hz, onde a amplitude corresponde a 1/3 do valor da amplitude medida no ponto 1.

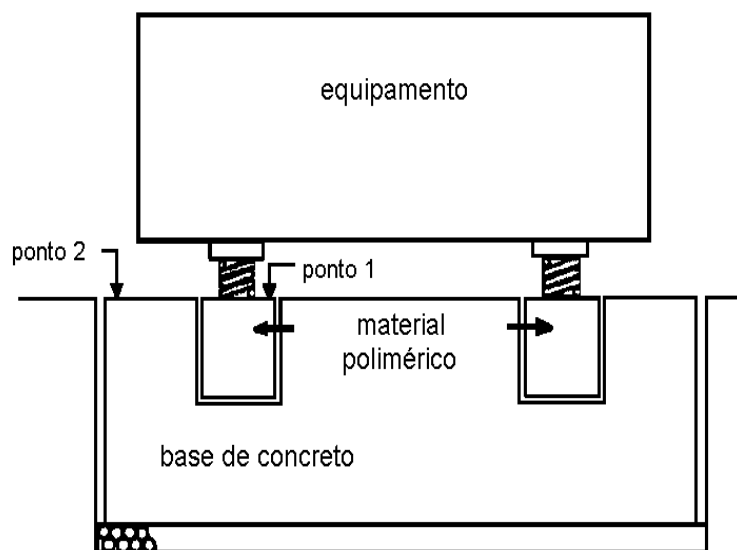


Figura 2.2: Montagem da base composta de material 1 (Yamauchi e Yokoyama, 1983).

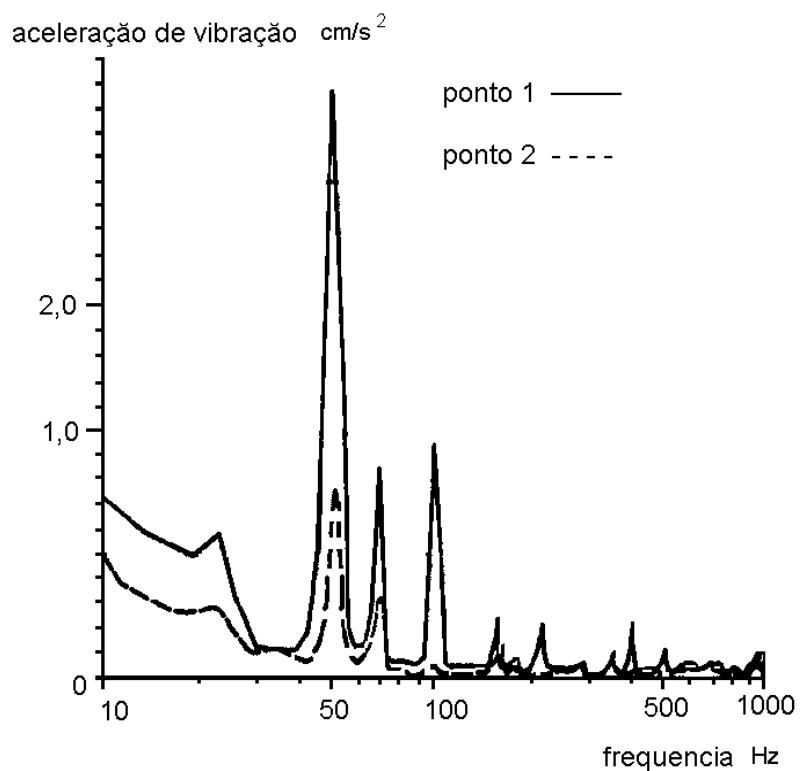


Figura 2.3: Amplitude de aceleração para a vibração mecânica gerada nos pontos 1 e 2 (Yamauchi e Yokoyama, 1983).

A substituição dos materiais tradicionais pelo concreto à base de epóxi misturado com granito, na fabricação de bases de máquinas-ferramenta, foi também feita por Kreienbühl (1991). Foi verificado que o processo de produção da peça de concreto polimérico apresentou um custo de 30 % menor que o da base de ferro fundido. A capacidade de amortecimento do granito epóxico foi de 8 a 10 vezes maior que do ferro fundido e aço soldado. Em consequência da maior capacidade de amortecimento do material polimérico, verificou-se melhor qualidade das superfícies usinadas e aumento de 30% do tempo de vida útil da máquina-ferramenta. Segundo Kreienbühl (1991) as bases devem absorver as vibrações geradas pelas máquinas ou aquelas induzidas por fontes externas. A estabilidade dinâmica dos componentes das máquinas não é determinada pelas suas resistências e massas, mas pela razão rigidez-peso. As bases de concreto polimérico apresentam maior relação rigidez-peso comparada com as de ferro fundido, permitindo às máquinas-ferramenta produzirem peças com maior grau de precisão e repetibilidade. Além das vantagens apresentadas a energia consumida pelo material concreto polimérico representa 1/5 do valor requerido para o ferro fundido (Kreienbühl, 1991).

Vipulanandam et al. (1988) pesquisaram a influência da temperatura no comportamento mecânico dos concretos poliméricos de epóxi e de resina poliéster insaturado. Foram moldados corpos-de-prova de 160 x 15 x 15 mm para a realização dos ensaios à flexão e corpos-de-prova cilíndricos de 38 mm de diâmetro para os ensaios à compressão. Verificou-se que a propriedade mais afetada pela temperatura foi a resistência à tração na flexão, conforme descrito na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Propriedades dos polímeros epóxi e poliéster (Vipulanandam et al., 1988).

temperatura (°C)	Epóxi		Poliéster	
	22	80	22	110
resistência à compressão (MPa)	62	40,7	35,2	33,8
resistência à tração na flexão (MPa)	126	42,8	88,1	60,3
módulo de elasticidade de compressão (GPa)	25	1,4	1,2	1,0
módulo de elasticidade de flexão (GPa)	3,3	0,3	3,2	1,9

Numa pesquisa realizada por Kane (1991), foi estudado o emprego do concreto polimérico na moldagem de componentes de máquinas-ferramenta. Foram construídas vigas, de ferro fundido e concreto polimérico, de 1,0 m de comprimento e 20 cm<sup>2</sup> de seção transversal. Num primeiro momento foram produzidas vigas de mesmo peso de ambos materiais. Verificou-se que a densidade do concreto polimérico era igual a 0,09 lb/in<sup>3</sup> (2491 kg/m<sup>3</sup>) e representava 1/3 do valor apresentado pelo ferro fundido que era 0,26 lb/in<sup>3</sup> (7197 kg/m<sup>3</sup>). Dessa forma a seção transversal da peça de polímero poderia ser aumentada em 2,9 vezes para que ambas as peças atingissem igual peso. Assim sendo o momento de inércia da viga polimérica seria majorado 3,06 vezes e o deslocamento vertical máximo corresponderia a apenas 1/3 do valor gerado pelo ferro fundido.

Num segundo estudo foram moldadas vigas de polímero e de ferro fundido de iguais rigidezes. Verificou-se que, para mesma rigidez, o peso da peça de ferro fundido era 75% maior que da viga de concreto polimérico e o valor do deslocamento vertical máximo obtido foi o mesmo para ambas as peças.

Conclui-se que o concreto polimérico apresenta melhor desempenho que o ferro fundido nas duas situações apresentadas acima, ao possuir menor deslocamento vertical máximo para igual peso da peça de ferro fundido e ao possuir menor peso para igual rigidez da mesma.

O fator de amortecimento de vibração de vigas poliméricas com diferentes teores de epóxi, com 1,0 m de comprimento por 7,62 cm<sup>2</sup> de seção transversal também foram estudadas por Kane (1991). As vigas foram suspensas por cintas elásticas para simular a condição livre-livre de flexão. As vigas foram excitadas utilizando-se um martelo de impacto e os deslocamentos foram obtidos colocando-se acelerômetros sobre as vigas, localizados em vários pontos pré-estabelecidos. As propriedades modais das vigas foram obtidas utilizando-se um ampla faixa de frequência. A partir do primeiro modo de vibração axial e transversal, o módulo de elasticidade dinâmico de flexão pôde ser determinado. O fator de amortecimento específico foi determinado através do decremento logarítmico. As propriedades dinâmicas e as características de amortecimento foram avaliadas experimentalmente e são apresentadas na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Fator de amortecimento de vibração em função do teor de resina epóxi (Kane, 1991).

teor de epóxi (%)	densidade (lbs/in <sup>3</sup> )	1º modo de frequência axial (Hz)	módulo de elasticidade dinâmico axial (psi)	1º modo de frequência transversal (Hz)	módulo de elasticidade dinâmico transversal (psi)	fator de amortecimento $\zeta \cong \frac{D}{2\pi}$
5,7	0,079	2.180	4,72x10 <sup>6</sup>	384	4,31x10 <sup>6</sup>	0,004
6,5	0,094	2.240	6,23x10 <sup>6</sup>	384	5,65x10 <sup>6</sup>	0,004
7,0	0,092	2.260	5,51x10 <sup>6</sup>	376	5,08x10 <sup>6</sup>	0,005
7,8	0,089	2.280	5,15x10 <sup>6</sup>	360	4,80x10 <sup>6</sup>	0,003
9,1	0,089	2.160	5,33x10 <sup>6</sup>	376	4,85x10 <sup>6</sup>	0,003
10,7	0,088	2.080	5,12x10 <sup>6</sup>	376	4,76x10 <sup>6</sup>	0,003
ferro fundido	0,260	2.160	19,50x10 <sup>6</sup>	268	20,43x10 <sup>6</sup>	0,0003

1 lbs/in<sup>3</sup> = 27680 kg/m<sup>3</sup>

1 psi = 6895 Pa

As equações usadas para calcular o módulo dinâmico axial e transversal foram as seguintes:

- a frequência de vibração longitudinal para as vigas prismáticas na condição livre-livre foi obtida pela expressão:

$$f_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho_m}} \quad (2.1)$$

onde:

$f_1$  = frequência do 1º modo, Hz

$l$  = comprimento do corpo de prova, in

$E$  = módulo de elasticidade, psi

$\rho_m$  = densidade, lb/in<sup>3</sup>

$\rho_f$  = densidade, lb/in<sup>3</sup>

$\rho_m = \rho_f / g = \rho_f / 386 \text{ in/s}^2$

$g$  = aceleração da gravidade

e a velocidade relacionada a frequência foi dada por:

$$v = 2lf_1 \quad (2.2)$$

onde:

$v$  = velocidade, ft/s (0,3048 m/s)

Resolvendo para o módulo dinâmico axial, onde:

$$E = (2lf_1)^2 \rho_m = v^2 \rho_m \quad (2.3)$$

- para a vibração transversal de uma viga na condição livre-livre a frequência relacionada ao 1º modo foi calculada pela equação:

$$\omega = 2\pi f_1 = \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} \quad (2.4)$$

onde para o 1º modo livre-livre a condição é:  $\alpha = 22,40$

Resolvendo para o módulo dinâmico:

$$E = \frac{f_1^2 l^3}{12,7097} * \frac{W}{Ig} \quad (2.5)$$

ou

$$E = \frac{f_1^2 l^3 W}{4905,944I} \quad (2.6)$$

onde:

$W$  = peso específico, lbs

$I$  = momento de inércia, in.<sup>4</sup>

Os resultados da tabela 2.7 indicam que existe uma relação entre o módulo dinâmico e a densidade do material para o concreto polimérico com 5,7% e 10,7% de epóxi. A comparação dos módulos dinâmicos axiais com os módulos elásticos estáticos testados de acordo com a ASTM C-469 mostraram resultados muito semelhantes o que não ocorreu com os resultados experimentais dos módulos dinâmicos transversais.

- o fator de amortecimento específico foi calculado pelo decremento logarítmico:

$$D = \frac{1}{n} \log_e \frac{A_1}{A_n} \quad (2.7)$$

onde:

$n$  = número dos ciclos de amplitude;

$A_1$  = amplitude do 1º ciclo;

$A_n$  = amplitude do enésimo ciclo;

Para pequenos valores de decremento o fator de amortecimento do material está relacionado com o decremento logarítmico através da aproximação abaixo:

$$\zeta \cong \frac{D}{2\pi} \quad (2.8)$$

O coeficiente de amortecimento específico para as vigas de concreto polimérico e ferro fundido ensaiadas dinamicamente foram determinadas simultaneamente com os dados dos módulos dinâmicos. Os resultados indicam que houve uma atenuação na amplitude de vibração 10 vezes maior em todas as peças de concreto polimérico em relação às de ferro fundido.

Paturoev et al. (1987) estudaram as propriedades de amortecimento de vários materiais como aço, madeira (pinho), rocha (diabásio) comparando-as com as do concreto de cimento, concreto de enxofre, concreto polimérico de metilmetacrilato, concreto polimérico de epóxi, e concreto polimérico de furano-epóxi. A tabela 2.8 mostra os valores obtidos para a frequência natural, fator de amortecimento e amplitude da frequência de ressonância. Os resultados apresentados na tabela mostram que o concreto polimérico de furano-epóxi apresenta fator de amortecimento 2 a 2,5 vezes maior que o concreto de epóxi, 4,5 a 5 vezes maior que os concretos de cimento e enxofre, 11 a 13 vezes maior que a rocha diabásio e quase 80 vezes maior que o aço. Paturoev et al (1987) concluíram que os concretos poliméricos apresentam maior fator de amortecimento que os demais materiais geralmente empregados na indústria de máquinas-ferramenta.

Tabela 2.8: Características dinâmicas dos materiais (Patureov et al., 1987).

Materiais	Características		
	freqüência natural (Hz)	fator de amortecimento	amplitude na freqüência de ressonância*
concreto polimérico composto de furano-epóxi	973,40	0,067	12,50
concreto polimérico de epóxi	903,00	0,027	31,00
concreto polimérico de metilmetacrilato	890,10	0,063	13,30
concreto de cimento	955,70	0,012	69,00
concreto de enxofre	1134,20	0,011	76,00
madeira	1290,00	0,023	36,30
diabásio	1589,00	0,005	167,20
aço	1277,60	0,0008	1000,00

\* em unidades relativas. A amplitude para o aço é adotada como 1000 unidades.

Yeon et al. (1991) determinaram algumas propriedades mecânicas de cinco tipos diferentes de concretos poliméricos à base de: resina de poliéster, metilmetacrilato, poliésteramida, epóxi e éster de vinila. A composição destes concretos era 10% de polímero, 8% de filer, 41% de brita e 41% de areia. Foi também produzido um concreto de referência de cimento portland de alta resistência inicial, relação  $\frac{a}{c} = 0,40$ , e brita de dimensão máxima característica 9,5 mm, cujos módulos de finura eram 5,86 para a brita e 2,80 para a areia. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade e módulo de ruptura utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos de 76,20 x 152,40 mm e prismáticos de 76,20 x 76,20 x 304,8 mm cujos resultados são apresentados na tabela 2.9. As propriedades do concreto de epóxi foram superiores comparando com as resultantes pelos demais materiais.

Tabela 2.9: Características mecânicas dos concretos poliméricos (Yeon et al.,1991).

concretos	resistência à compressão (MPa)	resistência à tração indireta (MPa)	módulo de ruptura (MPa)	módulo de elasticidade (GPa)
referência	42,60	4,18	4,43	31,00
poliéster	63,90	7,69	13,17	18,10
metilmetacrilato	71,00	8,49	13,85	22,70
poliésteramida	57,20	7,03	14,42	19,40
epóxi	76,00	9,84	16,19	23,00
éster de vinila	67,40	7,60	13,91	21,20



## 2.2 – Argamassa Armada

Hanai (1992) define argamassa como um material que resulta de uma mistura homogênea de cimento portland, água e agregado miúdo, podendo eventualmente conter adições que melhorem suas propriedades. A argamassa armada é formada por armadura difusa, ou armadura discreta. A armadura difusa é constituída de telas de aço e tem como funções principais resistir aos esforços de tração, limitar a abertura de fissuras e favorecer o surgimento de uma configuração de fissuras pouco espaçadas. A armadura discreta é constituída de fios e barras de aço de pequeno diâmetro como as fibras de aço. Também são produzidas fibras de plástico, vidro e materiais naturais que são misturadas à argamassa e aplicadas por projeção ou preenchimento de fôrmas (Hanai, 1992).

Rahman e seus colaboradores utilizaram argamassa armada com de tela de aço e argamassa reforçada com fibras de aço na fabricação de bases de máquinas-ferramenta. A argamassa citada era auto adensável e oferecia vantagens como a facilidade no modo de produção das peças e melhor comportamento dinâmico que os materiais tradicionais empregados, o aço e ferro fundido (Rahman et al., 1987). A rigidez e as características dinâmicas destas bases foram comparadas com bases idênticas feitas de ferro fundido. Foram produzidas peças de 840 mm de comprimento, 120 mm de altura e 125 mm de espessura, de argamassa de traço 1:2, relação a/c = 0,40 e adição de superplastificante, reforçada com volume de 1%, 2% e 3% de fibras de aço. Foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos 150 x 100 mm e três prismáticos 500 x 100 x 100 mm, e após 7 dias de cura foram ensaiados à compressão e à tração, cujos resultados são apresentados na tabela 2.10. As bases foram ensaiadas estaticamente através do ensaio de flexão e determinadas as cargas de primeira fissura e de ruptura, e a rigidez como apresenta a tabela 2.11.

Tabela 2.10: Ensaio de caracterização (Rahman e Mansur, 1992).

<b>Bases</b>	<b>Volume de fibras (%)</b>	<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
FB	0	6,3	56,90
B-1	1	6,4	45,10
B-2	2	9,0	45,10
B-3 a B-6	3	11,0	52,60

Tabela 2.11: Resultados dos ensaios estáticos e de fadiga (Rahman e Mansur, 1992).

bases	carga de primeira fissura (kN)	carga de ruptura (kN)	flecha correspondente à carga de primeira fissura (mm)	flecha correspondente à carga de ruptura (mm)	rigidez (kN/mm)
FB	8,0	30,0	0,30	4,02	29,10
B-1	7,0	26,3	0,31	5,54	22,67
B-2	8,7	28,0	0,33	2,73	28,08
B-3	9,2	29,6	0,38	2,53	29,80
B-4	9,0	28,4	0,28	2,02	32,25
B-5	8,0	29,7	0,22	3,39	36,36
B-6	7,0	29,6	0,20	2,07	35,35

O ensaio dinâmico foi realizado com a finalidade de se determinar as frequências naturais e taxas de amortecimento para o primeiro e o segundo modo de vibração. As bases foram suspensas por um cabo flexível, de modo a deixá-las na condição livre-livre. O impacto era transmitido às peças por um martelo de impacto e os sinais de resposta eram lidos por um software de análise modal. Os resultados do ensaio constam da tabela 2.12 e indicam que as bases contendo 3% de fibras de aço são dimensionalmente mais estáveis, com resistências e rigidezes adequadas, assim como possuem as melhores características dinâmicas.

Tabela 2.12: Ensaios dinâmicos (Rahman e Mansur, 1992).

modos de vibrar	propriedades	bases			
		FB	B-1	B-2	B-3
1° flexão vertical	*Freq. [Hz]	594	575	570	593
	**FAM (%)	0,97	1,07	1,01	1,01
2° flexão vertical	*Freq. [Hz]	1533	1486	1483	1526
	**FAM (%)	0,66	0,85	0,69	0,75
1° flexão horizontal	*Freq. [Hz]	623	607	607	622
	**FAM (%)	0,97	1,06	1,04	1,07
2° flexão horizontal	*Freq. [Hz]	1477	1447	446	1490
	**FAM (%)	0,87	0,82	0,77	0,88
1° torção	*Freq. [Hz]	982	928	54	986
	**FAM (%)	0,89	1,03	1,04	0,97
2° torção	*Freq. [Hz]	1933	1914	877	1944
	**FAM (%)	0,70	0,75	0,76	0,77

\* Freq. - Frequência natural

\*\*FAM - Fator de amortecimento modal

### 2.3 – Compósitos com fibras de aço

O ACI 544.3R (1993) relata que os compósitos reforçados com fibras de aço utilizados em aplicações estruturais têm a função de inibir a fissuração, aumentar a resistência ao impacto ou carregamento dinâmico e resistir a desintegração do material. Em elementos estruturais onde ocorrem tensões de tração axial ou flexão, como vigas, colunas, lajes suspensas, a armadura de aço deve ser capaz de resistir às tensões de tração. Já em aplicações onde a presença de armadura contínua não é essencial para a segurança e integridade da estrutura, isto é, em pavimentos e revestimentos, o aumento da resistência à flexão associado com as fibras é usada para reduzir a espessura das seções e melhorar o desempenho mecânico. As fibras de aço vem sendo empregadas em compósitos com funções estruturais e não estruturais, como:

- pisos industriais (Vandenberghe e Nemegeer, 1985; Pinto Júnior e Moraes, 1996);
- aeroportos, pavimentos rodoviários (Johnston, 1984);
- concreto projetado para revestimento de túneis (Figueiredo, 1997; Morgan, 1988);
- estruturas hidráulicas (Aguado, Aguilló e Canovas, 1996);
- piso de pontes (Melamed, 1985);
- estruturas de cascas esbeltas (Haber, 1986);
- estruturas resistentes à explosão (Henager, 1983).

Segundo ASTM A 820 (1990) as fibras de aço são definidas como segmentos lisos ou deformados, obtidos através do corte de arames deformados a frio ou do corte de chapas de aço, ou ainda extraídos de metais fundidos ou fresados, como também de fitas de aço residuais do processo de obtenção de lâ de aço, devendo ser suficientemente pequenas para se dispersarem de forma aleatória em uma mistura de concreto.

As fibras possuem, em geral, comprimentos que variam entre 12,7 mm e 63,5 mm e diâmetros limitados de 0,45 mm a 1 mm, com formas circulares, ovais e retangulares (ACI 544.3R, 1993). Segundo Mehta e Monteiro (1994) fibras de aço redondas tem diâmetros na faixa de 0,25 a 0,75 mm, fibras de aço achatadas tem seção transversal variando de 0,15 a 0,40 mm de espessura por 0,25 a 0,9 mm de largura e fibras de aço onduladas e deformadas são disponíveis em todo comprimento. Para facilitar o manuseio e a mistura são também fabricadas fibras coladas em feixes de 10 a 30, com cola solúvel em água.

A figura 2.4 mostra as diferentes geometrias que os arranjos das fibras podem assumir nos compósitos em função da forma das fibras individuais e da sua dispersão na matriz. De acordo com a figura 2.4 os arranjos das fibras classificam-se em: arranjos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, podendo ser contínuo com fibras longas (a, c) ou discreto com fibras curtas (< 50 mm) (b, d) (Bentur e Mindess, 1990).

