

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS  
DE AÇO: ESTADO DA ARTE**

**BRUNNO ANTONIO ONOFRE PINHEIRO**

**ORIENTADOR:**

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Recife

2009

BRUNNO ANTONIO ONOFRE PINHEIRO

**PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS  
DE AÇO: ESTADO DA ARTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções, orientado pelo Professor Doutor Romilde Almeida de Oliveira

Recife

2009

Pinheiro, Brunno Antonio Onofre.

Pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço: estado da arte, Recife-PE / Brunno Antonio Onofre Pinheiro; orientador Romilde Almeida de Oliveira, 2009. 125p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2009.

1. Reforço com Fibras 2. Fibras de Aço 3. Concreto Reforçado com Fibras de Aço. 4. Pisos Industriais de Concreto. I. Universidade Católica de Pernambuco. Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BRUNNO ANTONIO ONOFRE PINHEIRO

**PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS  
DE AÇO: ESTADO DA ARTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções.

Avaliado por:

---

Prof. Romilde Almeida de Oliveira  
(Orientador – Dr. – UNICAP)

---

Prof. Fernando Artur Nogueira Silva  
(Examinador interno – Dr. UNICAP)

---

Prof. Ângelo Just da Costa e Silva  
(Examinador externo – Dr. UNICAP / TECOMAT)

Data: 30 / 12 / 2009

Recife

2009

iv

## DEDICATÓRIA

À Deus, por tudo o que me tem proporcionado.

À minha esposa Mariana e ao meu filho Miguel, por alimentarem os meus sonhos e esperanças, e por se constituírem na minha fonte de energia para encarar um mundo cada vez mais difícil – minhas pérolas.

À minha mãe Bernadete e ao meu irmão Thiago, por tudo o que passamos juntos.

À minha avó Terezinha (in memoriam), minha segunda mãe.

À minha sogra Ana Pedrosa e ao meu sogro Mário Rodrigues, por toda a atenção, incentivo e ajuda que me proporcionaram, nunca duvidando da minha capacidade.

Ao meu pai Osvaldo, pela ajuda ao longo da minha vida.

Ao meu tio Evandro, por tudo o que fez e faz por mim e pela minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, proporcionando saúde e felicidade para toda a minha família.

A CAPES, pela bolsa de estudos e, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo apoio e receptividade.

Ao meu PROFESSOR e Orientador Romilde Almeida de Oliveira, pela sugestão do tema, amizade, orientação, apoio com materiais bibliográficos e contribuições valiosas durante esta pesquisa.

Ao amigo Ronaldo Bezerra Pontes, por acreditar na minha capacidade.

A todos os PROFESSORES do Mestrado, em especial a Fernando Arthur Nogueira, que me “apresentou” aos materiais compósitos e a Eliana Cristina Barreto Monteiro, que me deixou mais próximo dos concretos em geral.

Aos laboratoristas André Miranda e Washington Espósito, do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Católica de Pernambuco, pela ajuda ao longo do curso.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Célia Feitosa, Célia Braga e Ângela Cristina.

Ao Capitão do Exército Brasileiro, Ricardo Valle, pela constante ajuda ao longo do período em que trabalhamos juntos.

Ao Capitão do Exército Brasileiro, Cavalcante, pelo apoio irrestrito.

Ao tenente do Exército Brasileiro, Dantas, pelo material fornecido.

A funcionária civil Rejane, pela prestatividade.

A CRO/7 (Comissão Regional de Obras/7ª RM) pelo apoio em geral.

Ao Engenheiro Ivan Marassatto, pela consultoria prestada.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram em mais uma conquista na minha vida.

# PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO: ESTADO DA ARTE

PINHEIRO, BRUNNO ANTONIO ONOFRE

## RESUMO

O concreto reforçado com fibras de aço é um material compósito, onde o concreto é a matriz e o reforço são as fibras. No Brasil ele começou a ser utilizado na década de 90, e atualmente é uma das soluções mais eficientes para os pisos industriais, que são estruturas muito importantes, pois se constituem na base de toda a produção. Um problema nesses pisos pode significar prejuízos financeiros na ocorrência de interrupção das atividades industriais. Foram estudadas algumas fibras utilizadas como adição para o concreto, em especial as de aço. Foram abordados os principais tipos de pisos de concreto, com ênfase nos reforçados com fibras de aço, suas características, interações fibra x matriz, parâmetros de eficiência, controle de qualidade, principais patologias e terapias, bem como carregamentos atuantes e critérios de dimensionamento. Concluiu-se que as fibras de aço desempenham importante papel no controle de propagação das fissuras, aumentando a ductilidade da placa e a tenacidade, podendo até aumentar a capacidade portante da estrutura dependendo do volume de fibras empregado.