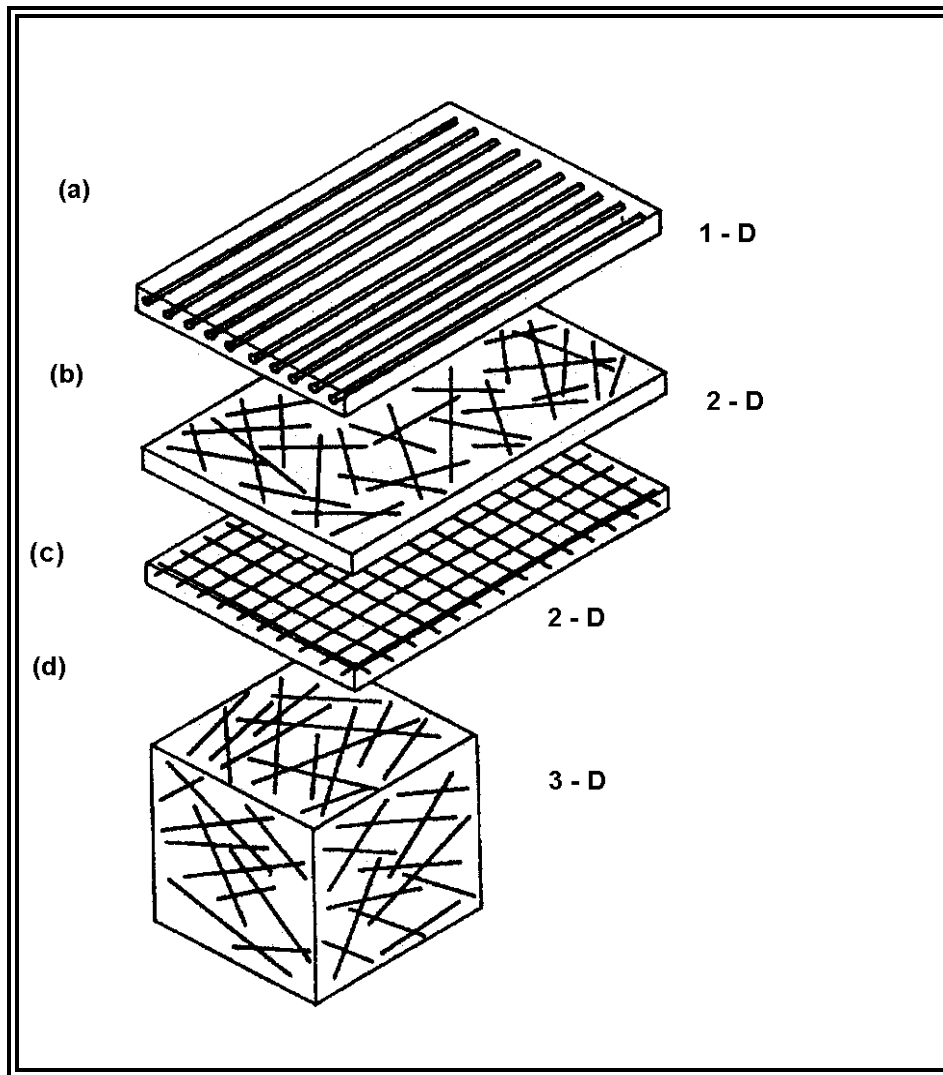


Figura 2.4: Arranjos das fibras nos compósitos (Bentur e Mindess, 1990).

A uniformidade da distribuição das fibras nos compósitos é raramente encontrada na prática e depende das etapas da mistura e adensamento, figura 2.5 (Bentur e Mindess, 1990).

Segundo Pinto Júnior e Moraes (1996), as fibras de aço são caracterizadas pela forma geométrica, resistência à tração e fator de forma (aspect ratio) definido pelo quociente entre o

comprimento da fibra e seu diâmetro (ou diâmetro equivalente no caso de fibras de seção transversal não circular).

A porcentagem de fibras de aço utilizada no concreto é determinada de acordo com a finalidade a qual o material é destinado. Pinto Júnior e Moraes (1996) sugerem o emprego de teores entre 20 a 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço para os concretos aplicados em pavimentos industriais. Segundo o ACI 544.3R (1993) a quantidade usual de fibras de aço no concreto de peso normal, varia de 0,25% (20 kg/m<sup>3</sup>) a 2% (157 kg/m<sup>3</sup>) sobre o volume de concreto (taxa volumétrica).

Estes valores são limitados pela trabalhabilidade do material sendo que, a quantidade de fibras ideal depende das condições de moldagem, do grau de congestionamento de armadura convencional, do tipo e forma das fibras, do fator de forma e da quantidade de aditivos redutores de água empregados nos compósitos (ACI 544.3R, 1993).



Figura 2.5: Distribuição não uniforme das fibras de aço no concreto, observado por raios X (Bentur e Mindess, 1990).

### 2.3.1 – Trabalhabilidade dos compósitos reforçados com fibras

A trabalhabilidade dos compósitos de cimento portland é a propriedade que determina a consistência da mistura no estado fresco.

A adição de fibras de aço nas argamassas e concretos reduz a trabalhabilidade e segundo Edgington et al (1974) a perda desta propriedade é proporcional ao aumento da dimensão máxima característica e quantidade de agregados na mistura. Este efeito é mais acentuado quando são empregados agregados de dimensão maior que 5 mm, e minimizado quando são utilizados grãos de agregados menores que 5 mm. Para que seja melhorada a trabalhabilidade dos compósitos é indicado utilizar maior porcentagem de agregados miúdos em relação à agregados graúdos e substituir parte da quantidade de cimento portland pelas adições minerais como as cinzas volantes e a sílica ativa.

Segundo o ACI 544.4R (1988) um aumento do fator de forma prejudicaria a trabalhabilidade da mistura. A solução é utilizar fibras com superfícies onduladas e ganchos nas extremidades, as quais possuem fator de forma menor, e oferece maior resistência ao processo de arrancamento.

Muitas pesquisas têm mostrado que o uso de fibras com fator de forma maior que 100 causa trabalhabilidade inadequada da mistura devido à distribuição não uniforme das fibras na matriz de cimento portland (ACI 544.4R, 1988). Swamy e Mangat (1974) mostram que fibras de aço com fator de forma maior que 100, produzem o fenômeno conhecido como “empelotamento” ou “ninho”. A tabela 2.13 mostra algumas composições recomendadas pelo ACI 544.1R (1982), para argamassas e concretos reforçados com fibras de aço, contendo ar incorporado.

Tabela 2.13: Dosagem para os compósitos de cimento reforçados com fibras de aço (ACI 544.1R, 1982).

<b>materiais</b>	<b>argamassa</b>	<b>Dimensão máxima do agregado 9,5 mm</b>	<b>Dimensão máxima do agregado 19 mm</b>
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	415-712	356-593	297-534
Relação a/c	0,30-0,45	0,35-0,45	0,40-0,50
Porcentagem de agregados miúdos para graúdos	100	45-60	45-55
Teor de ar incorporado (%)	7-10	4-7	4-6
Teor de fibra de aço deformada (% volume)	0,5-1,0	0,4-0,9	0,3-0,8
Teor de fibra de aço lisa (% volume)	1,0-2,0	0,9-1,8	0,8-1,6

### 2.3.2 – Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras

As propriedades mecânicas dos concretos e argamassas reforçados com fibras são influenciadas pelos seguintes fatores (Bentur e Mindess, 1990):

- tipo, geometria, fator de forma, volume, orientação e distribuição das fibras;
- resistência da matriz da pasta de cimento portland e dimensão máxima do agregado;
- tamanho, geometria e processo de moldagem dos corpos-de-prova.

De acordo com o relatório do Comitê 544 do ACI (ACI 544.3R, 1993) a adição de fibras de aço nos compósitos de cimento portland influenciam significativamente muitas das propriedades mecânicas das argamassas e concretos em todos os modos de ruptura (Gopalaratnam e Shah, 1987 a) especialmente aqueles que induzem a fadiga e tensões de tração.

Uma análise da interface fibra-matriz feita por Bentur e Mindess, 1990, revela que os compósitos reforçados com fibras são formados pelas fases: agregados, pasta de cimento e zona de transição. A zona de transição abrange a região que circunda a fibra de aço, apresentando uma microestrutura consideravelmente diferente da matriz da pasta de cimento. Estudos realizados com pastas de cimento reforçadas com fibras de aço mostram que a zona de transição da pasta endurecida é rica em cristais em forma de placa de hidróxido de cálcio (CH) que se formam em camadas orientadas perpendicularmente à superfície das fibras. A natureza porosa desta região é proveniente da formação de poros entre os silicatos de cálcio hidratados (CSH) e a etringita (figura 2.6), originando uma zona de transição frágil e suscetível à propagação preferencial das fissuras ao longo da interface fibra-matriz.

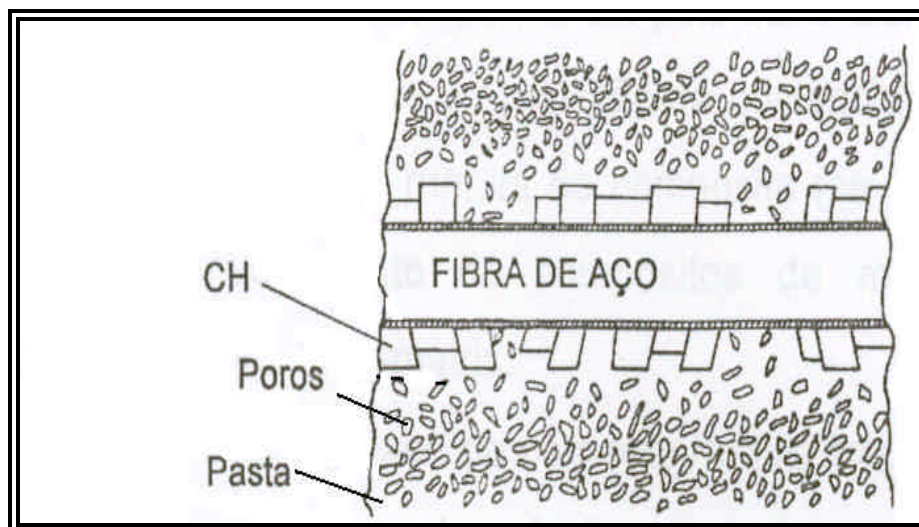


Figura 2.6: Zona de transição nos compósitos de cimento reforçados com fibras de aço (Bentur e Mindess, 1990).

Quando o material é submetido às cargas externas inicia-se um processo de crescimento das microfissuras que, rapidamente se propagam, se unem a outras e se transformam em fissuras cada vez maiores. Com o aumento da concentração de tensões o concreto pleno (sem fibras), cuja deformação plástica é baixa, é levado à ruptura frágil. A adição de fibra de aço aos compósitos tem a finalidade de interceptar as fissuras minimizando o acúmulo de tensões, absorver parte da energia responsável pela rápida propagação das fissuras e conseqüentemente aumentar a deformação plástica do material. As fibras passam a atuar como uma ponte de transferência de tensão entre as duas partes da matriz separada pela fissura (Figueiredo, 1997). As fibras inibem o início e a propagação das fissuras aumentando a tensão correspondente à “primeira fissura da matriz”.

Para que sejam desenvolvidos compósitos de melhor desempenho, através da modificação da interface matriz-fibra, é necessária uma maior compreensão do mecanismo responsável pela transferência de tensões da matriz para as fibras a qual permite a previsão da curva tensão-deformação do compósito e seu modo de ruptura (dúctil ou frágil).

A interação fibra-matriz tem sido estudada através de modelos e tratamentos analíticos desenvolvidos para analisar a transferência de tensões da matriz para as fibras pela tensão de cisalhamento que se desenvolve transversalmente a interface matriz-fibra. Estes modelos simulam a interação fibra-matriz pelo arrancamento das fibras, desconsiderando que existe uma região que envolve as fibras que é microscopicamente diferente da pasta de cimento, a chamada zona de transição (figura 2.7) (Bentur e Mindess, 1990).

Bentur e Mindess (1990) sugerem que os efeitos de transferência de tensões em compósitos de matriz frágil devem ser considerados para ambos os estados de “pré-fissuração” e “pós-fissuração” pois são muito diferentes. No estado de “pré-fissuração” a transferência de tensão é predominantemente elástica e a deformação da interface é a mesma para a matriz e a fibra. A tensão desenvolvida na interface é a tensão de cisalhamento, de natureza elástica, e deve ser considerada como o principal mecanismo para predizer o limite de proporcionalidade da tensão correspondente à primeira fissura.

No estado de “pós-fissuração” ocorre a ruptura da aderência entre a fibra e a matriz e o processo de transferência de tensões é controlado pela tensão de atrito. A tensão de atrito que se desenvolve é uma tensão de cisalhamento considerada uniformemente distribuída ao longo da



interface matriz-fibra. Propriedades tais como resistência última e deformação dos compósitos são controladas por este modo de transferência de tensão.

A transição da transferência da tensão elástica para a tensão de atrito ocorre quando as tensões de cisalhamento (tangencial) na interface excede a resistência de aderência por adesão entre a fibra e a matriz ( $\tau_{au}$ ). Aumentando-se o carregamento a ruptura da adesão entre a fibra e a matriz e as tensões de cisalhamento de atrito passam a atuar na interface até atingir a máxima tensão de cisalhamento de atrito ( $\tau_{fu}$ ) onde ocorre o arrancamento total das fibras (figura 2.8).

Para compósitos cuja matriz apresenta alta resistência à tração, a ruptura da adesão ocorre primeiro que a fissuração da matriz, ao contrário do que acontece com compósitos cuja matriz possui baixa resistência à tração nos quais a fissuração da matriz acontece antes da ruptura da adesão entre a fibra e a matriz. O efeito destes mecanismos pode influenciar a forma da curva tensão-deformação.

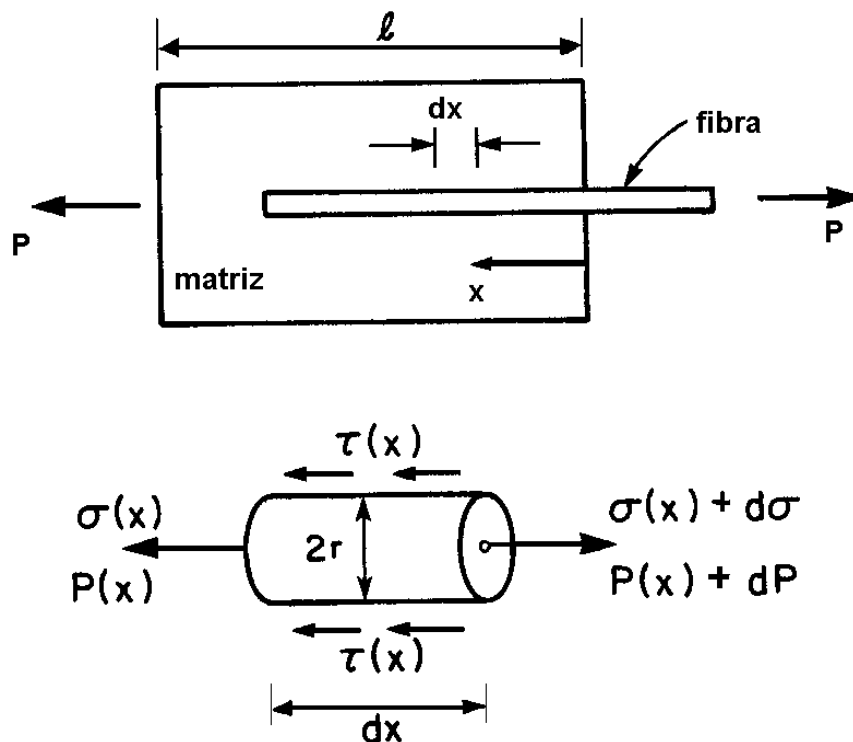


Figura 2.7: Geometria do arrancamento para simular a interação fibra-matriz (Bentur e Mindess, 1990).

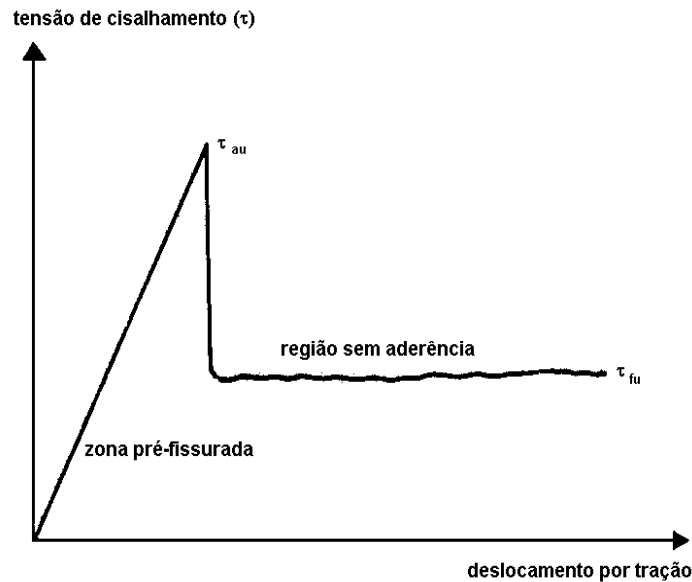


Figura 2.8: Curva de deslocamento por tração com acentuada transição proveniente da transferência de tensão elástica para a tensão de atrito constante (Bentur e Mindess, 1990).

### 2.3.3 – Eficiência das fibras

A eficiência das fibras é controlada pelo comprimento, orientação e aderência da interface fibra-matriz. Estes três fatores não podem ser analisados independentemente, pois de acordo com o comprimento e a orientação das fibras a aderência é grandemente afetada. A eficiência das fibras segundo Bentur e Mindess (1990) influenciam as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias frágeis de acordo com:

- o processo de transferência de tensões da matriz para as fibras;
- efeito de transposição transversal das fissuras pelas fibras na matriz que ocorrem nos estados mais avançados de carregamento.

O comprimento das fibras deve ser analisado com base no processo de transferência de tensões da matriz para as fibras, ou seja, quanto maior a tensão de tração transferida para as fibras maior a eficiência.

É sugerido que a fibra tenha um comprimento crítico  $I_c$  definido como um comprimento mínimo necessário para desenvolver na fibra uma tensão igual à sua resistência (tensão de ruptura). Se o comprimento  $I$  da fibra utilizada é menor que o comprimento mínimo  $I_c$ , a fibra não é suficiente para gerar tensão igual à sua resistência à tração. Se o comprimento  $I$  da fibra excede o  $I_c$  a tensão da fibra alcança a resistência à tração ou ao escoamento, e dessa forma a fibra é eficiente. Laws (1971) descreve que quando o comprimento da fibra é muito maior que o comprimento mínimo ( $I \gg 2 I_c$ ) a ruptura ocorre predominantemente por fratura da fibra, entretanto se as fibras são curtas  $I \ll 2 I_c$  ocorre o arrancamento das fibras antes de ocorrer o desenvolvimento de tensão suficiente para causar a fratura da fibra.

### 2.3.4 – Orientação das fibras

Analisando a orientação das fibras em relação à aplicação das cargas são considerados dois diferentes efeitos: a fibra mantém o ângulo constante ao longo do seu comprimento ou a fibra é flexionada na superfície da fissura devido a sua geometria. No estágio de pré-fissuração a fibra forma um ângulo constante com o plano de aplicação da carga ao longo de todo o seu comprimento, figura 2.9 (a), enquanto no estágio de pós-fissuração o ângulo é variável, figura 2.9 (b).

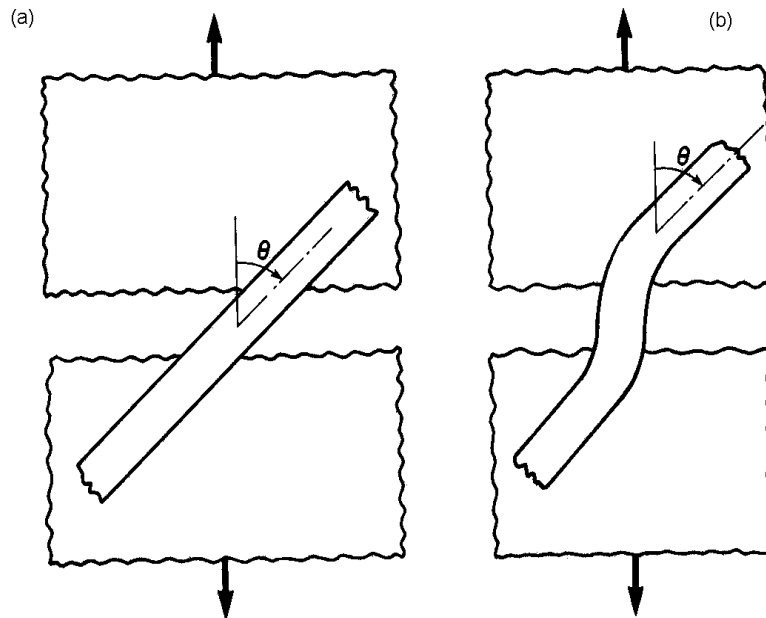


Figura 2.9: Orientação das fibras (a) orientação constante da fibra; (b) flexão da fibra na região da sollicitação da fissura (Bentur e Mindess, 1990).

Krenchel (1974) tratou a eficiência da orientação das fibras de duas maneiras: a primeira se baseia na hipótese de que o compósito está sujeito a deformação somente na direção da aplicação da carga e a segunda hipótese se baseia na deformação que ocorre em outras direções além daquela da aplicação da carga. Para a segunda hipótese o fator de eficiência de orientação das fibras depende da porcentagem do volume de fibras, do coeficiente de Poisson da matriz e da razão entre os módulos elásticos das fibras e da matriz. Laws (1971) relata que a eficiência total depende do efeito conjunto da orientação e comprimento das fibras.

### **2.3.5 – Resistência à compressão**

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a maior contribuição do material reforçado com fibras não é na resistência à compressão, mas na tenacidade à flexão.

Segundo ACI 544.1R, 1982 verificou-se um crescimento de 2,5 vezes para o valor da resistência de primeira fissura na flexão dos concretos com 4% do volume de fibras de aço quando comparado com os concretos não reforçados, obtendo-se pequeno aumento na resistência à compressão. Nas argamassas reforçadas com 3% e 1,5% de fibras de aço a resistência à tração indireta foi respectivamente 2,5 e 2,0 vezes maior que das argamassas sem fibras.

Estudos feitos por Fanella e Naaman (1985) mostram que ocorreu um aumento substancial na deformação de argamassas reforçadas com 1%, 2% e 3% de fibras em relação às argamassas sem fibras (ACI 544.4R, 1988). Analisando as figuras 2.10 e 2.11 verifica-se um aumento da deformação e da resistência à compressão segundo o aumento da quantidade de fibras de aço nas argamassas. Este gráfico mostra o aumento da área sob a curva tensão-deformação com o crescimento da taxa volumétrica de fibras de aço nos compósitos. Este efeito indica uma maior absorção de energia dos compósitos durante a deformação, prevenindo o colapso explosivo do material ao ser solicitado a cargas estáticas.

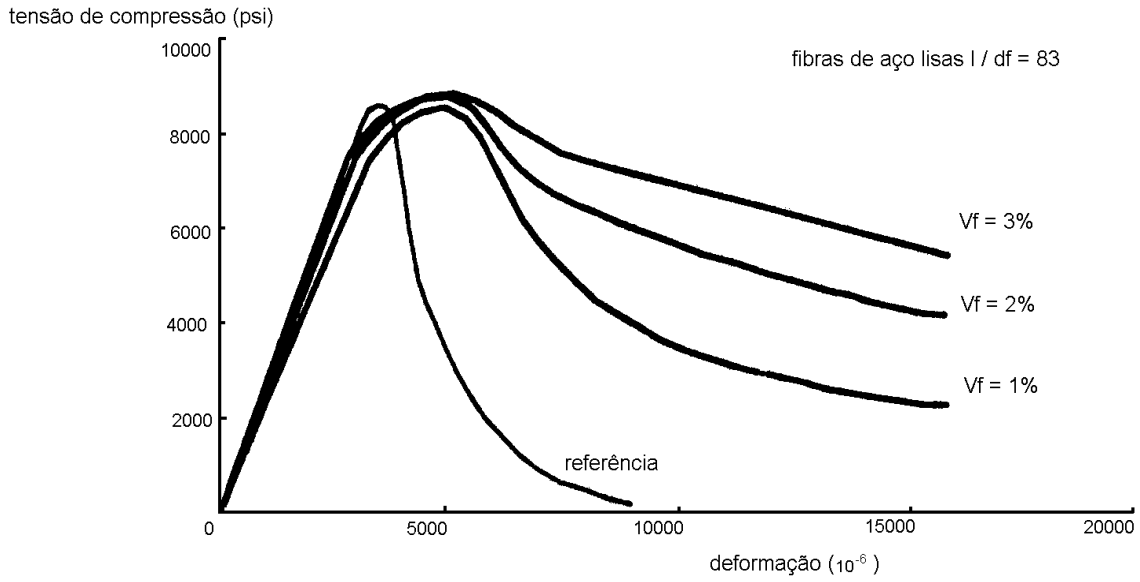


Figura 2.10: Influência da fração volumétrica de fibras na resistência a compressão das argamassas, Fanella e Naaman (1985).

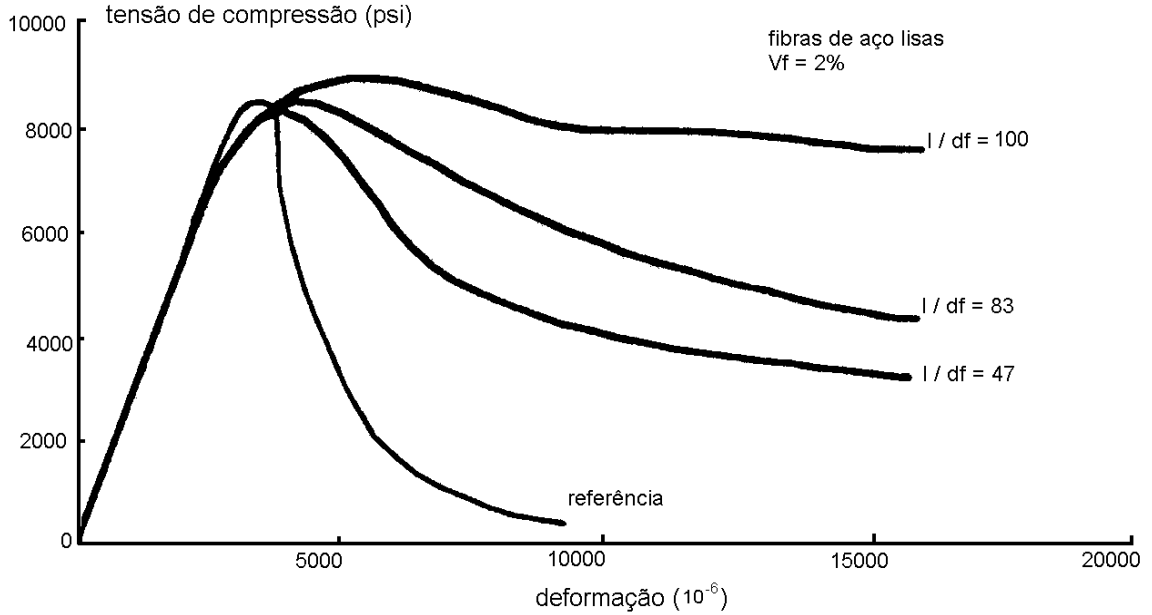


Figura 2.11: Influência do fator de forma na curva tensão-deformação das argamassas, Fanella e Naaman (1985).

Na realização dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos reforçados com fibras, o ACI 544.2R (1989) indica as normas da ASTM C 31, C 39 e C 192, as mesmas utilizadas para o concreto comum.

O ensaio de compressão uniaxial da ASTM C 39-86 correspondente à norma brasileira NBR 5739 determina para este ensaio, a utilização de corpos-de-prova de 150 x 300 mm ou corpos-de-prova de dimensão cuja altura é o dobro do diâmetro.

O método de moldagem de corpos-de-prova cilíndricos estabelecido pela NBR 5738, ASTM C 192-90a e pela BS 1881: Part 110: 1983 é semelhante ao procedimento referente para corpos-de-prova cúbicos. Para o ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos, as superfícies dos topos devem entrar em contato com os pratos da prensa de ensaio. Essas superfícies quando acabadas com a desempenadeira, não são suficientemente lisas e necessitando de uma preparação como o capeamento ou esmerilhamento (ASTM C 31-91).

A vantagem de se utilizar corpos-de-prova cúbicos está na ausência de capeamento como estabelece a norma BS 1881: Part 116: 1983. Os corpos-de-prova cúbicos são ensaiados em posição formando 90° com a posição em que foram moldados. A velocidade de carregamento é de 0,2 a 0,4 MPa/s.

O método de ensaio BS 1881: Part 108: 1983 estabelece que o molde deve ser preenchido em três camadas. Cada camada é adensada com um soquete vibratório, ou com o uso de mesa vibratória.

A norma japonesa JSCE-SF2 estabelece corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro quando a fibra possui comprimento maior que 40 mm e 100 mm de diâmetro quando a fibra possui comprimento menor que 40 mm. Quanto ao adensamento quando se utiliza a mesa vibratória, o compósito deve ser moldado somente em uma camada.

### **2.3.6 – Resistência à tração**

Segundo a ACI 544.4R (1988) não há ensaios padronizados de tração direta para determinar a curva tensão-deformação do concreto reforçado com fibras. A curva depende da dimensão do corpo-de-prova, do método de ensaio e da rigidez da máquina de ensaio.

Na figura 2.12 são observadas curvas de tensão-deformação (com a deformação medida pelos extensômetros elétricos) para argamassas reforçadas com fibras (SHAH et al. 1978). A parte ascendente da curva até acontecer a primeira fissura é similar a da argamassa sem fibras. A região descendente da curva depende dos parâmetros da fibra, como forma, porcentagem e fator de forma.

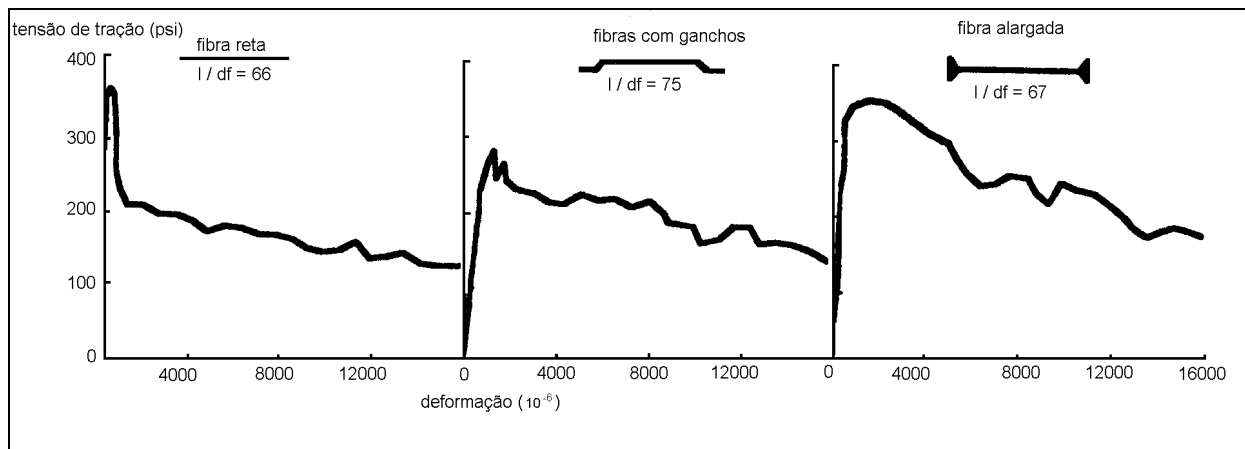


Figura 2.12: Curva tensão-deformação para argamassas reforçadas com fibras (1,73% de fibras pelo volume) (Shah et al, 1978).

São três os tipos de ensaios de resistência à tração: tração direta, tração na flexão e tração por compressão diametral. Os ensaios de tração mais utilizados descritos abaixo são tração na flexão e tração por compressão diametral.

No ensaio de flexão, um prisma de concreto é submetido a um carregamento nos terços médios do vão. A tensão de tração teórica máxima atingida na borda inferior do prisma é denominada *módulo de ruptura* (Neville, 1997).

A norma britânica BS 1881: Part 118: 1993 estabelece que o ensaio de tração seja realizado em corpos-de-prova prismáticos 150 mm x 150 mm x 750 mm ou seção transversal igual a pelo menos três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo.

Segundo ACI 544.2R (1989) para os compósitos com fibras de aço, devem ser ensaiados no mínimo três corpos-de-prova, e quanto à dimensão dos corpos-de-prova seu diâmetro deve ser três vezes maior que o diâmetro máximo dos agregados e o comprimento das fibras.

Os requisitos ASTM C 78-94 e NBR 12142 são semelhantes aos da norma britânica sendo que se a ruptura ocorrer no terço médio do prisma, o cálculo do módulo de ruptura é feito com base na teoria da elasticidade, sendo igual a:

$$R = \frac{Pl}{bd^2} \quad (2.9)$$

onde:

R = módulo de ruptura (MPa)

P = carga máxima aplicada no prisma (N)

l = distância entre cutelos de apoio (mm)

b = largura do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm)

d = altura do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm)

No entanto se a ruptura ocorrer fora do terço médio do vão, a uma distância “a” do apoio mais próximo, o valor do módulo de ruptura é:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2.10)$$

onde:

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

A norma brasileira NBR 12142 é semelhante à norma americana, considerando os dois casos de ruptura. A norma britânica não considera a ruptura fora do terço médio.

Há também um ensaio de flexão com carregamento central, conforme a ASTM C 293-94 que não é adotado pela norma britânica, sendo raramente utilizado.

No ensaio de tração por compressão diametral, as normas NBR 7222-94, ASTM C 496-90 E BS 1881: Part 117: 1983 especificam este ensaio que é realizado em corpos-de-prova cilíndricos, colocados com seu eixo na horizontal entre os pratos da prensa, aplicando-se carga até a ruptura por tração indireta, na forma de fendilhamento segundo o plano diametral vertical. O corpo-de-prova é submetido à tensão de compressão vertical igual a:



$$f_{LD} = \frac{2F}{\delta d l} \quad (2.11)$$

onde:

$f_{LD}$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm)

l = altura do corpo-de-prova (mm)

### 2.3.7 – Resistência à flexão

Segundo Bentur e Mindess (1990) a influência das fibras de aço na resistência à flexão de concretos e argamassas é muito maior que sobre as resistências à compressão e tração direta.

Ensaio feitos por Krenchel (1974) em argamassas simples e reforçadas com fibras de aço mostraram que a incorporação de 0,9 a 2 % de fibras aumentou a resistência à flexão em aproximadamente 15 a 30% respectivamente.

Nas argamassas reforçadas com fibras a resistência à flexão apresenta valores na faixa de 6,5 a 10 MPa para relações a/c de 0,45 a 0,55 para 1,5% do volume de fibras, dependendo do fator de forma e tipo de fibra. Para o volume de fibras de 2,5% a resistência à flexão se aproxima de 13 MPa (Johnston, 1980).

Em concretos reforçados com fibras as resistências diminuem com o aumento da dimensão característica máxima e porcentagem dos agregados graúdos. A resistência à flexão aos 28 dias, para concretos reforçados com 0,5 a 1,5% de fibras e agregados com dimensão característica máxima de 8 a 19 mm, é de 5,5 a 7,5 MPa, dependendo do fator de forma, relação a/c e tipo de fibra (ACI 544.4R, 1988).

### 2.3.8 – Tenacidade

O concreto comum é um material frágil que não é capaz de absorver grande quantidade de energia, possuindo baixa deformação plástica na ruptura.

A incorporação adequada de fibras de aço na matriz da pasta de cimento ocasiona uma mudança no comportamento do concreto transformando-o da qualidade de material frágil para dúctil (Pinto Júnior e Moraes, 1996). O concreto reforçado com fibras de aço passa a ter uma melhora significativa nas suas propriedades mecânicas, como:

- aumento da resistência ao aparecimento e propagação de fissuras;
- aumento da resistência ao impacto, à fadiga e à abrasão;
- aumento da capacidade de absorção de energia (tenacidade) (Bentur e Mindess, 1990).

Segundo Bentur e Mindess (1990) a principal função das fibras é exercida no estado de “pós-fissuração” interceptando a evolução e o crescimento das fissuras evitando a ruptura brusca.

Com o crescente emprego de fibras de aço nos compósitos tornou-se necessário estudar, além das propriedades controladas para o concreto normal, uma propriedade que analisa o comportamento pós-fissuração do material. A principal propriedade citada pelo ACI – 544.2R (1989) é a tenacidade, que mede a capacidade de absorção de energia e caracteriza a habilidade do material em resistir à fratura quando sujeito à deformação estática, dinâmica e a cargas de impacto.

A tenacidade é determinada a partir da curva de carga por deslocamento vertical obtida através do ensaio de flexão com velocidade de deformação controlada empregando corpos-de-prova prismáticos, segundo algumas recomendações normalizadas. Segundo o ACI 544.3R (1993) é indicada para medir a tenacidade dos concretos com fibras a norma ASTM C 1018-94b, que se refere ao ensaio padrão para a determinação dos parâmetros de tenacidade à flexão e resistência às primeiras fissuras.

Muitos autores nos últimos anos vêm tentando estabelecer um consenso entre as diferentes normas que existem para a caracterização da tenacidade. A maneira mais conveniente para a determinação desta propriedade parece ser associar o método especificado pela norma americana ASTM C 1018-94b com aquele recomendado pela norma japonesa JSCE-SF4 (Banthia e Trottier, 1995). Estes dois ensaios são similares com relação à metodologia empregada e diferenciam-se apenas quanto aos critérios de medida do trabalho pós-fissuração do concreto.

A norma ASTM C 1018 adota a largura para o corpo-de-prova de pelo menos três vezes o comprimento máximo das fibras. As dimensões mais usuais de corpos-de-prova prismáticos são 100 x 100 x 300 mm e 150 x 150 x 500 mm.

A tenacidade é calculada pelos chamados índices de tenacidade, representados pelo quociente entre a área contida sob a curva carga-deslocamento vertical para um deslocamento especificado e a área sob a curva correspondente ao deslocamento na primeira fissura, conforme figura 2.13. Neste gráfico são mostradas as curvas carga-deslocamento vertical de duas vigas de concreto, uma delas reforçada com fibras de aço e a outra construída sem a adição de fibras de aço, ambas com tamanho e composição idênticas testadas sob condições similares. Segundo o ACI 544.2R (1989) os índices calculados em função do deslocamento vertical da primeira fissura indica a energia total consumida relativa à energia elástica.

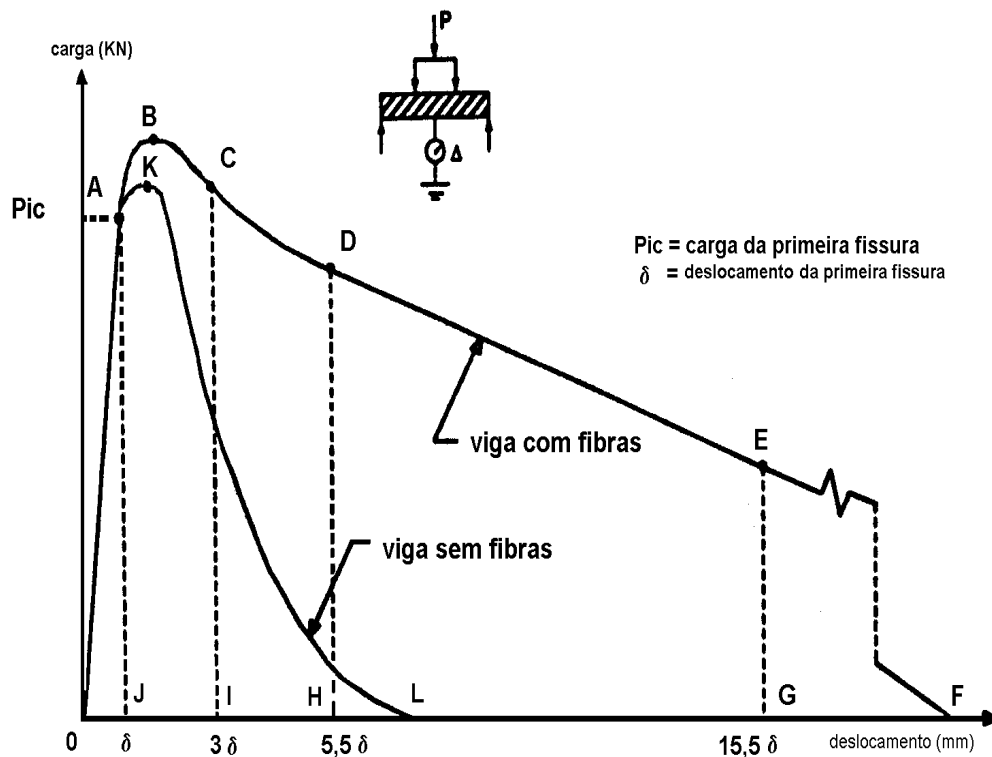


Figura 2.13: Índices de tenacidade calculados a partir da curva carga por deslocamento vertical (ACI 544.2R, 1989).

O índice  $I_t$  ( $I_t = OABF/OAKL$ ) corresponde à medida do aumento da tenacidade relativa à matriz do concreto não reforçado com fibras de aço. Os índices  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$  estão relacionados a medidas relativas às resistências das primeiras fissuras para o concreto reforçado com fibras de aço.

O índice  $I_5$  corresponde à relação entre a área OABCI e a área OAJ, sendo que o ponto I corresponde a um deslocamento vertical equivalente a 3 vezes a deformação da primeira fissura.

O índice  $I_{10}$  corresponde à relação entre a área OABDH e a área OAJ, e o ponto H corresponde a um deslocamento vertical equivalente a 5,5 ä.

O índice  $I_{30}$  corresponde à relação entre a área OABEG e a área OAJ, e o ponto  $I_0$  corresponde ao deslocamento vertical de 15,5 ä.

Para um material elasto plástico perfeito os índices  $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{30}$  valem 5, 10 e 30, respectivamente e demonstram que o comportamento do concreto com fibras analisado é comparado ao de um compósito elasto plástico (elástico até a primeira fissura e plástico logo em seguida). Para o concreto sem fibras de aço seu comportamento é considerado elasto frágil.

Segundo a norma JSCE SF-4 a tenacidade é determinada pela área sob a curva carga-deslocamento vertical até a flecha  $\frac{l}{150}$  e calculada pela equação:

$$F_t = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \quad (2.12)$$

$F_t$  = fator de tenacidade na flexão (N/mm<sup>2</sup>)

$T_b$  = tenacidade na flexão (N.mm ou J)

$\delta_{tb}$  = flecha equivalente a  $\frac{l}{150}$  (mm)

$h$  = altura do corpo-de-prova (mm)

$b$  = largura do corpo-de-prova (mm)

$l$  = vão do corpo-de-prova durante o ensaio (mm)

### 2.3.9 – Fadiga

Conforme Mehta e Monteiro (1994) a maior contribuição da adição de fibras de aço aos compósitos é no aumento da tenacidade à flexão, que por sua vez está relacionada às resistências ao impacto e à fadiga.

Segundo ACI 544.2R (1989) uma propriedade importante dos compósitos com fibras de aço é a capacidade de suportar cargas cíclicas e dinâmicas, particularmente em aplicações envolvendo cargas repetidas tais como pavimentos e lajes de pisos industriais. Tem sido verificado que a adição de fibras nas vigas de concreto armado convencionais aumenta a resistência à fadiga, ocorrendo uma diminuição da largura das fissuras sob carregamento cíclico.

Estudos experimentais sobre fadiga foram realizados empregando vigas de concreto e de argamassas reforçadas com fibras de aço. Verificou-se que, para um determinado tipo de fibra, há um aumento significativo na resistência à fadiga com o respectivo aumento da porcentagem das fibras (Wang et al., 1996). Em geral a resistência à fadiga para compósitos com fibras é de 90% da resistência estática em  $2 \times 10^6$  ciclos quando é usado carregamento sem reversão de carga e em torno de 70% da resistência estática, quando é usado carregamento com sentidos inversos (ACI 544.1R, 1982).

Ramakrishnan et al (1987), realizaram ensaios de fadiga à flexão em concretos sem fibras de aço e concretos reforçados com 0,5% a 1,0% do volume de fibras utilizando corpos-de-prova prismáticos de 100 x 100 x 350 mm. A resistência à compressão aos 28 dias do concreto de controle foi 38 MPa e seu módulo de ruptura 5 MPa. Aplicando-se 2.000.000 ciclos à frequência de 20 Hz este concreto apresentou uma resistência limite de 50% a 55% do seu módulo de ruptura. Já os concretos com fibras tiveram este valor aumentado para 90% do seu módulo de ruptura, resultando num aumento de 200% a 250% da resistência à fadiga na flexão comparado aos concretos sem fibras.

## **Capítulo 3**

### **Materiais e Métodos**

#### **3.1 – Introdução**

O componente da estrutura de uma máquina-ferramenta empregado neste estudo é um modelo simplificado de barramento de torno de bancada utilizado por Rahman et al. (1987), Rahman e Mansur (1982), conforme figura 3.1. Foram moldados 12 exemplares deste modelo para a execução dos ensaios: um modelo de ferro fundido (FF), um de aço fundido (AF), dois de argamassa armada (AA), seis de argamassa reforçada com fibras de aço (AR1,AR2,AR3) e dois de concreto polimérico (CP). Os exemplares foram submetidos a ensaio de flexão estática para se determinar as características de rigidez tais como as curvas de carga x deslocamento vertical máximo, a carga correspondente à primeira fissura e a carga de ruptura. O comportamento dinâmico das peças ensaiadas foi verificado através da determinação dos parâmetros modais usando a técnica de análise modal experimental e de ensaios de fadiga por flexão. Alguns dos modelos de ensaio foram rompidos à flexão após terem passado pelo ensaio de fadiga para se verificar o efeito das solicitações cíclicas nos diversos materiais.

Neste capítulo são descritos os materiais, a metodologia dos ensaios e os equipamentos utilizados na investigação.

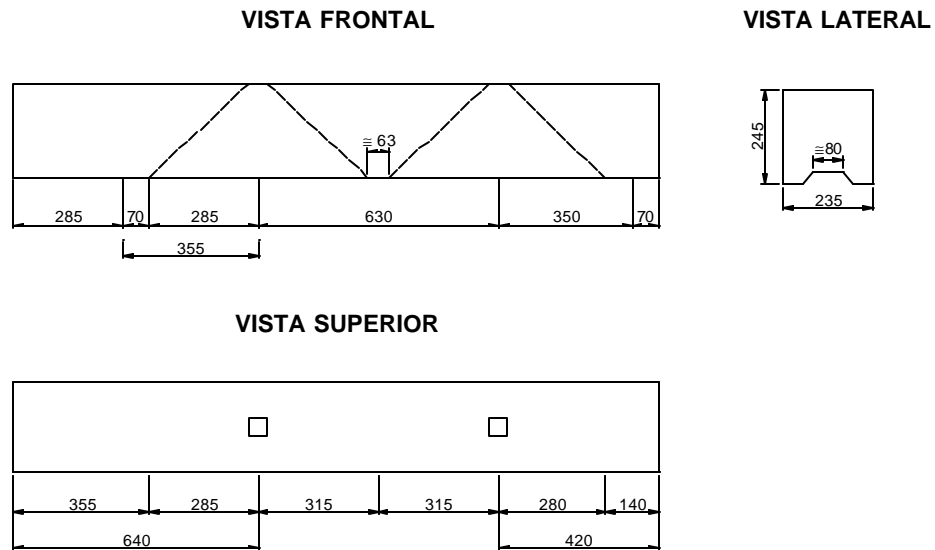


Figura 3.1 – Dimensões principais da geometria do barramento do torno.