**PALAVRAS-CHAVE:** concreto, reforço com fibras, fibras de aço, pisos industriais.

# CONCRETE INDUSTRIAL FLOORS REINFORCED WITH STEEL FIBERS: STATE OF THE ART

PINHEIRO, BRUNNO ANTONIO ONOFRE PINHEIRO

## ABSTRACT

The steel fiber reinforcement concrete is a composite material. The concrete is the matrix and the reinforcement are fibers. In Brazil, it started to be used in the decade of 90, and nowadays it's one of the most efficient solution for industrial floors, witch are very important structures because the whole production consists on it. A problem with these kind of floors is that it creates financial damages in the occurrence of interruption of industrial activities. Some fibers had been studied as an addition to the concrete, mostly the steel ones. The main types of concrete floors had been boarded, with emphasis on the reinforced with steel fiber, looking for it's characteristics, interactions fiber x matrix, efficiency parameters, quality control, main pathologies and therapies, as well as existent loads and dimensions. It was concluded that the fiber steel performance has an important role in the control of propagation of the cracks, increasing the residual strength factors, even being able to increase the capacity of the structure, depending on the volume of fiber steel that is applied.

KEY-WORDS: concrete, fiber reinforcement, steel fibers, industrial floors.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Apresentação do tema.....	1
1.2	Justificativa do estudo.....	2
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Objetivo geral.....	5
1.3.2	Objetivo específico.....	5
1.4	Metodologia.....	5
1.5	Estrutura da dissertação.....	7
2	Revisão bibliográfica.....	9
2.1	Compósitos estruturais.....	9
2.2	Reforço com fibras.....	10
2.3	Principais tipos de fibras usadas na construção civil.....	13
2.3.1	Fibras de polipropileno.....	13
2.3.2	Fibras de vidro.....	15
2.3.3	Fibras de aço.....	16
2.3.3.1	Fibra de aço corrugada.....	18
2.3.3.2	Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção retangular.....	19
2.3.3.3	Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção circular.....	20
2.4	Uso de fibras de aço e, em particular, pisos industriais.....	21
2.5	Origem e motivação do uso de fibras.....	28
2.6	Uso de fibras no Brasil.....	29
2.6.1	Porto de Santos.....	30
2.7	Uso de fibras no Estado de Pernambuco.....	31
2.8	Concreto reforçado com fibras de aço.....	32
2.9	Matriz de concreto.....	34

2.10	Mecanismo de reforço das fibras .....	35
2.11	Mecanismo de transferência de tensões .....	37
2.12	Parâmetros de eficiência .....	39
2.12.1	Volume crítico .....	39
2.12.1.1	Fibras x armadura dupla - comparativo de custos.....	45
2.12.2	Comprimento crítico.....	47
2.12.3	Compatibilidade dimensional.....	49
2.12.4	Fator de forma das fibras .....	50
2.13	Normas da ABNT relativas ao uso de fibras .....	52
3	Pisos industriais.....	54
3.1	Pisos de concreto .....	55
3.2	Finalidade dos pisos de concreto.....	56
3.3	Tipos de pisos de concreto.....	57
3.3.1	Piso de concreto simples.....	57
3.3.2	Piso com armadura de retração .....	58
3.3.3	Piso de concreto estruturalmente armado.....	59
3.3.4	Piso de concreto protendido .....	60
3.3.5	Piso de concreto reforçado com fibras de aço .....	61
3.3.5.1	Vantagens obtidas com a utilização de reforço com fibras de aço.....	63
3.4	Patologias e recuperação de pisos industriais executados com fibras de aço.....	64
3.4.1	Umidade ascendente .....	64
3.4.2	Fissuras.....	66
3.4.2.1	Fissuras de retração .....	67
3.4.2.1.1	Fissuras de retração plástica .....	68
3.4.2.1.2	Fissuras de retração hidráulica.....	69
3.4.2.2	Microfissuras - craqueamento .....	71
3.4.2.3	Reparação de fissuras.....	72