### 3.2 – Descrição dos Materiais Utilizados na Fabricação dos Protótipos

#### 3.2.1 - Ferro fundido

A categoria de ferro fundido utilizado foi o cinzento GG 15 (grafite lamelar DIN 1691) com as seguintes propriedades médias tabeladas: resistência à tração 150 MPa, limite de escoamento de 80 a 105 MPa, resistência à compressão 550 a 700 MPa; resistência ao cisalhamento aproximadamente 150 MPa, resistência à flexão 230 a 370 MPa e dureza Brinell 140 – 190.

#### 3.2.2 - Aço fundido

A categoria de aço fundido utilizado foi de acordo com a norma ASTM A 216 grau WCB. As características do material são apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Composição química do aço (ASTM A 216 grau WCB).

<b>Composição química</b>	
Carbono (máx.)	0,30 %
Manganês (máx.)	1,00 %
Fósforo (máx.)	0,04 %
Enxofre (máx.)	0,045 %
Silício (máx.)	0,60 %
<b>Elementos residuais especificados</b>	
Níquel (máx.)	0,50 %
Cobre (máx.)	0,30 %
Cromo (máx.)	0,50 %
Vanádio (máx.)	0,03 %
Molibdênio (máx.)	0,20 %
Total destes elementos residuais (máx.)	1,00 %

Tabela 3.2: Exigências de tração do aço (ASTM A 216 grau WCB).

resistência à tração (MPa)	485 a 655
tensão de escoamento (MPa), mín.	250
alongamento (%) (50mm), mín.	22
redução de área (%), mín.	35

### 3.2.3 - Argamassa armada

A argamassa armada utilizada neste trabalho foi composta de cimento portland de alta resistência inicial, sílica ativa, areia natural quartzosa, água e aditivo superplastificante na seguinte proporção, em massa: 1,00:0,20:2,00:0,26:0,02. A areia utilizada foi passada na peneira 2,4 mm. A tela de aço empregada apresenta uma malha quadrada de 12,5 mm e com arame galvanizado de 1,2 mm de diâmetro (figura 3.16).



### **3.2.4 - Argamassa reforçada com fibras de aço**

O traço utilizado nesta argamassa foi o mesmo da argamassa armada. Esta argamassa foi reforçada com teores volumétricos de fibras de aço de 1%, 2% e 3%. As fibras de aço foram aleatoriamente distribuídas pela argamassa no momento da mistura. As fibras foram fornecidas coladas em forma de pente e possuem as características descritas no item 3.3.6. Foram produzidos dois protótipos de cada porcentagem de fibra de aço: 1%, 2%, 3%.

### **3.2.5 - Concreto polimérico**

O compósito polimérico utilizado foi um graute epóxico formado pela combinação de três componentes: resina epóxi líquida, endurecedor e agregados miúdos. A proporção em massa de agregados em relação à combinação resina/endurecedor foi de 6,75:1, (figura 3.21).

### **3.2.6 - Concreto polimérico armado**

O concreto polimérico armado foi produzido da mesma forma que o concreto polimérico e foi reforçado com a mesma tela de aço utilizada na argamassa armada, (figura 3.21).

Em todos os protótipos com exceção dos modelos de ferro e aço fundidos foi utilizada armadura de aço CA 50 descrita no tópico 3.3.7, (figura 3.3).

## **3.3 – Descrição dos Materiais Componentes dos Compósitos Utilizados nos Protótipos**

### **3.3.1- Cimento portland**

O cimento utilizado nos compósitos é o de alta resistência inicial CP V ARI especificado pela NBR 5733. As características física e química deste cimento encontram-se nas tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3: Características físicas do cimento CP V ARI (Fonte: Boletim Técnico do Fabricante).

<b>Características físicas</b>	
início de pega (min)	137
fim de pega (min)	199
expansibilidade à frio (mm)	-
expansibilidade à quente (mm)	0
Finura (Blaine) (m <sup>2</sup> /kg)	456
<b>Características mecânicas</b>	
resistência à compressão (MPa)	
1 dia	28,9
3 dias	42,0
7 dias	46,6
28 dias	56,3

Tabela 3.4: Características químicas do cimento CP V ARI (Fonte: Boletim Técnico do Fabricante).

<b>Características químicas</b>	<b>Cimento</b>
perda ao fogo (%)	2,55
resíduo insolúvel (%)	0,67
SiO <sub>2</sub>	19,45 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,89 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,12 %
CaO	64,44 %
MgO	0,62 %
SO <sub>3</sub>	2,94 %
K <sub>2</sub> O	0,70 %

### 3.3.2 - Agregado Miúdo

A NBR 7211 define agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

Neste estudo foi utilizada areia quartzosa natural proveniente da região de Campinas, cuja massa específica foi determinada pelo frasco de Chapman conforme NBR 9776, constando seus resultados na tabela 3.5. A massa unitária à solto da areia foi determinada de acordo com a NBR 7251 e o resultado está na tabela 3.6.

A composição granulométrica dos agregados miúdos é feita por peneiração segundo a NBR 7211 e NBR 7217. O resultado é apresentado na tabela 3.7 e a curva granulométrica correspondente é apresentada na figura 3.2. A dimensão máxima característica e o módulo de finura são 2,40 mm e 2,43 mm, respectivamente. De acordo com a NBR 7211, a areia utilizada está situada na zona 3, ou seja, é considerada areia média (figura 3.2).

Tabela 3.5: Massa específica dos agregados miúdos.

<b>determinações</b>	<b>massa específica aparente seca (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
I	2,60
II	2,60
III	2,61
<b>média</b>	<b>2,60</b>

Tabela 3.6: Massa unitária a solto dos agregados miúdos.

<b>determinações</b>	<b>massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
I	1,47
II	1,49
III	1,46
<b>média</b>	<b>1,47</b>

Tabela 3.7: Análise granulométrica do agregado miúdo.

<b>Peneira</b>	<b>Material Retido</b>	<b>Individuais</b>	<b>Retido Acumulado</b>
Milímetros	Gramas	Porcentagem	Porcentagem
<b>*6,3</b>	0	0	0
4,8	9.8	1	1
2,4	38.2	4	5
1,2	121.7	14	19
0,6	254.8	30	49
0,3	212.3	26	75
0,15	162.3	19	94
Fundo	54.9	6	100*
<b>Totais</b>	<b>854.0</b>	<b>100</b>	<b>243</b>

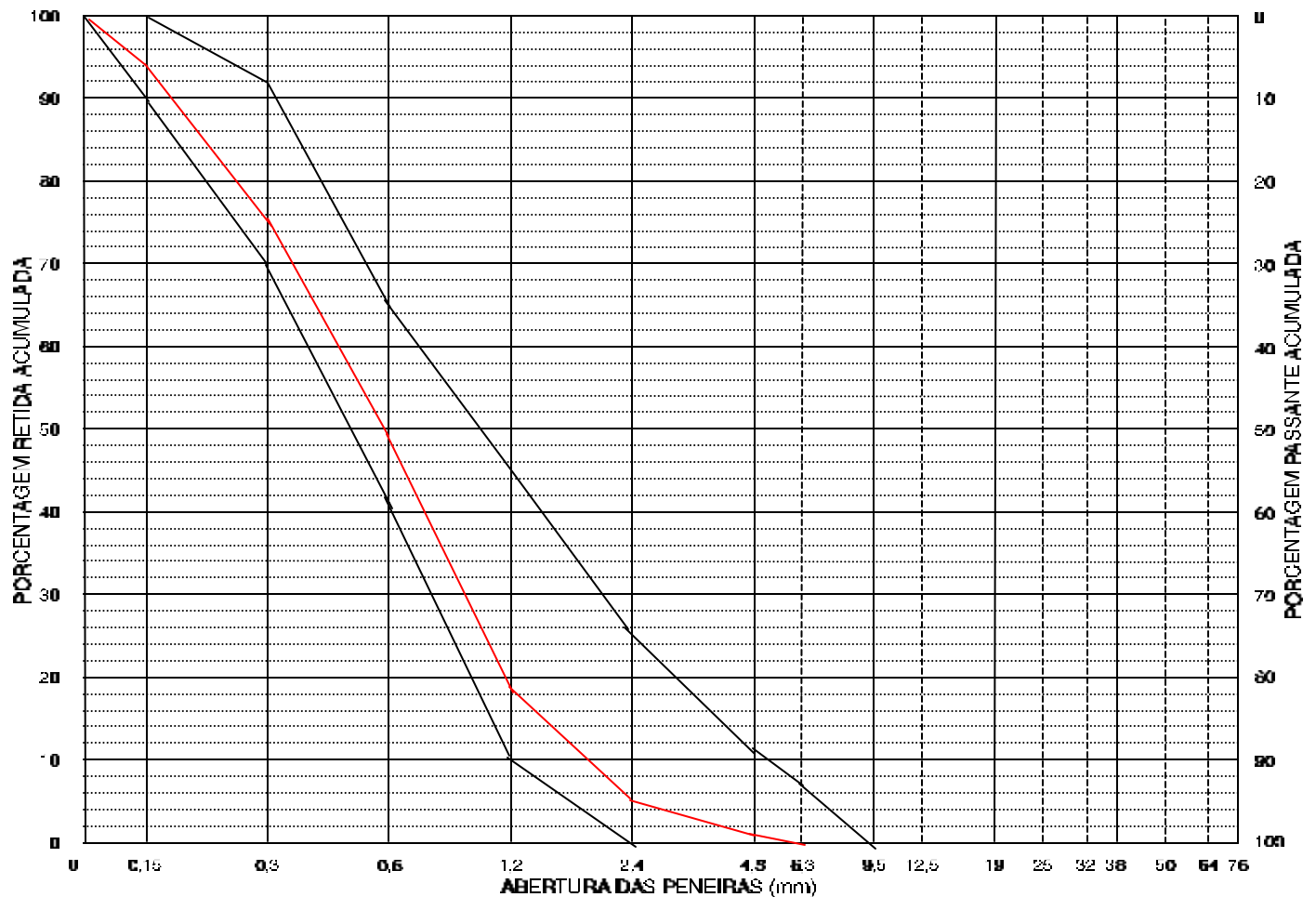


Figura 3.2: Curva granulométrica da areia situada na zona 3 (NBR 7211).

### **3.3.3 - Água**

A água utilizada no amassamento das argamassas é potável, portanto não contendo impurezas que podem vir a prejudicar as reações de hidratação do aglomerante hidráulico.

### **3.3.4 – Aditivo Superplastificante**

Segundo NBR 11768 (EB-1763/92) os aditivos redutores de água tem a função de reduzir a relação água/cimento do concreto e manter trabalhabilidade desejada. Os superplastificantes são classificados pela norma brasileira como tipo SP, conhecidos como redutores de água de alta eficiência, sendo polímeros orgânicos hidrossolúveis, obtidos sinteticamente. Foi utilizado nesta pesquisa um aditivo, de última geração, do tipo SP (superplastificantes) cujas características são descritas na tabela 3.8.

O que diferencia este produto dos aditivos superplastificantes tradicionais é um novo mecanismo único de ações que melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento. Os superplastificantes tradicionais, tais como os sulfonatos de melamina e naftaleno são baseados em polímeros que são absorvidos pelas partículas de cimento. Acumulam-se na superfície das partículas de cimento no início do processo de mistura do concreto. Os grupos sulfônicos das cadeias de polímeros aumentam a carga negativa da superfície das partículas de cimento e dispersam estas partículas por repulsão elétrica. Este mecanismo eletrostático causa a dispersão da pasta de cimento e a consequência positiva é que se requer menos água na mistura para se obter uma determinada consistência do concreto.

A estrutura química do aditivo utilizado consiste de polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais. No começo do processo de mistura, inicia-se o mecanismo de dispersão eletrostática semelhante ao dos superplastificantes tradicionais, porém as cadeias laterais unidas à estrutura polimérica geram uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento. Com este processo obtém-se um concreto fluído com uma grande redução da quantidade de água (Fonte: Manual Técnico da MBT do Brasil).

A capacidade de trabalhar com relações *a/c* extremamente baixas permite a produção de concretos de alto desempenho com resistências iniciais (18-24 horas) extremamente altas. Os benefícios trazidos por este produto são:

- concreto fluído com mínima relação *a/c* sem segregação e sem exsudação;
- possibilita a eliminação da cura a vapor;
- reduz a mão-de-obra;
- permite a confecção de concretos auto-adensáveis para peças com armadura muito densa;
- melhora a aderência e textura da superfície do concreto;
- comparado com superplastificantes normais, este aditivo melhora as propriedades físicas do concreto e por conseqüência a durabilidade;

Tabela 3.8: Características do superplastificante (Fonte: Manual Técnico da MBT do Brasil).

<b>aparência visual</b>	<b>líquido amarelo claro</b>
pH	8 - 10
densidade (g/ml)	1,19 a 1,23
Teor de sólidos (%)	35 a 39

### 3.3.5 - Adição Mineral

A adição mineral empregada nesta pesquisa foi a sílica ativa. A sílica ativa é um subproduto de fornos a arco e de indução das indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício caracterizada nas tabelas 3.9 e 3.10. São materiais silicosos ultrafinos, podendo ser adicionadas ao concreto e argamassas em quantidades relativamente grandes, na faixa de 10% a 20% da massa de cimento portland (Mehta e Monteiro, 1994).

Quando a sílica ativa e o superplastificante são empregados em compósitos de cimento portland ocorre o seguinte fenômeno: o aditivo inibe temporariamente a atração mútua eletrostática entre os grãos de cimento da pasta, liberando a água que, por ventura, seria aprisionada nos interstícios destes grãos, promovendo-a no auxílio da trabalhabilidade. Uma vez cessado o efeito do superplastificante, os grãos de cimento tendem a se atrair, formando grumos,

mas, desta vez, o lugar que seria ocupado pela água nos espaços entre os grãos passa a ser ocupado pelos grãos das adições minerais, que, por exemplo, no caso da sílica ativa, têm tamanho de 60 a 100 vezes menor que o grão de cimento portland. Ora, isto diminui sobremaneira a porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição entre a pasta e os agregados nos compósitos, transformando os concretos e argamassas comuns para compósitos de alto desempenho (Ducatti, 1993).

Tabela 3.9: Análise química da sílica ativa (Boletim Técnico do Produto).

<b>determinações (%)</b>	<b>sílica ativa</b>
perda ao fogo	2,30
sílica	95,10
alumina	0,09
óxido de ferro	0,10
óxido de cálcio	0,24
óxido de magnésio	0,43
óxido de potássio	0,93
óxido de sódio	0,23

Tabela 3.10: Análise física da sílica ativa (Boletim Técnico do Produto).

<b>determinações</b>	<b>sílica ativa</b>
finura ( $m^2/kg$ )	19000
valor pH	8,47
densidade ( $kg/m^3$ )	400
umidade (%)	0,67
massa específica ( $kg/m^3$ )	2220
diâmetro médio da partícula ( $\mu m$ )	0,35

### 3.3.6 - Fibras de Aço

Na produção das argamassas reforçadas com fibras foram utilizadas as fibras do tipo RC-65/35-BN cuja resistência à tração é de  $1150 N/mm^2$ . Estas fibras são produzidas com chapa de aço carbono laminada a frio.

Nas fibras de aço do tipo RC-65/35-BN, R indica a existência de ancoragem nas extremidades, C representam fibras coladas, B representa aço claro, N corresponde a baixo teor de carbono. De acordo com o fabricante a geometria destas fibras equivalem: comprimento longitudinal 35 mm, diâmetro 0,55 mm, fator de forma 65.

### 3.3.7 – Armadura de Aço

Foi empregada, em todos os protótipos de argamassa uma armadura longitudinal de aço CA 50 de 10 mm de diâmetro, composta de 2 barras na borda tracionada e 2 barras na comprimida e 3 estribos de 6,3 mm com a finalidade de manter as barras posicionadas de forma que estes protótipos se comportam como vigas conforme figura 3.3.

O protótipo de argamassa armada e de argamassa polimérica armada além da armadura acima descrita possui uma estrutura que consiste de uma tela de aço galvanizado de malha quadrada de 12,5 mm e diâmetro do fio de 1,2 mm segundo figura 3.4.



Figura 3.3: Armadura longitudinal





Figura 3.4: Tela de aço do protótipo.

### **3.4 - Propriedades dos Compósitos Utilizado**

#### **3.4.1 - Argamassas**

Foi adotado para a fabricação dos modelos de ensaios o mesmo traço das argamassas utilizadas por Rahman et al. (1987), Rahman et al. (1989), Rahman e Mansur (1992). Como se pretendia obter argamassas de alto desempenho acrescentou-se àquelas dosagens uma adição mineral ultrafina, a sílica ativa, num teor de 20% da massa de cimento, e um aditivo superplastificante (ou redutor de água de amassamento de amplo espectro), num teor de 2% da massa de cimento. O efeito destas adições possibilitou a redução da relação água/cimento e o traço final usado é o apresentado na tabela 3.11.

Tabela 3.11: Composição das argamassas.

<b>Traço (em massa)</b>				
<b>Argamassas</b>	<b>AA</b>	<b>AR1</b>	<b>AR2</b>	<b>AR3</b>
Fibras de aço	0	0,01	0,02	0,03
Cimento portand (CPVARI)	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia natural	2,00	2,00	2,00	2,00
Sílica ativa	0,20	0,20	0,20	0,20
Relação água/cimento	0,26	0,26	0,26	0,275
Relação superplast./cimento	0,02	0,02	0,02	0,02
Índice de consistência (mm)	<b>252,5</b>	<b>252</b>	<b>223</b>	<b>210,5</b>

As argamassas reforçadas com fibras (AR1, AR2, AR3) foram obtidas adicionando à argamassa AA definida acima, teores de fibras de aço de 1%, 2% e 3%.

As consistências das argamassas foram medidas na mesa de consistência, segundo a NBR 7215, e os valores obtidos constam também da tabela 3.11. A demonstração da fluidez destes compósitos pode ser visualizada nas fotos das figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8. Com esta consistência as argamassas puderam ser moldadas sem dificuldade, nas formas dos modelos, com auxílio da mesa vibratória.



Figura 3.5: Consistência da argamassa com 0 % de fibras.



Figura 3.6: Consistência da argamassa com 1 % de fibras

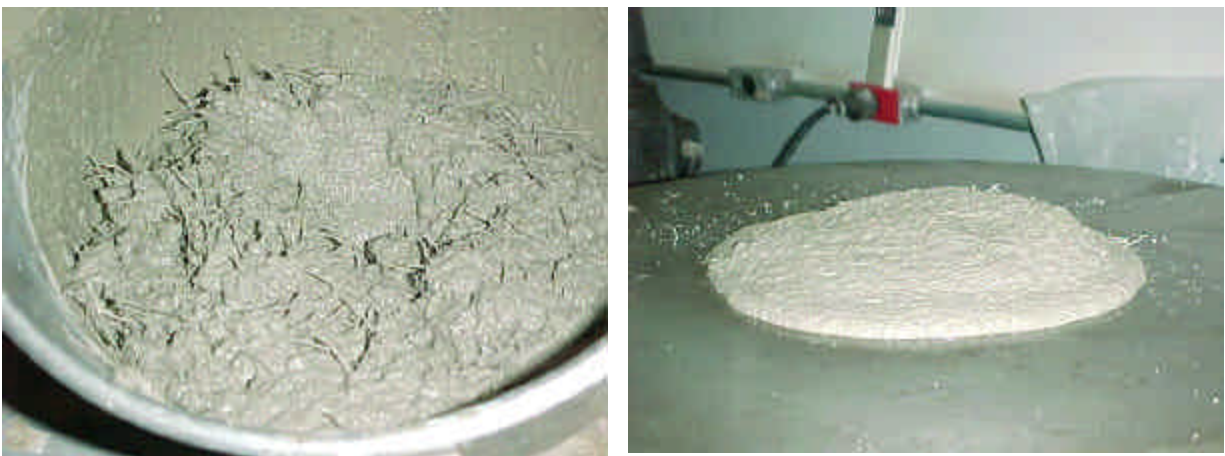


Figura 3.7: Consistência da argamassa com 2 % de fibras



Figura 3.8: Consistência da argamassa com 3 % de fibras

As argamassas foram caracterizadas mecanicamente através da medida das resistências à compressão, da resistência à tração indireta (por ruptura de corpos-de-prova cilíndricos por compressão diametral), da resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) e pelo módulo de elasticidade estático. Para a medida da resistência à compressão foram moldados 12 corpos-de-prova cúbicos de 75 mm de aresta e ensaiados segundo a norma ASTM C 109-93 adaptada (figura 3.9). Os resultados médios e os desvios padrão estão mostrados na tabela 3.12. Para a medida da tração indireta foram moldados 3 corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura segundo a NBR 5738, e ensaiados segundo a norma NBR 7222 (figura 3.10). Para a medida da tração na flexão foram moldados 3 corpos-de-prova de prismáticos de 150 x 150 x 500 mm segundo a ASTM C192-90 e ensaiados segundo a norma ASTM C78-94 (figura 3.11). O módulo de elasticidade foi determinado utilizando-se 3 corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm, moldados conforme a NBR 5738, e ensaiados segundo a NBR 8522 (figura 3.12).

Tabela 3.12: Resultados dos ensaios mecânicos de caracterização.

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa) (NBR 7222)	Resistência à tração na flexão (MPa) (ASTM C78-94)	Módulo de deformação longitudinal (GPa) (NBR 8522)
sem fibras	103±4,52	7±0,75	11±0,695	40±1,96
1% fibras	105±7,76	12±1,23	12±0,462	41±0,11
2% fibras	108±3,3	13±1,08	12±0,53	39±0,61
3% fibras	119±3,2	15±1,44	21±2,28	39±0,32
concreto polimérico	89±5,3	17±0,45	30±2,59	18±0,48



Figura 3.9: Ensaio de resistência à compressão (ASTM C 109-93 adaptada).

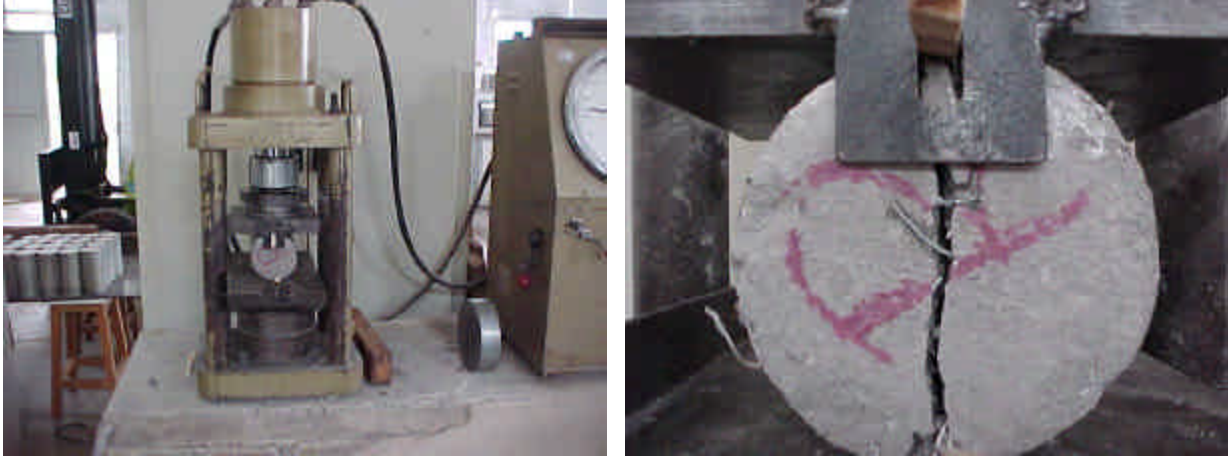


Figura 3.10: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222).



Figura 3.11: Ensaio de resistência à tração na flexão (ASTM C78 – 94).



Figura 3.12: Ensaio à compressão axial simples para a determinação do módulo de elasticidade (NBR 8522).

### 3.4.2–Concreto Polimérico

O compósito polimérico utilizado nesta pesquisa é um graute epóxico que recebe o nome comercial “Masterflow 648”. É um produto fornecido pela “Máster Builders Technologies Brasil Ind. e Com. Ltda” formado pela combinação de três componentes: resina epóxi líquida, endurecedor e agregados. A proporção em massa de agregados em relação à combinação resina/endurecedor é de 6,75:1. Este material segundo o fabricante possui excelentes características de fluidez, alta resistência inicial aos sete dias, boa resistência química, características físicas superiores a altas temperaturas. É um material recomendado para grauteamentos profundos, devendo-se empregar armadura de aço ao se moldar peças com espessuras acima de 15 cm.

As misturas das argamassas poliméricas foram feitas em duas etapas. Na primeira etapa foram misturadas a resina e o endurecedor. Na segunda etapa, os agregados foram acrescentados aos poucos e a mistura prosseguiu até a completa homogeneização do material. Para a garantia de uma mistura bem feita, foi adaptada uma haste de aço com aletas a uma furadeira portátil de alto impacto, conforme figuras 3.13 e 3.14. O total de cada concretagem foi dividido em 8 frações. Cada uma destas frações foi misturada como está explicado acima. As misturas de concreto

polimérico empregados eram auto nivelantes de modo que, não se fez necessário à compactação do material nos moldes.



Figura 3.13: Mistura dos componentes líquidos.



Figura 3.14: Mistura dos componentes líquidos com os agregados.



Para os compósitos poliméricos foram utilizados 6 corpos-de-prova cilíndricos de 50 x 100 mm no ensaio de resistência à compressão (SPI-2.0 - 86), 3 corpos-de-prova cilíndricos de 50 x 100 mm para o ensaio de tração por compressão diametral (NBR 7222), 8 corpos-de-prova prismáticos de 30 x 30 x 300 mm para o ensaio de módulo de ruptura (SPI-5.0 - 86) e 3 corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm para o ensaio de módulo de elasticidade segundo a NBR 8522. Os corpos-de-prova foram moldados em três camadas iguais e curados no laboratório à temperatura ambiente, durante 14 dias.

O ensaio de resistência à tração na flexão (figura 3.15) realizado segundo as recomendações da SPI-5.0 – 86 é similar a ASTM C78 – 94. Os resultados dos ensaios mecânicos foram descritos na tabela 3.12.

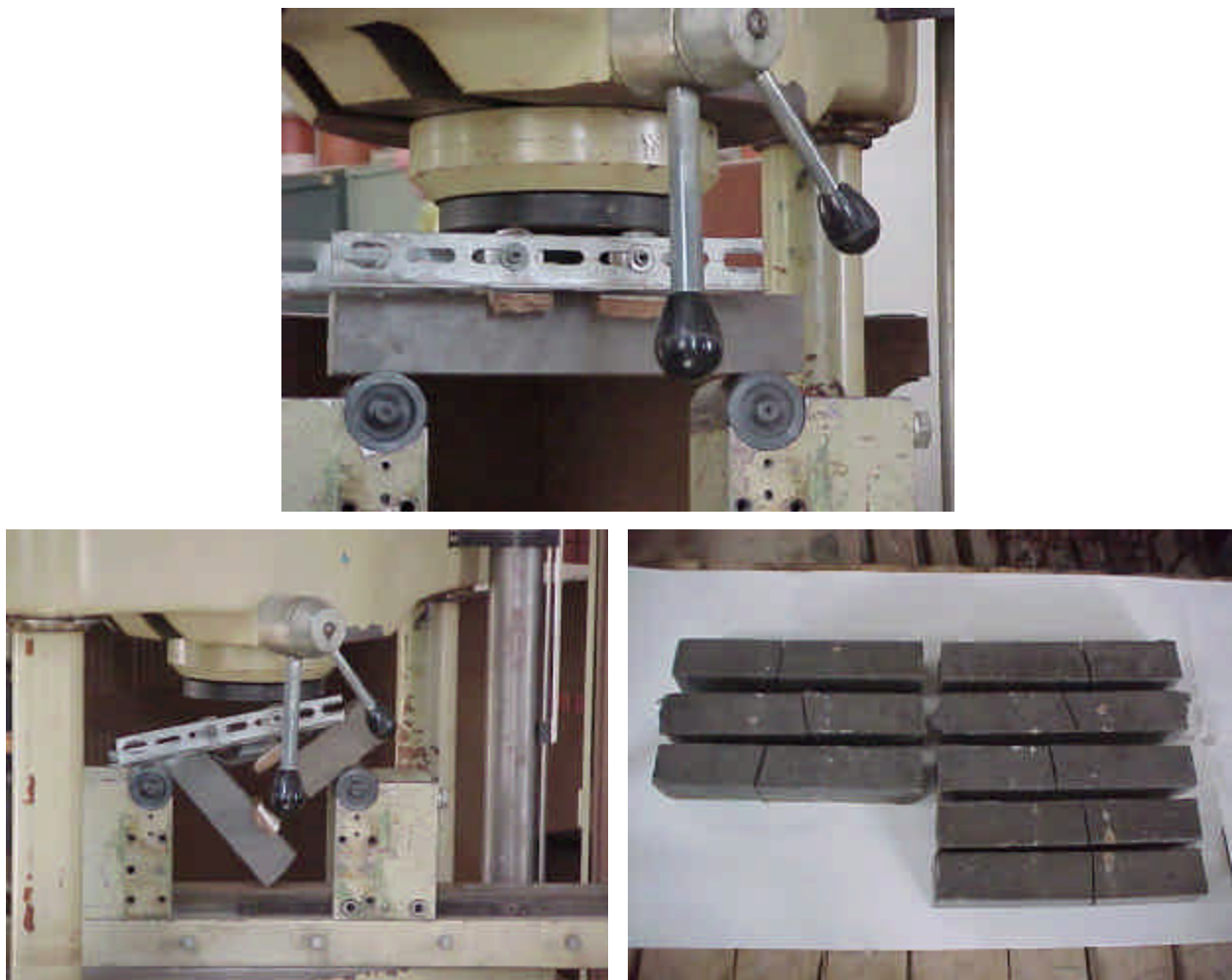


Figura 3.15: Ensaio de resistência à tração na flexão.

### 3.5 – Fabricação dos Modelos de Ensaio

#### 3.5.1 – Introdução

Para que fosse possível a moldagem dos protótipos de base de máquina-ferramenta foi necessária a fabricação de uma forma de fibra de vidro que retratasse exatamente o modelo em estudo conforme figura 3.16. As dimensões do molde são as mesmas utilizadas na fabricação de um torno mecânico, mas em escala natural. A intenção é manter a geometria mais próxima possível das reais bases de máquinas-ferramenta. Num primeiro momento foi construído um molde de madeira que reproduzia o protótipo de máquina-ferramenta que se desejava, e em seguida esta peça, que fazia o papel do “negativo”, foi recoberta com camadas de epóxi e fibra de vidro até dar origem à forma destinada à moldagem das bases estudadas ao longo de toda esta pesquisa. A moldagem do compósito polimérico exigiu a fabricação de um segundo molde de dimensões idênticas ao molde de fibra de vidro, utilizando madeira desmontável.



Figura 3.16 – Molde de fibra de vidro e a armadura em forma de tela.

### 3.5.2 - Modelos de Argamassa

Foram produzidos dois protótipos de cada tipo de argamassa de cimento portland: argamassa armada (AA) composta de tela de aço, argamassa reforçada com 1% de fibra de aço (AR1), argamassa reforçada com 2% de fibra de aço (AR2), argamassa reforçada com 3% de fibra de aço (AR3). Todas estas argamassas são armadas com 4 barras de aço longitudinais, conforme descrito no tópico 3.3.7.

A mistura das argamassas armadas foi feita em betoneira de eixo inclinado, sendo cada mistura suficiente para moldar 6 corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm, 6 cúbicos de 75 x 75 mm e 1 protótipo de base. Os materiais empregados nas argamassas, descritos no início deste capítulo, foram: cimento CP V ARI, areia quartzosa natural de granulometria 0,15 – 2,4 mm, superplastificante, sílica ativa e fibras de aço do tipo RC-65/35-BN. Todos os materiais eram secos, a areia peneirada na peneira 2,4 mm da ABNT e utilizadas as granulometrias de 0,15 mm a 2,4 mm. A introdução dos materiais na betoneira era iniciado pela colocação do cimento e da sílica ativa os quais eram previamente misturados; em seguida com a betoneira em funcionamento era adicionada parte da água previamente misturada com parte do superplastificante. A areia era posteriormente acrescentada e o restante da água e do superplastificante misturados eram adicionados aos poucos e na seqüência as fibras de aço. O tempo total de mistura girou em torno de 10 a 15 minutos decorrentes do tipo de superplastificante utilizado, da eficiência da betoneira e da heterogeneidade dos materiais componentes. Após este tempo estabelecido, as fibras puderam ser vistas homogeneamente distribuídas na argamassa, segundo figura 3.17.



Figura 3.17 - Fluidez da mistura e homogeneidade das fibras de aço.

A forma de fibra de vidro foi limpa com palha de aço e espátulas e envolta com plástico antes da moldagem (figura 3.18). Aplicou-se desmoldante na forma internamente para facilitar a desmoldagem posterior da peça pronta. O transporte foi feito com o carrinho de mão e o molde de fibra de vidro foi preenchido primeiramente com um terço do seu volume e assim sucessivamente (figura 3.19). Para garantir um seguro adensamento a mesa vibratória foi utilizada. A superfície foi aplainada e alisada para um melhor acabamento na peça (figura 3.20). Os técnicos que trabalharam na moldagem das peças foram sempre os mesmos para que fosse garantida uma constância na qualidade das argamassas.

Após o término da moldagem a cura foi iniciada na superfície da peça que foi coberta com areia encharcada de água permanecendo durante 3 dias até a desforma. Desmoldada a peça esta foi colocada sobre uma lona de plástico, envolta por areia e molhada todos os dias até completar 28 dias.

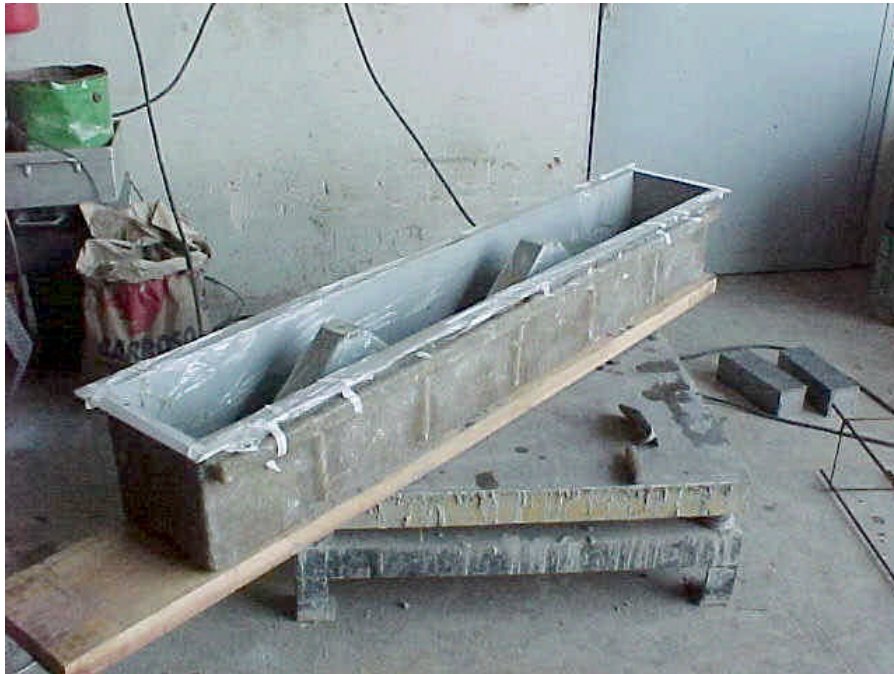


Figura 3.18: Forma no momento que precedia a moldagem.



Figura 3.19: Lançamento da argamassa.



Figura 3.20: Acabamento da peça.

### 3.5.3 – Modelos de Concreto Polimérico

Foram produzidos dois protótipos de compósitos poliméricos utilizando graute epóxico já descrito, armadura de aço de 10 mm de diâmetro e três estribos: o concreto polimérico (CP) e o concreto polimérico armado (CPA), do qual faz parte a tela de aço galvanizado de malha quadrada de 12,5 mm e diâmetro do fio de 1,2 mm.

O compósito polimérico foi o último material a ser produzido que utilizou na etapa da mistura uma furadeira portátil de alto impacto na qual foi adaptada uma haste de aço com aletas. A resina e o endurecedor foram misturados numa primeira etapa, em seguida os agregados foram acrescentados aos poucos e a mistura prosseguiu até a completa homogeneização do material. O total de cada concretagem foi dividido em 8 frações. Cada uma destas frações foi misturada como está explicado acima. As misturas de concretos poliméricos empregadas eram auto nivelantes, de modo que não se fez necessária a compactação do material nos moldes. As etapas de produção do compósito polimérico podem ser vistas nas figuras 3.21 e 3.22, onde o lançamento do compósito é realizado em camadas que correspondem ao número de misturas utilizadas. A cura foi feita no laboratório ao meio ambiente, durante 14 dias.



Figura 3.21: Preparo e lançamento do material.



Figura 3.22: Acabamento dos compostos poliméricos.

## 3.6 – Programa Experimental

### 3.6.1 – Ensaio Estáticos de Flexão

Estes ensaios foram realizados nos protótipos de argamassa armada (AA), argamassa reforçada com 1% de fibras de aço (AR1), argamassa reforçada com 2% de fibras de aço (AR2) e argamassa reforçada com 3% de fibras de aço (AR3).

No estudo do comportamento estático do protótipo são determinadas as curvas de deslocamento vertical máximo, a rigidez estática, a carga de primeira fissura e a carga de ruptura, num ensaio de flexão da peça simplesmente apoiada, conforme mostra o esquema da figura 3.23 e da figura 3.24.

As cargas são aplicadas por um macaco hidráulico de capacidade de 300 kN acionado manualmente. As leituras são fornecidas por uma célula de carga interposta entre o macaco e uma base em forma de I apoiada no modelo. Os deslocamentos verticais máximos dos modelos nos pontos A, B e C são lidos em relógios comparadores fixados numa barra metálica horizontalmente fixada no protótipo na sua altura média. Para obtenção das cargas de primeira fissura, curvas cargas x deslocamento vertical máximo e rigidez à flexão dos modelos, o carregamento é feito isoladamente em cada um dos pontos A, B e C, sendo lidas as correspondentes flechas nestes pontos. Este carregamento segue o seguinte roteiro:

- a) antes da aplicação das cargas os relógios são zerados;
- b) a carga é aplicada de 0 a 50 kN, de 10 em 10 kN. São observadas as leituras nos relógios. Em seguida a carga é aliviada também de 10 em 10 kN e as leituras dos relógios são comparadas com aquelas obtidas com o carregamento;
- c) os relógios são então zerados;
- d) a carga é aumentada novamente de 10 em 10 kN, até o aparecimento da primeira fissura e as leituras dos relógios são registradas.

A carga de ruptura na flexão é obtida com o carregamento no ponto B (central) do vão, após os carregamentos descritos acima. A carga de ruptura assim obtida é comparada à correspondente para um protótipo semelhante anteriormente submetido ao ensaio de fadiga na flexão.



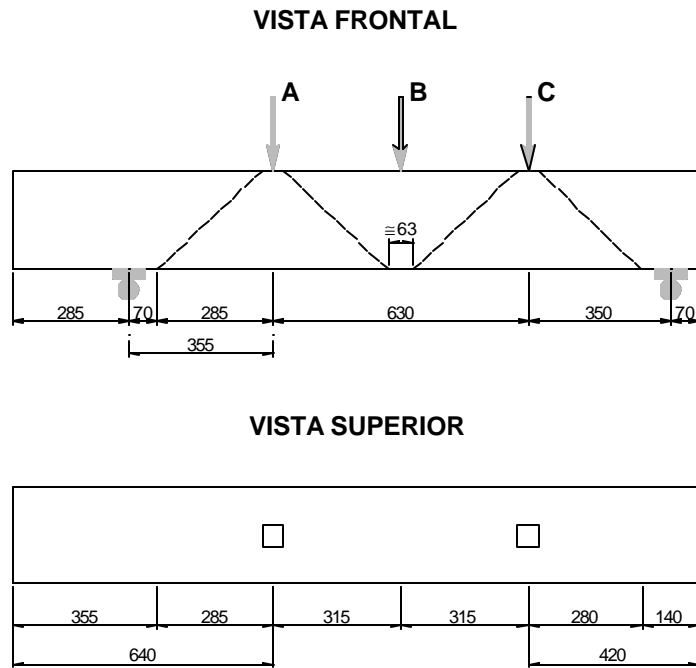


Figura 3.23: Montagem do experimento estático.

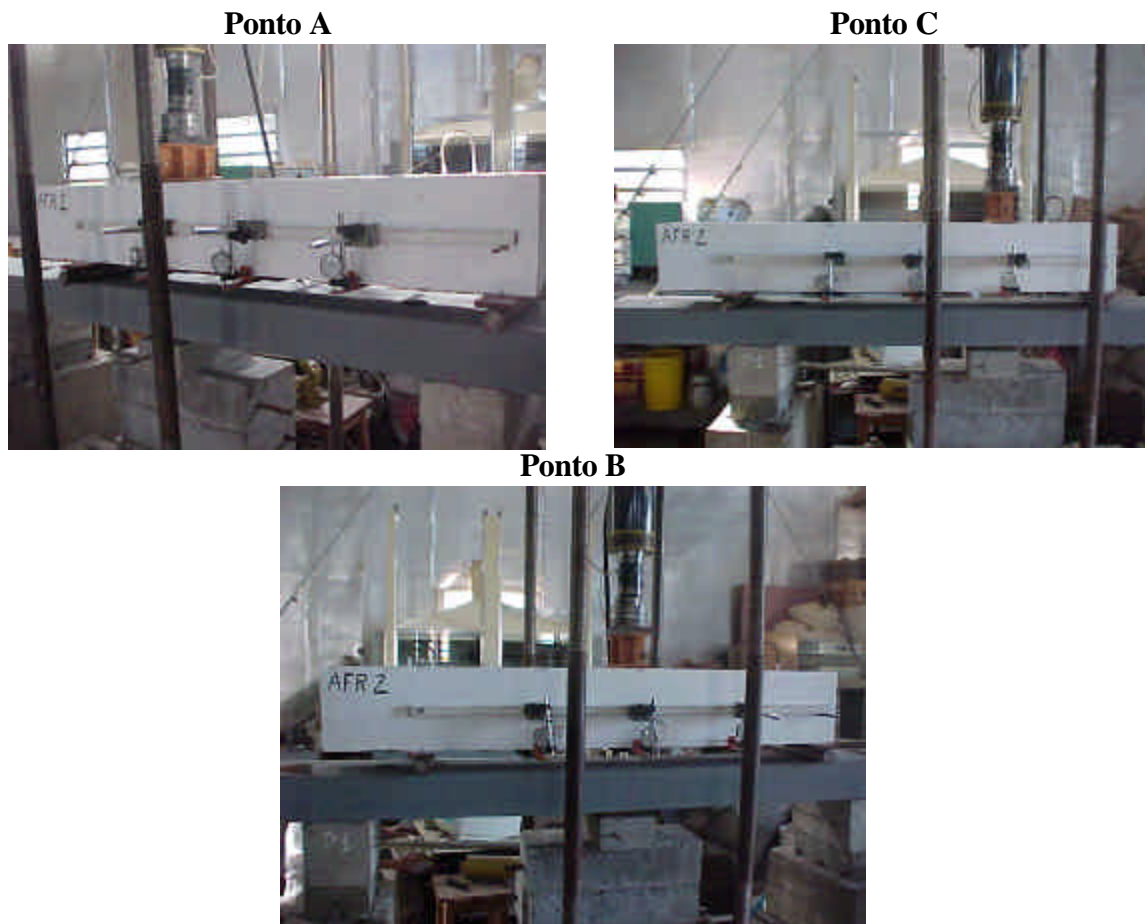


Figura 3.24: Pontos de aplicação das cargas.

### 3.6.2 – Ensaio de Fadiga

Este ensaio foi realizado em todos os protótipos de argamassa (AA, AR1, AR2, AR3, CP, CPA), obedecendo ao mesmo esquema de carregamento no ponto B, conforme mostra a montagem experimental da figura 3.25. Os protótipos foram submetidos a 150.000 ciclos a uma frequência de 10 Hz cuja amplitude máxima vai de 10% a 75% da carga de primeira fissura. Estes valores foram adotados dos trabalhos de Rahman et al. (1987) e Rahman e Mansur (1992).

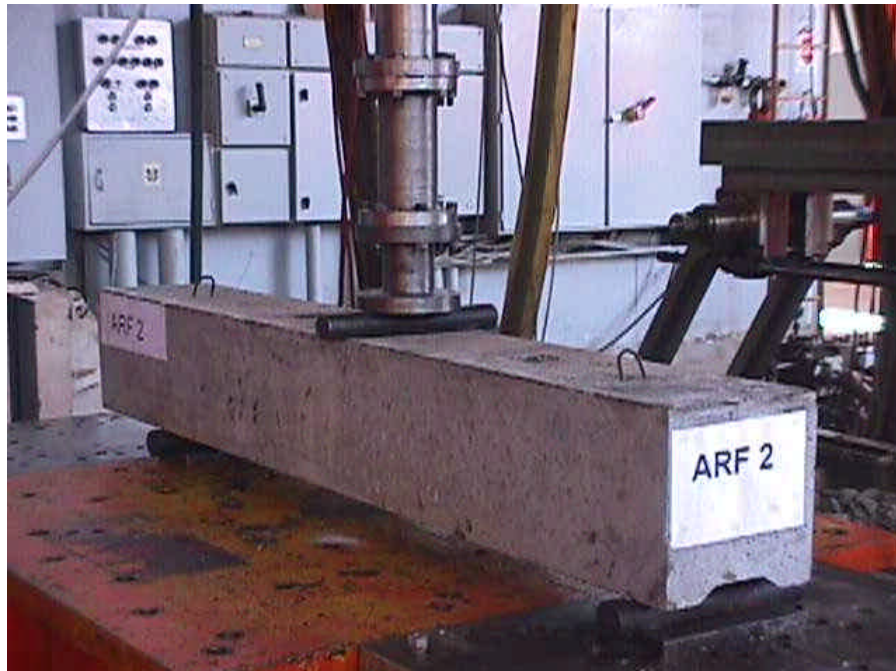


Figura 3.25: Ensaio cíclico realizado nos protótipos.

### 3.6.3 – Ensaio Dinâmico

Uma técnica bastante utilizada para avaliar o desempenho dinâmico de sistemas mecânicos em baixas frequências é a Análise Modal Experimental (AME). Utilizando-se esta técnica os oito modelos de base de máquina-ferramenta, AA, AR1, AR2, AR3, AF, FF, CP, CPA, foram ensaiados experimentalmente, com condição de contorno livre-livre. A montagem para a realização dos ensaios experimentais é mostrada esquematicamente na figura 3.26.

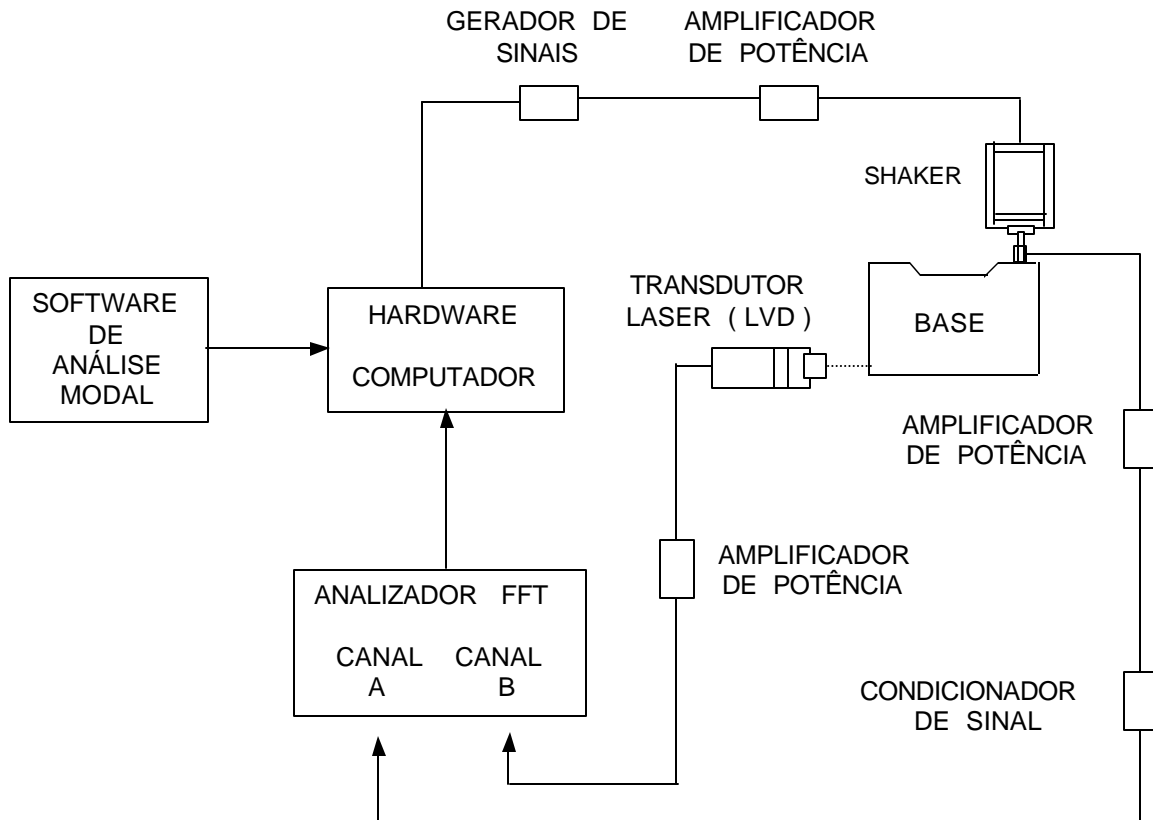


Figura 3.26: Esquema do ensaio experimental.

As bases foram montadas sobre molas pneumáticas a fim de propiciar a condição de contorno livre-livre no sistema experimental (Figura 3.27).



(a)



(b)

Figura 3.27: Montagem experimental do barramento de torno: (a) vista geral; (b) detalhe das molas pneumáticas.

As variações de temperatura durante os ensaios foram desprezadas devido os mesmos terem sido conduzidos em uma sala de testes climatizada com temperatura ambiente constante em torno de 25°C. As bases foram excitadas nas duas direções transversais ao seu comprimento através de um excitador eletrodinâmico. A força foi aplicada através de um *stinger* conectado a um sensor de força piezoelétrico, que por sua vez foi conectado a um inserto metálico colado com cola epóxi / cianocrilato na superfície do barramento (figura 3.28.a). O sinal de um ruído aleatório foi gerado, amplificado e enviado ao excitador. Para cada grau de liberdade de excitação (vertical e horizontal) as velocidades de 54 pontos foram medidas em uma faixa de frequências de DC-1024 Hz através de um vibrômetro laser doppler (LDV) pontual (figura 3.28.b). A fim de melhorar a baixa reflexão das superfícies do barramento e marcar as posições dos pontos de medição, estes foram cobertos com pequenas etiquetas de papel branco. As saídas do transdutor de força e do LDV foram enviadas a um sistema de aquisição de dados (Hewlett Packard VXI-E1401B) e processadas usando um programa computacional comercial de análise modal (LMS CAD-X3.5C).



(a)



(b)

Figura 3.28: Montagem da excitação e medição do sistema: (a) excitação horizontal; (b) excitação vertical e medição da velocidade vertical com LDV.

A análise modal experimental requer a definição de uma geometria de medição, a qual inclui todos os graus de liberdade medidos e excitados. A partir da geometria das bases foi utilizado um sistema de coordenadas cartesiano  $(X,Y,Z)$ , com o eixo  $X$  ao longo do comprimento da base e os eixos  $Y$  e  $Z$  na direção transversal nos sentidos vertical e horizontal, respectivamente. A figura 3.29 mostra os pontos de medição sobre a geometria. Para os pontos de medição de 1 a 18 foram realizadas medições de velocidade nas direções  $Y$  e  $Z$ . Para os pontos de medição de 19 a 36 foram realizadas medições de velocidade apenas na direção  $Z$ , as velocidades na direção  $Y$  foram assumidas como as mesmas medidas nos pontos 1 a 18 na direção  $Y$ . Isto foi possível devido à simetria dinâmica dos modos de vibrar da estrutura. Assim, embora tenham sido medidos apenas 54 pontos de velocidade foi possível realizar a análise modal com 72 pontos de medição de velocidade e duas referências de excitação no ponto 9 nas direções  $-Y$  e  $+Z$ . As funções de resposta em frequência (FRF) foram obtidas na faixa de DC-1024 Hz, com blocos de 1024 pontos, média de 30 blocos e janela Hanning.

A estimação dos parâmetros modais (frequências naturais, amortecimentos modais e modos de vibrar) foi realizada usando-se o programa LMS/CAD-X com o algoritmo da Exponencial Complexa Polireferência no domínio do tempo (VOLD, 1982). Utilizando-se simultaneamente todas as FRFs, o método pode identificar as frequências naturais, coeficientes de amortecimento modais e a forma dos modos de vibrar para todos os modos contidos na faixa de frequência escolhida.

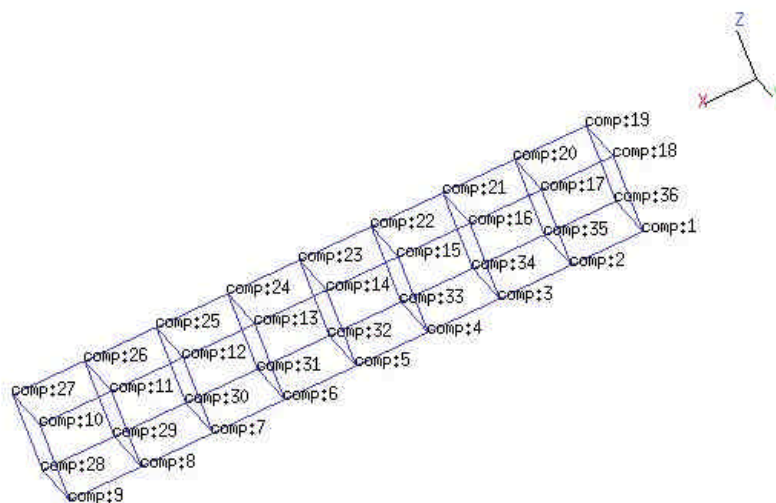


Figura 3.29: Configuração da geometria de medição.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 - Resultados dos Ensaios de Caracterização

Os primeiros ensaios realizados são referentes à caracterização dos materiais empregados na pesquisa, apresentados na tabela 3.12. Os valores determinados para as resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, em função da quantidade de fibras utilizada nas argamassas, estão ilustrados graficamente nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Na figura 4.1 observa-se que a argamassa com 3% de fibras apresentou um ganho de resistência à compressão superior às das demais argamassas. Não foi observado um aumento significativo desta propriedade para os teores de 1% e 2% de fibras. Segundo Fanella e Naaman (1985) o aumento significativo da resistência à compressão acontece com adições superiores a 2% de fibras de aço nas argamassas.

A figura 4.2 mostra que os valores das resistências à tração indireta das argamassas com fibras são muito próximos, apresentando um crescimento de 8% e 15% na incorporação de 2% e 3% de fibras, respectivamente.

A figura 4.3 apresenta para a argamassa com 3% de fibras um módulo de ruptura superior às das demais argamassas. Os valores encontrados são próximos aos verificados por Johnston,

1980, num estudo feito com uma argamassa reforçada com 2,5% de fibras, em volume, cujo valor médio para a resistência à flexão foi próximo de 13 MPa.

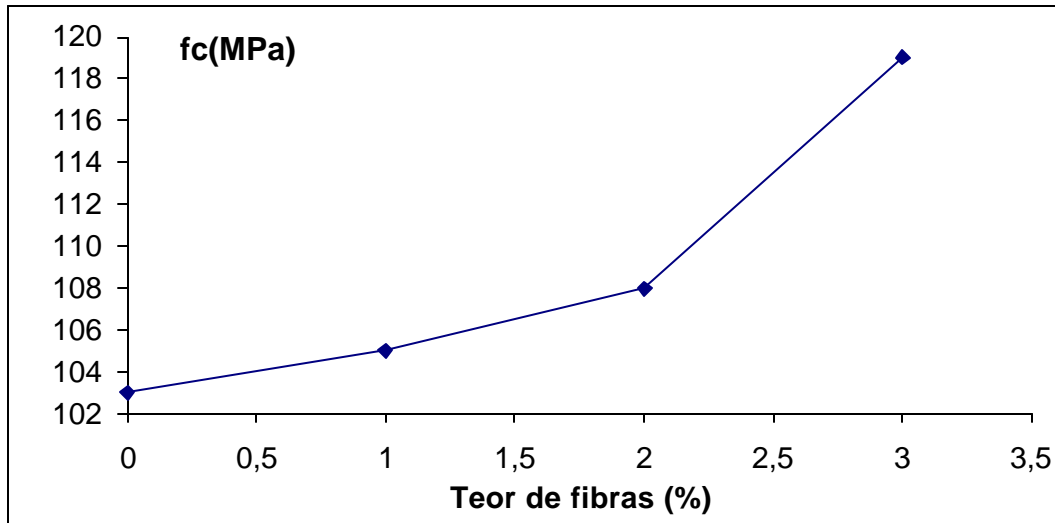


FIGURA 4.1: Resistência à compressão em função do teor de fibras de aço.

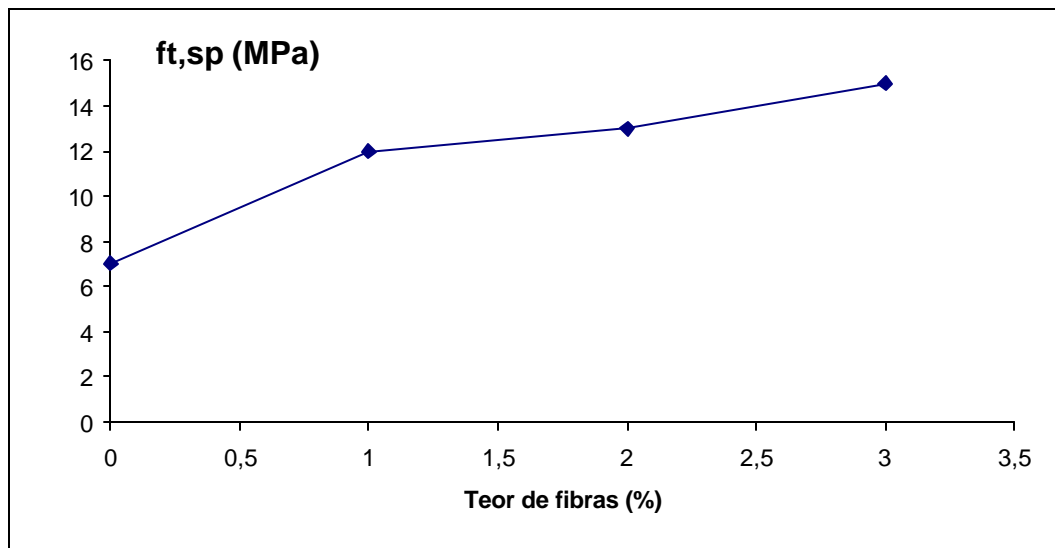


FIGURA 4.2: A evolução da resistência à tração em função do teor de fibras de aço.

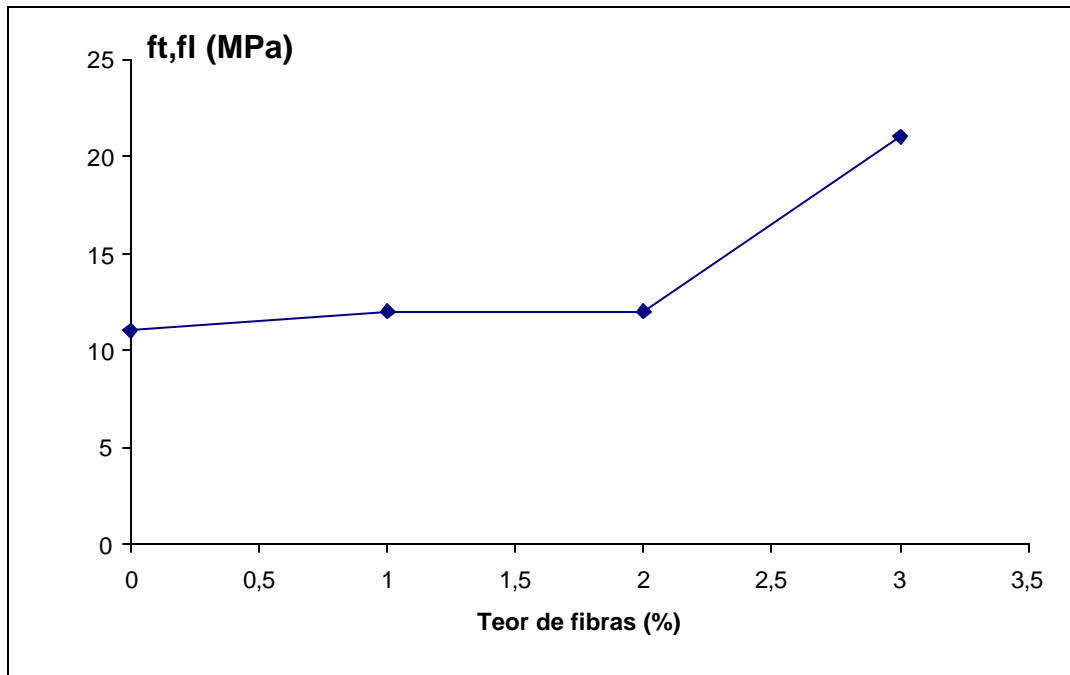


FIGURA 4.3: A evolução do módulo de ruptura em função do teor de fibras de aço.

#### 4.2 - Resultado dos Ensaio Estáticos de Flexão

Durante os ensaios estáticos pode-se verificar uma ruptura brusca na base de argamassa armada e, ao contrário, uma ruptura gradual nas bases armadas com fibras de aço, confirmando o que a literatura diz sobre a mudança do comportamento dos compósitos com o emprego das fibras de aço. De material frágil e ruptura explosiva o compósito passa a ter características de material dúctil com ruptura lenta.

A tabela 4.1 apresenta os valores dos resultados obtidos nos ensaios de flexão dos protótipos de argamassa. Para o concreto polimérico, a rigidez foi estimada teoricamente pelas equações da resistência dos materiais, uma vez que se conhecem as propriedades mecânicas individuais do material.

Pode-se observar na tabela 4.1 que as cargas de primeira fissura não variaram em função do aumento do teor de fibras como era de se esperar, mas as cargas de ruptura aumentaram.



TABELA 4.1: Valores da carga de primeira fissura e da carga de ruptura.

Protótipos	Carga de primeira fissura (kN)			Carga de ruptura (kN)
	ponto A	ponto B	ponto C	ponto B
AA	40	45	40	99
AR1	50	50	70	107
AR2	60	60	60	129
AR3	40	50	40	120

A figura 4.4 apresenta as curvas carga versus deslocamento vertical máximo medidas no meio do vão (ponto B) durante a realização dos ensaios estáticos. Os resultados confirmam o aumento da rigidez estática proporcionado pelo aumento do teor de fibras no compósito.

A figura 4.5 mostra a configuração das fissuras das bases na ruptura com a aplicação da força no ponto B. Comparando-se as bases com e sem fibras de aço, o protótipo sem fibras mostrou pequena ductilidade devido à presença somente da armadura de aço e tela de aço em sua composição, resultando em uma ruptura por esmagamento do compósito. Nas bases com fibras o comportamento dúctil foi evidenciado pelo modo de ruptura observado, em que momentos antes da ruptura última ouviram-se estalos provenientes certamente do escorregamento das fibras de aço na matriz. As fibras não se romperam, mas foram arrancadas da matriz.

Nos modelos com fibras verificou-se um comportamento plástico do material, resultando em uma maior capacidade de absorção de energia (figura 4.5). O protótipo com 3% de fibras de aço apresentou a maior tenacidade traduzida pela área sob a curva carga x deslocamento vertical máximo segundo o ACI 544.1R (1986), confirmando os resultados encontrados por Rahman e Mansur (1992) ao pesquisarem bases de argamassas com diferentes porcentagens de fibras de aço. Estes autores concluíram que, bases com 3% de fibras possuem maior estabilidade dimensional, resistência e rigidez.

Concluído o ensaio estático observou-se que a fissura principal de todas as bases era de flexão e eram muito próximas das linhas de ação das cargas. Analisando-se as bases com 2% e

3% de fibras verificou-se um pequeno deslocamento da fissura principal em relação à linha de aplicação da força, sugerindo que com o aumento da porcentagem de fibras, mais acentuado é este deslocamento. A quantidade de fissuras na ruptura foi também observada, sendo maior o número de fissuras nos protótipos com fibras de aço. Na base sem fibras uma única fissura principal cresceu com o aumento da carga até acontecer uma ruptura explosiva.

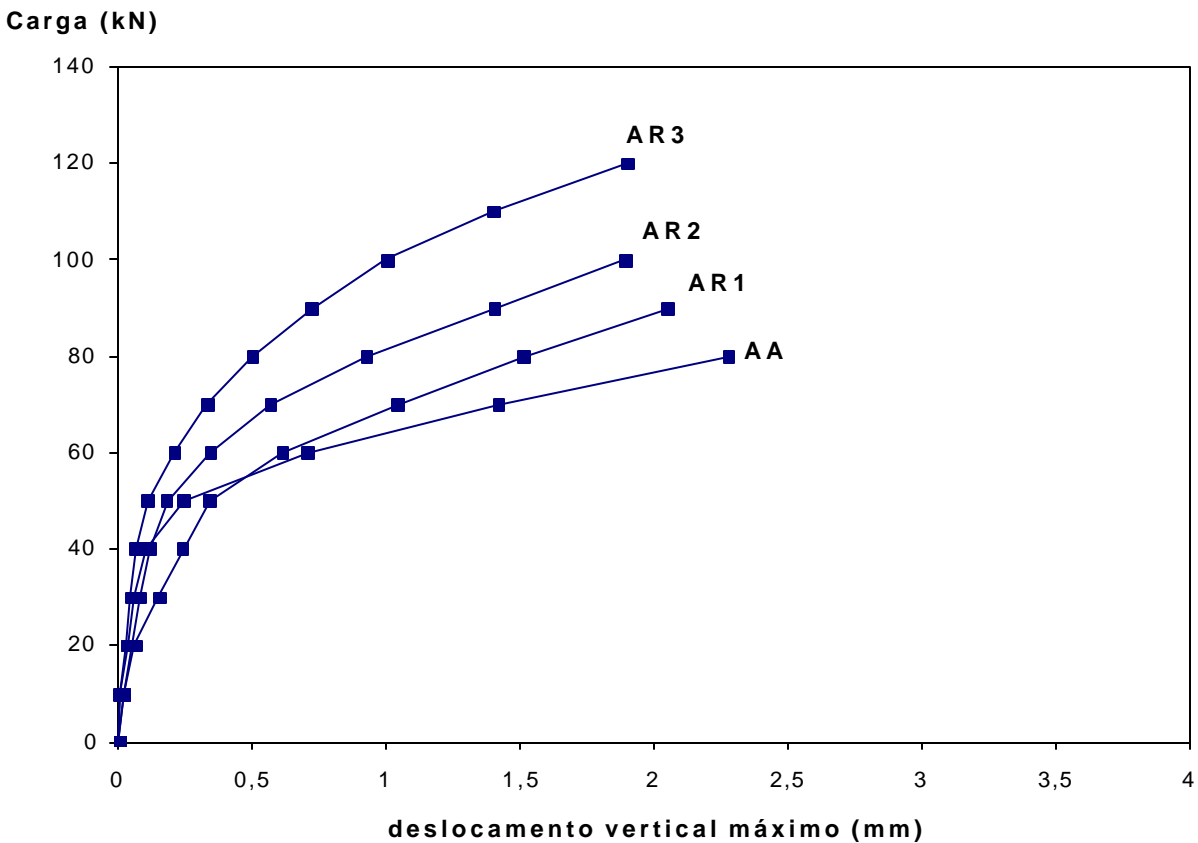
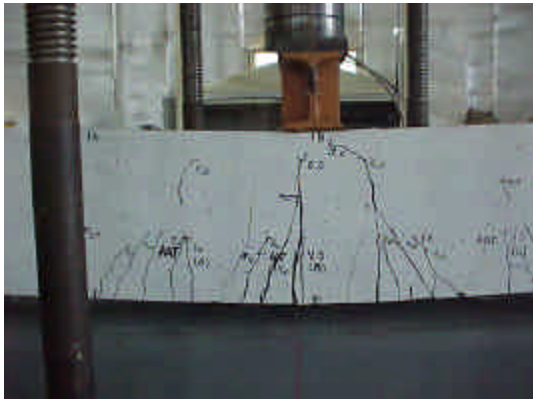
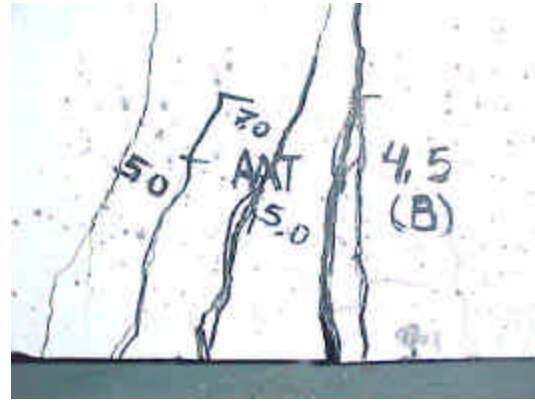


FIGURA 4.4: Curva carga x deslocamento vertical máximo das bases no ponto B.



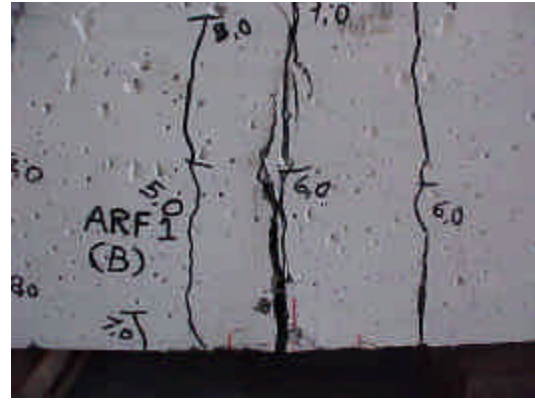
AA



AA



AR1



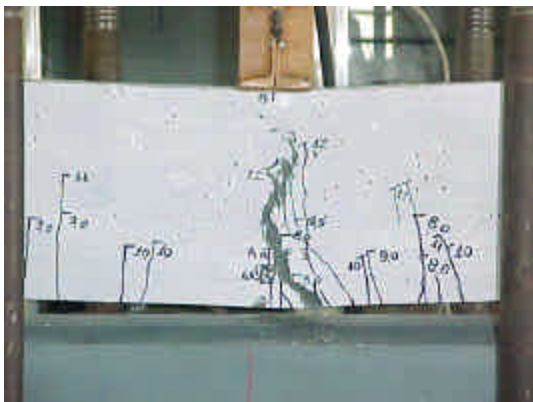
AR1



AR2



AR2



AR3



AR3

FIGURA 4.5: Fissuras na ruptura no ensaio estático (ponto B).

### 4.3 - Resultado dos Ensaios de Fadiga

A tabela 4.2 apresenta os resultados da solicitação cíclica. A quinta coluna mostra o resultado do ensaio de flexão das peças após serem submetidas ao ensaio de solicitação cíclica. A quarta coluna (quinta coluna da Tabela 4.1) mostra os mesmos resultados para peças similares que não foram ensaiadas ciclicamente.

TABELA 4.2: Carga de ruptura antes e depois do ensaio de fadiga.

modelos	Amplitude da solicitação (kN)		Ensaio de flexão (kN) (antes do ensaio de fadiga)	Ensaio de flexão (kN) (após ensaio de fadiga)
	mínima	máxima	carga de ruptura	carga de ruptura
AA	5	37,5	99	87
AR1	5	37,5	107	104
AR2	5	37,5	129	159
AR3	5	37,5	120	129
CP	8	60	-	151
CPA	8	60	-	150

Com exceção da argamassa armada, as demais não sofreram dano causado pelo ensaio de fadiga, paradoxalmente a peça de argamassa reforçada com 2% de fibras teve sua carga de ruptura majorada após o ensaio cíclico. São apresentados nas figuras 4.6 alguns protótipos ensaiados no Centro Tecnológico da Unicamp.

No ensaio de fadiga pode-se, com o auxílio de uma lupa, monitorar o início das fissuras e registrar as cargas de primeira fissura das bases.

As bases com fibras de aço demonstraram comportamento frágil até o aparecimento da primeira fissura e se pode verificar o benefício trazido pela incorporação das fibras de aço que, ao ser solicitada proporcionou um aumento da ductilidade do material. Ocorreram vários estalos com o aumento da carga e abertura de fissuras de 0,15 a 0,20 mm para a carga próxima da ruptura do material.

A base polimérica mostrou comportamento frágil com ruptura brusca sem fissuras aparentes (figura 4.6).

Segundo experimentos realizados por Rahman e Mansur (1992), bases produzidas com fração volumétrica de fibras de aço igual a 3% foram ensaiadas estaticamente e submetidas a carregamento cíclico, a fim de verificar a influência da fadiga na carga de primeira fissura. Os resultados indicam uma diminuição da carga de primeira fissura de 2% na base submetida a carregamento repetido cuja amplitude foi de 25% da carga de primeira fissura. Para carregamentos com amplitudes de 50% e 75% ocorreu respectivamente uma diminuição de 13,2% e 23,3% na carga de primeira fissura.

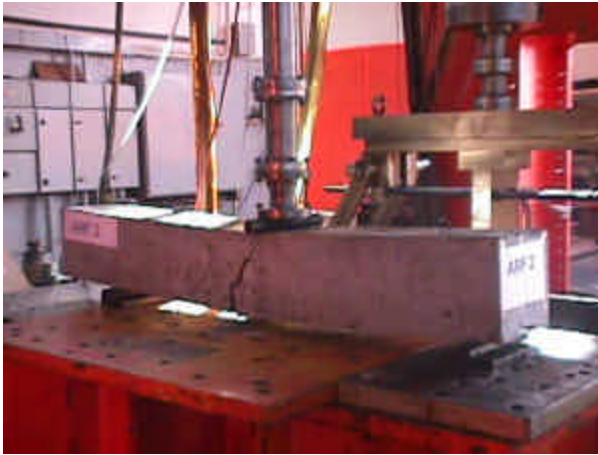
Em contraposição, as resistências últimas não foram influenciadas significativamente pelo ensaio de fadiga.



AA



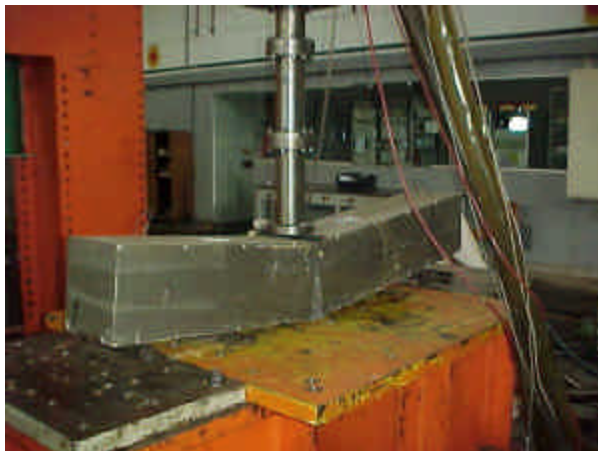
AR3



AR2



AR2



CP



CP

FIGURA 4.6: Protótipos ensaiados à fadiga.

#### 4.4 – Resultados dos Ensaio Dinâmicos

Como regra geral, os 6 primeiros modos deformáveis foram identificados de forma consistente para os 8 barramentos analisados, à exceção do quarto modo do modelo FF. A tabela 4.3 e a tabela 4.4 mostram os resultados numéricos das frequências naturais e dos fatores de amortecimento modais identificados, respectivamente.

TABELA 4.3: Frequências naturais identificadas.

Modos	Frequência natural [Hz]							
	AF	FF	AR1	AR2	AR3	AA	CP	CPA
1 – 1° Flexão Horizontal	387,773	269,437	317,874	321,421	328,032	327,833	237,639	232,027
2 – 1° Flexão Vertical	394,763	284,947	335,717	336,164	330,352	341,473	244,117	260,069
3 – 1° Torção	599,917	401,887	407,440	387,603	409,480	474,453	279,510	314,434
4 – 2° Torção	705,209	N/I*	494,578	509,744	508,098	516,131	339,472	412,347
5 – 2° Flexão Horizontal	943,908	646,399	771,391	764,804	788,163	791,889	583,496	549,719
6 – 2° Flexão Vertical	1011,390	711,305	820,512	840,944	854,801	870,658	628,169	625,531

\* Não Identificado

TABELA 4.4: Amortecimentos modais identificados.

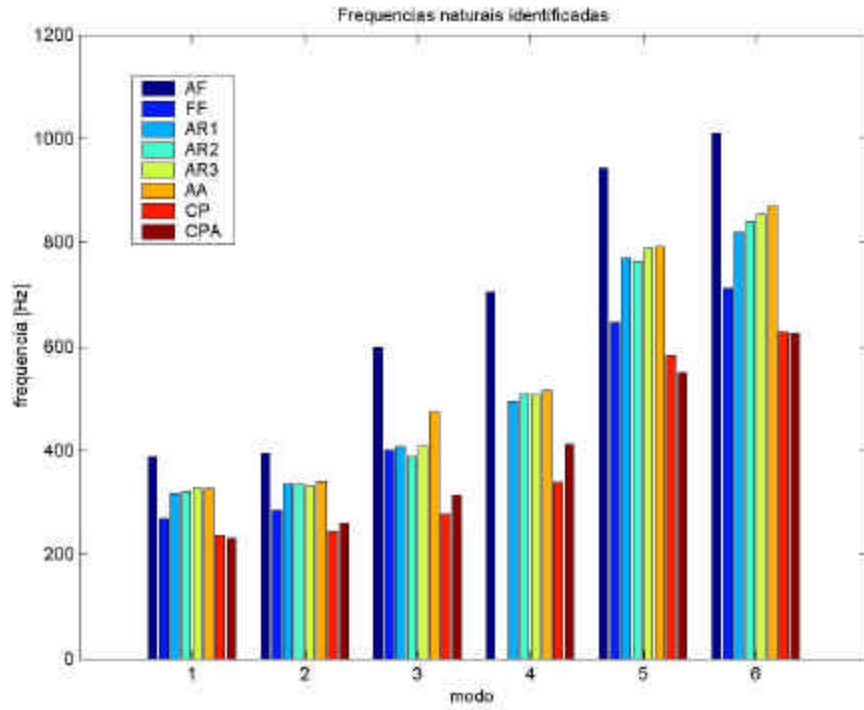
Modos	Fator de amortecimento modal [%]							
	AF	FF	AR1	AR2	AR3	AA	CP	CPA
1 – 1° Flexão Horizontal	0,344	0,458	0,706	0,457	0,517	0,586	0,526	0,511
2 – 1° Flexão Vertical	0,216	2,239	1,568	0,714	0,376	1,997	0,526	2,900
3 – 1° Torção	0,936	0,767	1,237	0,640	2,430	0,788	0,793	0,641
4 – 2° Torção	0,687	N/I*	0,203	0,487	0,461	0,365	1,134	0,518
5 – 2° Flexão Horizontal	0,140	0,583	0,775	0,502	1,377	0,426	0,848	0,778
6 – 2° Flexão Vertical	0,751	0,183	1,189	0,733	0,653	0,778	0,717	0,642

\* Não Identificado

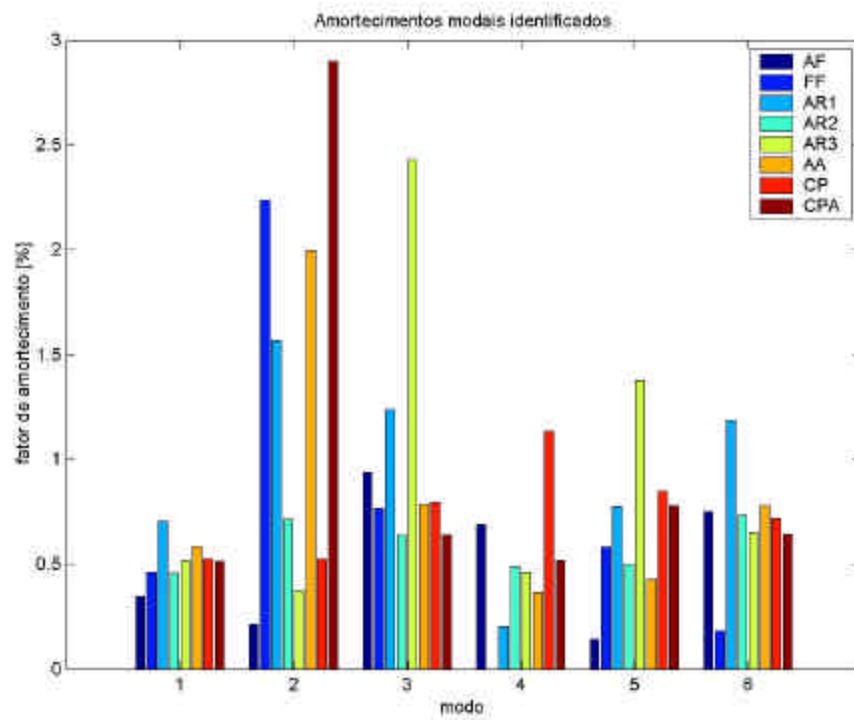
Os gráficos da figura 4.7 permitem uma melhor análise desses resultados. Na figura 4.7a observa-se que para os 6 modos de vibrar analisados, como era esperado, há uma clara predominância de frequências mais altas no modelo de aço (AF), seguido pelos modelos de argamassa (AR1/AR2/AR3 e AA), de ferro fundido (FF) e finalmente os de polímero (CP e CPA). Essa tendência se verifica em todos os modos, com exceção feita aos modelos de argamassa que apresentam algumas inversões entre si nos diferentes modos. A figura 4.7b mostra uma análise similar para o amortecimento modal. O modelo de aço (AF) apresenta o comportamento esperado, ou seja, o menor amortecimento em quase todos os modos analisados, exceção feita ao modo 6. Contudo, para os outros modelos observa-se que o amortecimento apresenta grandes variações em função do modo.

No modo 1 não existem variações muito significativas entre os modelos, onde todos os valores são inferiores a 0,75 % e o modelo AR1 apresenta o amortecimento mais alto. No modo 2 o valor de amortecimento de CPA é bem alto (2,9%) seguido por FF, AA e AR1, com valores acima de 1,5 % e bem acima dos valores identificados para todos os outros modelos. No modo 3 destaca-se o amortecimento do modelo AR3 (2,43 %) bem acima dos demais. Nos modos 4, 5 e 6 predominam os modelos CP, AR3 e AR1, respectivamente, todos na faixa de 1 a 1,5 % enquanto os demais apresentam valores inferiores a 0,85 %. Com base nestes resultados fica difícil estabelecer um critério preciso de escolha do material que introduzirá um amortecimento mais efetivo na estrutura como um todo, ou seja, aquele com a maior contribuição de amortecimento em todos os modos. A fim de observar melhor tal contribuição, e minimizar os vieses introduzidos pelos valores mais altos presentes nos diferentes modos, construiu-se o gráfico da figura 4.8 o qual apresenta a mediana dos amortecimentos dos 6 modos identificados em função dos modelos analisados. Do gráfico observa-se claramente a predominância do modelo AR1, como o que apresenta a maior contribuição nos 6 modos, seguido pelos modelos CP, AA, CPA, AR3, AR2, FF e AF. Tais resultados corroboram alguns dos resultados encontrados na literatura (Rahman et al., 1989; Rahman e Mansur, 1992; Kane, 1991), os quais apresentam os modelos de argamassa com baixo percentual ou sem fibras e os modelos de argamassa polimérica como tendo características de amortecimento mais efetivas do que aquelas obtidas nos modelos tradicionais de ferro fundido e aço fundido.





(a)



(b)

FIGURA 4.7: Resultados identificados: (a) frequências naturais e (b) amortecimentos modais.

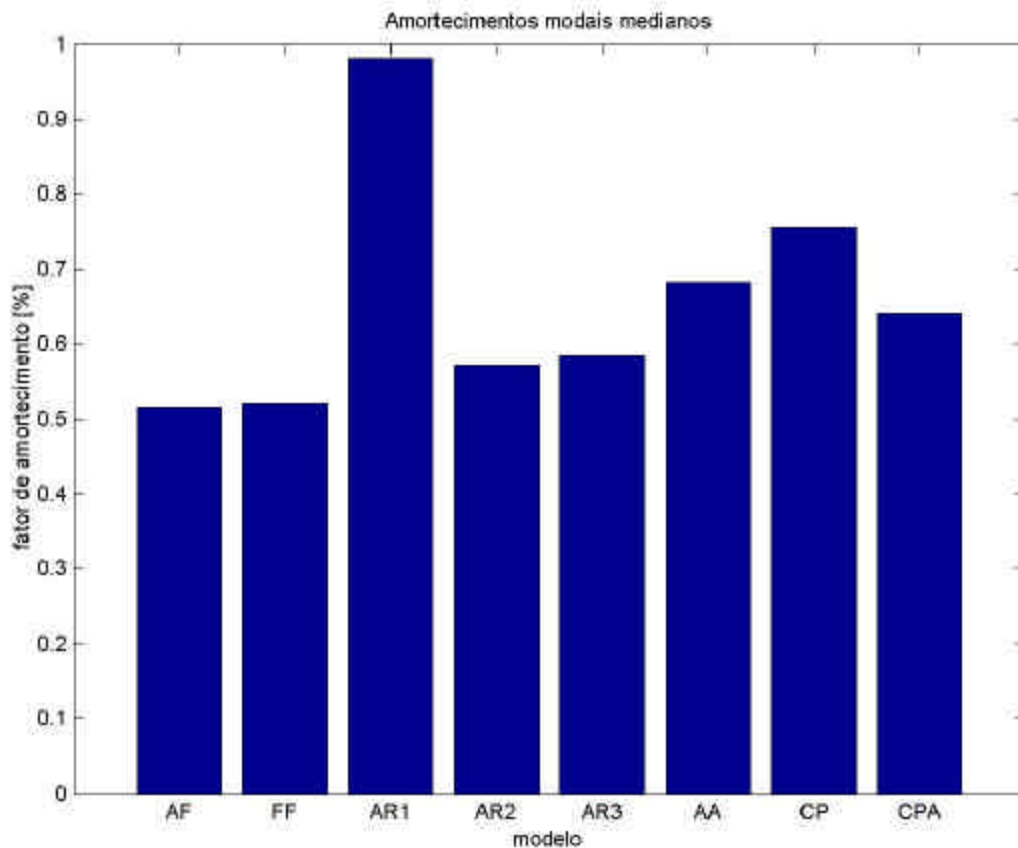


FIGURA 4.8: Amortecimentos modais medianos.

Embora o gráfico da figura 4.8 demonstre esta tendência, é necessário reavaliar os resultados dos amortecimentos em cada modo através de uma análise modal mais refinada em cada um dos modos identificados. Tal análise permitirá aumentar a precisão na identificação dos amortecimentos e possivelmente diminuirá as dispersões de alguns dos amortecimentos identificados com valores bem maiores que os outros em modos diferentes.

A figura 4.9 mostra as formas dos modos de 6 barramentos (AF, FF, AR3, AA, CP e CPA), onde foram omitidas as dos modelos AR1 e AR2 por não apresentarem diferenças significativas em relação àsquelas do AR3.













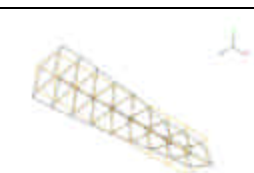








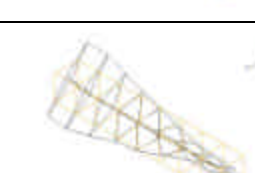
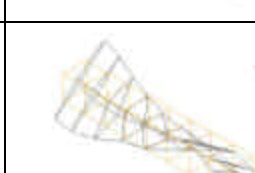
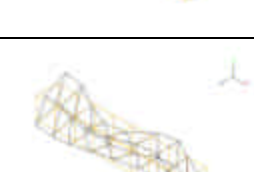





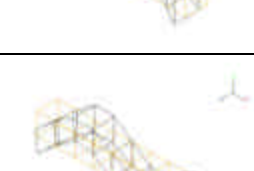

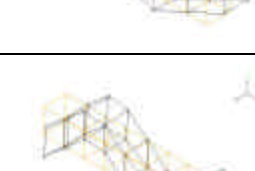
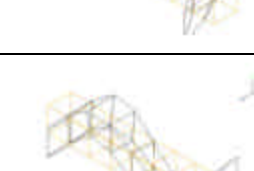
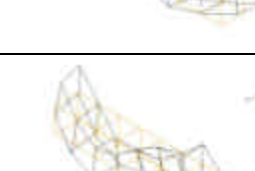
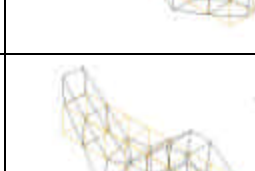
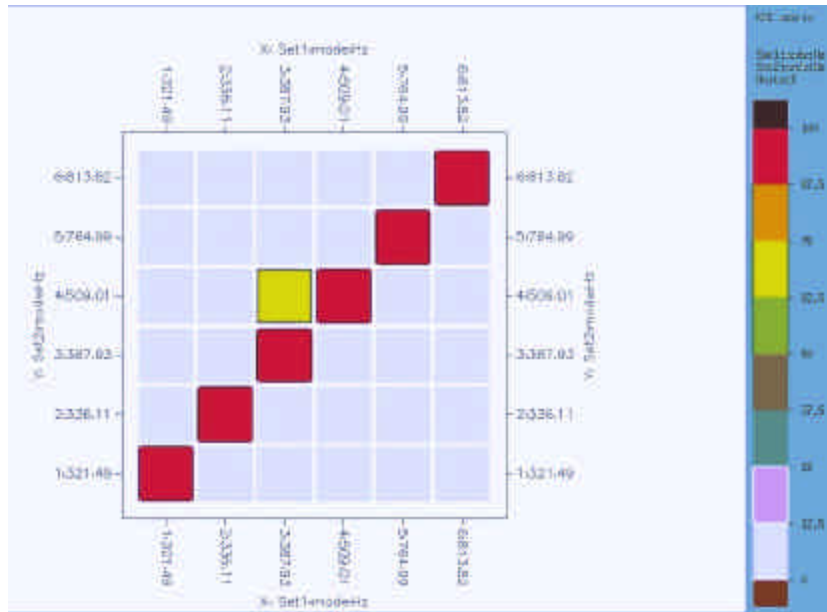
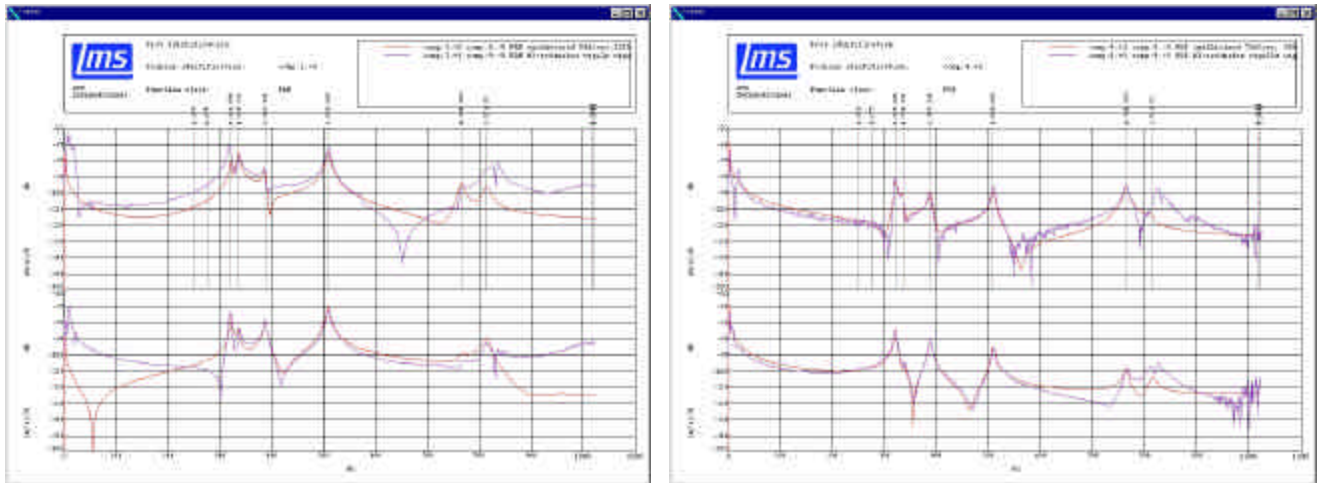
<i>Modos</i>	<b>AF</b>	<b>AR3</b>	<b>AA</b>	<b>FF</b>	<b>CP</b>	<b>CPA</b>
<b>1º Flexão Horiz.</b>						
<b>1º Flexão Vertical</b>						
<b>1º Torção</b>						
<b>2º Torção</b>				<b>Não Identificado</b>		
<b>2º Flexão Horiz.</b>						
<b>2º Flexão Vertical</b>						

Figura 4.9: Formas dos modos de vibrar dos barramentos.

Para o caso do modelo AR2 são mostrados os resultados da matriz do Critério de Confiança Modal – MAC (figura 4.10a) e quatro FRF's com valores medidos e sintetizados (figura 4.10b). Este resultado pode ser tomado como um caso típico que, na média, representa aqueles ocorridos nos outros modelos e demonstra a confiabilidade na identificação dos parâmetros modais experimentais.



(a)



(b)

FIGURA 4.10: Verificação da identificação do modelo AR2: (a) matriz do critério de confiança modal (MAC); (b) FRF's médias e sintetizadas.

## Capítulo 5

### 5.1 – Conclusões

Neste trabalho 12 modelos em escala natural, simplificados, de barramentos de torno, foram fabricados com os seguintes materiais: aço fundido, ferro fundido, argamassa armada de alto desempenho, argamassa reforçada com fibras de aço de alto desempenho e concreto polimérico.

O objetivo foi comparar os comportamentos estático e dinâmico dos diversos modelos feitos com os mencionados materiais quando eles são utilizados na fabricação de um barramento de torno.

Inicialmente os modelos foram submetidos ao ensaio de flexão estática, para se determinar as cargas de primeira fissura e a carga de ruptura. Somente foram ensaiados os modelos construídos de argamassa de cimento hidráulico. No ensaio de primeira fissura, até uma faixa de carga de 40 a 70 kN, nenhuma fissura foi observada nos modelos de argamassa armada. Portanto, os barramentos de argamassa são capazes de suportar cargas freqüentemente encontradas na operação de máquinas-ferramenta, como os tornos. Os deslocamentos verticais máximos encontrados para as peças de argamassa ensaiadas não alcançaram 1 mm para as cargas mencionadas acima. Para cargas menores os deslocamentos verticais devem ser muito menores. Portanto, as deformações dos barramentos devido ao carregamento estático são mínimas. A partir de uma faixa de carga que variou de 40 a 70 kN, para os diversos modelos ensaiados, apareceram as primeiras fissuras. Com o aumento posterior do carregamento o número de fissuras aumentou. A ruptura por flexão dos barramentos ocorreu para o carregamento no centro do vão na faixa de 90 a 130 kN. Se se admite que a ruptura acontece no início da fissuração, então os barramentos de argamassa são capazes de resistir cargas variando de 40 a 70 kN. Um barramento real não é

submetido a uma carga tão alta em serviço. Portanto, do ponto de vista da rigidez e da resistência, os modelos de argamassa são capazes de desempenhar seus papéis como um barramento de máquina-ferramenta.

A relação entre a carga aplicada no centro do vão e o correspondente deslocamento vertical, na fase elástica, antes do início da fissuração, foi aqui definido como a rigidez estática (Rahman e Mansur, 1992). Um nível de carga de 40 kN foi usado para este propósito. Os valores obtidos nos ensaios e os calculados estão mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados dos Ensaio Estáticos

Modelo	Carga		Deslocamento vertical no centro do vão		Rigidez (kN/mm)
	$P_{cr}$ (kN)	$P_u$ (kN)	$c_r$ (mm)	$u$ (mm)	
AA	45	99	0,25	4,10	381
AR1	50	107	0,35	3,10	166
AR2	60	129	0,35	2,65	347
AR3	50	120	0,11	2,10	615

$P_{cr}$  = carga correspondente à primeira fissura

$P_u$  = carga correspondente à ruptura na flexão

$c_r$  = deslocamento vertical correspondente à primeira fissura

$u$  = deslocamento vertical correspondente à carga de ruptura

Da tabela 5.1, pode ser visto que os barramentos AR2 e AR3, com 2% e 3% de fibras, apresentam rigidez igual ou maior que o barramento de argamassa armada. Uma vez que foi demonstrado em trabalhos anteriores de Rahman et al. (1987), que o barramento de argamassa armada tem rigidez suficiente, é razoável supor-se que o volume de fibras maior ou igual a 2% satisfaça os requisitos de rigidez.

A carga, correspondente à ruptura, suportada pelos barramentos é mostrada na tabela 5.1. Nota-se que os valores da resistência última para todos os modelos reforçados com fibras são gradativamente maiores do que o correspondente ao barramento de argamassa armada. Mesmo considerando que o modelo AR3, reforçado com 3% de fibras, apresenta uma taxa de armadura

global (fibras) aproximadamente igual à taxa de armadura (tela soldada), a resistência última do modelo AR3 suplanta a do AA.

Em resumo, do ponto de vista do estudo estático com os barramentos de argamassa, as seguintes conclusões podem ser extraídas: (a) as flechas para cargas até 40 kN foram menores que 0,5 mm; (b) as primeiras fissuras apareceram com a carga variando de 40 a 70 kN, conforme o modelo de ensaio era construído de argamassa armada ou reforçado com fibras e, também, conforme variou o teor de fibras incorporado; (c) a ruptura na flexão dos modelos de argamassa ocorreu na faixa de 90 a 130 kN, conforme se tratava de argamassa armada ou reforçada com fibras nos três teores estudados; (d) a rigidez à flexão aumentou conforme o teor de fibras, nas argamassas reforçadas.

Os modelos de argamassa armada e os reforçados com fibras foram ensaiados a solicitação cíclica na flexão segundo uma frequência de 10 Hz, amplitude de 10% a 75% da carga de primeira fissura durante 150.000 ciclos. O que se pode notar é que este tipo de solicitação não influenciou na resistência à flexão dos modelos. Isso foi comprovado comparando-se os resultados de flexão simples, com carregamento no centro do vão dos modelos, obtidos com modelos virgens e com modelos submetidos anteriormente ao ensaio de fadiga. Rahman e Mansur, 1992 chegaram a mesma constatação trabalhando com um modelo idêntico de barramento, feito de argamassa de resistência 40 MPa, reforçado com 3% de fibra, nas mesmas condições do ensaio descrito acima.

Os modelos de concreto polimérico também foram submetidos ao ensaio de fadiga, nas mesmas condições descritas acima. Mas por motivo de restrição financeira, a comparação entre as resistências à flexão de modelos ensaiados e não ensaiados à fadiga não foi feita. Também por restrição financeira, os modelos feitos de metal aço e ferro fundido e os de concreto polimérico não foram ensaiados estaticamente, para a determinação de carga de primeira fissura e da carga de ruptura a flexão na condição de corpo-de-prova virgem. Assim, a rigidez estática desses modelos não pôde ser determinada. Mas, no caso dos modelos feitos de metais acredita-se que esta constante ficaria bem acima dos valores correspondentes para as argamassas de cimento e, no caso dos modelos de concreto polimérico, ficariam bem abaixo considerando que o módulo de elasticidade deste material alcançou 18 GPa, contra 40 GPa em média, para as argamassas.

Na análise do comportamento dinâmico fica clara a identificação dos 6 primeiros modos de vibrar dos modelos em termos de seus parâmetros modais. Como era esperado, a predominância do modelo de aço (AF) sobre os demais, em termos de frequências naturais mais altas em todos

os modos, demonstra que os materiais alternativos analisados terão uma tendência em reduzir os valores das frequências naturais em todos os modos, quando comparadas àquelas obtidas com o modelo AF.

Comparando-se o modelo de ferro (FF) com os de materiais alternativos, verificam-se frequências naturais mais altas nas argamassas de cimento hidráulico.

Os resultados do amortecimento modal confirmam alguns dos resultados da literatura, com relação ao aumento do amortecimento global dos modelos com materiais alternativos em relação àqueles tradicionais. Analisando-se os amortecimentos modais medianos observa-se que tanto os modelos de argamassas de cimento hidráulico como os poliméricos apresentam resultados superiores aos dos modelos tradicionais AF e FF. Contudo, maiores investigações devem ser realizadas no que se refere à contribuição no aumento do amortecimento em cada modo isoladamente.



## Referências Bibliográficas

AGUADO, A. ; AGUILLÓ, L. ; CÁNOVAS, M. F. ; SALLA, J. M. Diagnóstico de Daños y Reparación de Obras Hidráulicas de Hormigón. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Espanha, 1996.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Polymers in concrete, SP-40, Detroit, 1973, 362 pp.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 4. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-82). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1982, 16p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Design considerations for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1988, 18p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 5. ACI. Measurement of properties of fiber reinforced concrete (ACI 544.2R-89). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1989, 11p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard practice for selecting proportions for normal, heavy weight and mass concrete: ACI Committee 211. In: ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, USA, 1991, v.2.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 5. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete (ACI 544.3R-93). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993, 10p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Polymer concrete – structural applications state-of-the-art report (ACI 548.6R-96) ACI Committee 548, USA, 1996, 23p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the use of polymers in concrete (ACI 548.1R-97) ACI Committee 548, USA, 1997, 29p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM A 820-90 – Standard specifications for steel fibers for fibers reinforced concrete. Detroit, 1990, 3p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 39-86 – Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 192-90a, Making and curing concrete test specimens in laboratory, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 496-90 - Test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C 230-90. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, Philadelphia, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 31-91 - Making and curing concrete test specimens in the field, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 1018-94b - Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), Detroit, 1992, 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 109-93 – Test for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. Or 50-mm cube specimens), 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 78-94 . Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading), Philadelphia, 1994, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1974). NBR 05739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1978). NBR 05738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR 07251- Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR 07211- Agregados para concreto. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR 11768 (EB-1763/92). Aditivo para concreto de cimento portland -Especificações. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 08522- Concreto - Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 09776 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 09937- Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 07217- Agregado - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991). NBR 12142- Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). NBR 07222- Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- BANTHIA, N.; TROTTIER J.F., Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part ii: Toughness Characterization, ACI Materials Journal, Proceedings v. 92, n 2, March-April 1995, pp. 146-154.
- BENTUR, A. ; MINDESS, S., Fiber Reinforced Cementitious Composites. United Kingdon. Barking, Elsevier. 1990.
- BS 1881: Part 108: 1983 - Method for making test cubes from fresh concrete
- BS 1881: Part 110: 1983 - Method for making test cylinders from fresh concrete
- BS 1881: Part 116: 1983 - Method for determination of compressive strength of concrete cubes.
- COMPOSITES INSTITUTE, “2.0 – Test method for compressive strength of cylindrical polymer concrete specimens” in AF-142 Polymer Concrete Test Methods, The Society of the Plastics Industry, Inc., New York, 1986, p 2-4.
- COMPOSITES INSTITUTE, “5.0 – Test methods for flexural strength of polymer concrete (using simple beam with third-point loading)” polymer concrete test methods, The Society of the Plastics Industry, Inc., New York, 1986, 4p.
- CHUA K. N., RAHMAN M. and MANSUR M. A.. Performance Evaluation of Machine Tool Structures Using Modal Analysis Technique, I. J. of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 2(1), 1987.
- CRANFIELD MOULDED STRUCTURES, “Designing Machines in Granite Composites”, Engineering Materials & Design, June 1987.

- DUCATTI, V. A.. Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura. SÃO PAULO,1993, 292p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- EDGINGTON, J., HANNANT, D. J. & WILLIAMS, R. I. T., Steel Fiber Reinforced Concrete. Current Paper CP 69/74, Building Research Establishment, Garston, Watford, 1974, 17 pp.
- FANELLA, D. A. , NAAMAN, A. E., Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression, ACI Journal, Proceedings v. 82, n 4, July-Aug. 1985, pp. 475-483.
- FIGUEIREDO, A. D. Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço. São Paulo, 1997, 342p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FOWLER, D. W.. Worldwide Use of Polymer Concrete. In: ANNUAL CONFERENCE, 44, Washington, Feb. 6-9, 1989. Proceedings. Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc. 1989. Session 21-A, p.1-5.
- GOPALARATNAM, V. S., SHAH, S. P., Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Concrete – Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, May 1987a, pp. 1-25.
- HABER, R. B. Domes – Air Supported Forming: Will It Work ? Concrete International: Design & Construction, v. 8, n 1, Jan.1986, pp. 13-17.
- HANAI, J. B. Construções de Argamassa Armada, Pini, 1992.
- HEITMANN H. AND E VENKATRAMAN V.. Investigation on the Use of Prestressed and Reinforced Concrete as Material for Machine Tool Structures. In Proceedings of the 4<sup>th</sup> All India Conference on Machine Tools Design and Research, IIT Madras, India, 1970, pp. 287-299.
- HENAGER, C.H. Use of Steel Fiber Reinforced Concrete in Containment and Explosive Resistant Structures, Symposium Proceedings, Interaction of on Nuclear Munitions with Structures, U.S. Air Force Academy, Colorado, May 1983, pp. 199-203.
- HSU, H. T., and FOWLER, D. W., Creep and Fatigue of Polymer Concrete, Polymer Concrete: Uses, Materials, and Properties, SP-89, American Concrete Institute, Detroit, 1985.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of making specimens for strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE – SF 2, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n 3, June 1984, p. 49-55.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE – SF 4, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n 3, June 1984, p. 58-61.

- JOHNSTON, C.D. Steel Fiber Reinforced Concrete pavement Trials, *Concrete International: Design & Construction*, v. 6, n 12, Dec. 1984, pp. 39-43.
- JOHNSTON, C. D., *Progress in Concrete Technology*, ed. MALHOTRA, V. M., CANMET, Ottawa, 1980.
- KANE, JOHN F., Polymer Concrete Machine Tool Components, *International Congress on Polymers in Concrete, North American Workshop*, San Francisco, Sept. 1991.
- KOBLISCHEK, P.J. Acryl-Concrete. *Proc. Second International Congress on Polymers in Concrete*, 1978, pp. 413-430.
- KOBLISCHEK, P.J. Motema – AC the Non-Metallic Casting Material-6years After its Introduction. *Proc. 5<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete*, 1987, pp. 139-43
- KOBLISCHEK, P.J. Motema-AC the Material with the Highest Damping and Rigidity – Ideal for Laser Machines. *Proc. 3<sup>rd</sup> European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT' 90*, vol. 2, 1990, pp. 949-960.
- KOBLISCHEK, P.J. Polymer Concrete as an Alternative Material for Grey Cast Iron and Welded Steel Construction in the Machine Tool Industry. *International Symposium on Brittle Matrix Composites*, Frankfurt, 1991, pp 529-538.
- KREIENBÜHL R., *International Congress on Polymers in Concrete, North American Workshop*, San Francisco, Sept. 1991.
- KREIENBÜHL R., *Granitan:10 Yahrige Erfahrung im Werkzeug Maschenenbau*, Technische Hochschule Darmstadt, Germany, March 1988.
- KRENCHER H., *Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44*, 1974, pp.45-77.
- LAWS, V., The Efficiency of Fibrous Reinforcement of Brittle Matrices. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 1971, pp 1737-46.
- Manual Técnico da Máster Builders Technologies do Brasil*, vol.1, 2000.
- MEHTA, P. K. E MONTEIRO. P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, PINI, 1994.
- MELAMED, A. , *Fiber Reinforced Concrete In Alberta*, *Concrete International: Design & Construction*, v. 7, n 3, Mar. 1985, pp. 47-50.
- MINDESS, S. *Fiber Reinforced Concrete: Challenges and Prospects*. In: *Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced materials*. Toronto, Canada, 1995. p.1-12.

- MORGAN, D.R. Dry Mix Silica Fume Shotcrete in Western Canada, *Concrete International: design & Construction*, v. 10, n 1, Jan. 1988, pp. 24-32.
- NEELAMEGAM, M., and PARAMESWARAN, V. S., Impact and Abrasion Resistance of Glass Fiber Reinforced Resin Mortar Composites, *Polymers in Concrete, Seventh International Congress on Polymers in Concrete*, Science Business Contact International, Moscow, 1992, pp. 314-330.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. PINI Editora, São Paulo, S.P., 1982.
- OHAMA, YOSHIHIKO, Worldwide Industrial Activities, Standardization Work, and Recent Trends in Japan with Concrete-Polymer Composites, “ International Congress on Polymers in Concrete, North American Workshop, San Francisco, Sept. 1991.
- PATUROEV V. V., VOLGUSHEV A. N., ELFIMOV V. A., Peculiarities of Polymer Concrete Application in the Machine-Tool Industry, *International Congress on Polymers in Concrete*, 1987, pp. 159-161.
- PETRUCCI, E.G.R. *Materiais de Construção*. Editora Globo.1995.
- PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de Cimento Portland*. Editora Globo.1995.
- PINTO Jr., N. O. ; MORAES, A.A. Concreto Reforçado com Fibras de Aço CRFA. In: 38ª Reunião do IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Ribeirão Preto, SP. 19 a 23 de agosto de 1996. Anais. v.2. p. 471-9.
- PURQUERIO, B. M.; *Granito Sintético*. Laboratório de Máquinas Ferramentas - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1988.
- PURQUERIO B. M., FORTULAN C. A., WREGGE, P. A. S.; A Injeção de Cerâmica Avançada para a Produção de Componentes. *Máquinas e Metais*, Julho 1994, pp 73 – 83.
- RAHMAN, M., MANSUR, M. A., AMBROSE, W.D., CHUA K.H.; Design, Fabrication and Performance of a Ferrocement Machine Tool Bed. *International Journal of Machine Tools Manufacture*. v. 27(4), 1987, pp.. 431-442.
- RAHMAN, M., MANSUR, M. A, CHUA K. H., A Study on the Application of Cementitious Materials for Machine Tool Structures. *Bull. Japan Society of Proc. Eng.*. vol. 23, n 2, June 1989, pp 94-99.
- RAHMAN, M. e MANSUR, M. A.; Fibre Reinforced Concrete – A New Material for Machine Tools. *International Journal of Japan Society for Precision Engineering*. v. 26(3), September 1992, pp. 183-188.

- RAHMAN, M., MANSUR, M. A., L.K. LEE, J. K. LUM, “Development of Polymer Impregnated Concrete Damping Carriage for Linear Guideways for Machine Tools” International Journal of Machine Tools & Manufacture, n° 41, 2001, p. 431-441.
- RAMAKRISHNAN, V.; BRANDSHAUG, T.; COYLE, W. V.; SCHRADER, E. K., “A Comparative Evolution of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Fibers with Deformed ends Glued Together into Bundles”. ACI Journal, Proceedings V. 77, n° 3, May-June 1980, pp.135-143.
- RAMAKRISHNAN, V.; OBERLING, G.; TATNALL, P., “ Flexural Fatigue Strength of steel Fiber Reinforced Concrete”. Fiber Reinforced Concrete-Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp.225-245.
- ROMUALDI, J. P. e BASTÓN, G. B., Mechanics of Crack Arrest in Concrete. ASCE, J. Eng. Mech. Div., vol. 89, 1963, pp. 147-168.
- ROMUALDI, J. P. e MANDEL, J. A., Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths Of Wire Reinforcement. J. American Concrete Institute, vol. 61, 1964, pp 657 – 671.
- SHAH, S. P.; STROEVEN, P.; DALHUISEN, D.; VAN STEKELENBURG, P., Complete Stress-Strain Curves for Steel Fiber Reinforced Concrete in Uniaxial Tension and Compression, Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites, RILEM Symposium 1978, Construction Press, Lancaster, pp. 399-408.
- SILVA, P. F. A.; MENTONE, F. J. ; PITTA, A. C.,Controle da Qualidade de Pavimentos de Concreto Contendo Fibras: Um Caso Real. In: 38ª Reunião do IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Ribeirão Preto, SP. 19 a 23 de agosto de 1996. Anais. V.1. pp.15-22.
- SOCIETY OF THE PLASTICS INDUSTRY, INC.. (SPI – 2.0). Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Polymer Concrete Specimens. Polymer Concrete Test Methods, New York, USA.
- SOCIETY OF THE PLASTICS INDUSTRY, INC.. (SPI – 5.0). Test Methods for Flexural Strength of Polymer Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Polymer Concrete Test Methods, New York, USA.
- SOPLER, S., FIORATO, A. E., LENSCHOW, R., A Study of Partially Impregnated Polymerized Concrete Specimens, Polymers in Concrete, SP-40, American Concrete Institute, Detroit, 1973, pp 149-172.
- SWAMY, P. S., MANGAT P. S. and RAO, C. V. S. K., Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, 1974, pp. 1-28.
- SWAMY, R. N. and MANGAT, P.S., Cement Concrete Research, Vol.4, N 3, 1974, pp.451-65.

- VANDENBERGHE, M. P. ; NEMEGEER, D. E. Industrial Flooring With Steel Fiber Reinforced concrete, *Concrete International: Design & Construction*, V. 7 No. 3, Mar. 1985, pp. 54-57.
- VIPULANANDAN, C. and PAUL, E., Performance of Epoxy and Polyester Polymer Concrete, *ACI Materials Journal*, V. 87, n° 2, May-June 1990, pp. 241-251.
- VIPULANANDAN, C., DHARMARAJAN N., CHING E., Mechanical Behavior of Polymer Concrete Systems, *Materials and Structures*, v.21, 1988, pp. 268-277.
- VOLD, H., *et al.*, A Multi-input Modal Parameter Estimation Algorithm for Mini-Computers, SAE paper 820194, 1982.
- YAMAUCHI, F. and YOKOYAMA, K., Ferrite-Resin Composite Material for Vibration Damping and Its Applications, (1983), *Bull Japan Society for Precision Engineering*. Vol. 17(3), September 1983, pp. 147 – 153.
- YEON, K.S., FOWLER D. W., WHEAT D. L., Static Flexural Behaviour of Various Polymer Concrete Beams, *International Congress on Polymers in Concrete*, 1991.
- WANG, N.; MINDESS, S.; KO K., Fibre Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading, *Cement and Concrete Research*, vol.26, n°3, 1996, pp.363-376.