3.4.2.3.1	Tratamento com epóxi.....	72
3.4.2.3.2	Tratamento com polimetilmetacrilato .....	73
3.4.3	Crusting (borrachudo) .....	74
3.4.4	Empenamento .....	76
3.4.5	Delaminação.....	78
3.4.6	Esborcinamento de juntas.....	79
3.4.7	Desgaste por abrasão.....	81
4	Elementos de projeto.....	83
4.1	Controle de qualidade do concreto reforçado com fibras de aço.....	83
4.1.1	Resistência mínima à compressão .....	83
4.1.2	Consumo mínimo de cimento .....	84
4.1.3	Agregado graúdo .....	84
4.1.4	Abatimento.....	85
4.1.5	Teor de argamassa .....	85
4.2	Trabalhabilidade e mistura .....	86
4.3	Resistências mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço.....	88
4.3.1	Tenacidade .....	88
4.3.2	Resistência à compressão .....	89
4.3.3	Resistência à tração direta.....	90
4.3.4	Resistência à tração na flexão .....	91
4.3.5	Resistência ao cisalhamento .....	91
4.3.6	Resistência à torção.....	92
4.3.7	Resistência ao fogo.....	92
4.3.8	Resistência à abrasão .....	94
4.3.9	Resistência à corrosão .....	95
4.4	Tipos de cargas em pisos industriais.....	96
4.4.1	Cargas estáticas .....	96

4.4.1.1	Cargas distribuídas .....	96
4.4.1.2	Cargas lineares.....	98
4.4.1.3	Cargas concentradas.....	98
4.4.2	Cargas móveis .....	99
4.5	Dimensionamento de piso de concreto reforçado com fibras de aço.....	101
4.5.1	Cálculo do momento fletor devido a carga uniformemente distribuída.....	102
4.5.2	Cálculo do momento fletor de cargas móveis .....	103
4.5.2.1	Momento da carga no interior da placa .....	103
4.5.2.2	Momento da carga na borda da placa .....	104
4.5.3	Cálculo do momento fletor de cargas concentradas.....	105
4.5.3.1	Momento da carga no interior da placa .....	105
4.5.3.2	Momento da carga na borda da placa .....	106
4.5.4	Cálculo do efeito de retração.....	106
4.5.4.1	Momento equivalente no centro da placa.....	106
4.5.4.2	Momento equivalente na borda da placa .....	107
4.5.5	Cálculo do efeito da variação da temperatura .....	108
4.5.5.1	Momento equivalente no centro e na borda da placa .....	108
4.5.6	Cálculo do teor de fibras de aço.....	109
5	Considerações finais .....	112
5.1	Conclusões .....	112
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	113
	Referências bibliográficas.....	114
	Apêndice i.....	119

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Piso industrial reforçado com fibras de aço em fase de execução .....	4
Fig. 2.1 - Baixo custo x desempenho .....	10
Fig. 2.2 - Direções de reforço das fibras .....	11
Fig. 2.3 - Ensaio de tração na flexão.....	12
Fig. 2.4 - Fibras de polipropileno.....	14
Fig. 2.5 - Fibras de vidro inseridas em matriz de poliéster .....	16
Fig. 2.6 - Fibras de aço embaladas em caixas.....	17
Fig. 2.7 - Fibras de aço soltas.....	18
Fig. 2.8 – Fibras de aço coladas .....	18
Fig. 2.9 - Fibras corrugadas.....	19
Fig. 2.10 -Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção circular – $l/d = 75$ .....	20
Fig. 2.11 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras.	22
Fig. 2.12 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com reforço de fibras.	23
Fig. 2.13 – Piso aeroportuário.....	24
Fig. 2.14 – Produção de pré-moldados .....	24
Fig. 2.15 – Túnel Cascavel .....	25
Fig. 2.16 – Piso industrial – Estaleiro Suape.....	26
Fig. 2.17 – Lançamento de concreto.....	27
Fig. 2.18 – Libra terminal 35 S/A – Porto de Santos .....	30
Fig. 2.19 – Execução de piso da Schincariol – Recife/PE .....	31
Fig. 2.20 – Concreto com adição de fibras no estado fresco.....	33
Fig. 2.21 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo	

módulo de elasticidade trabalhando em conjunto .....	36
Fig. 2.22 - Interação Fibra x Matriz – Importância da resistência à tração das fibras .....	38
Fig. 2.23 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra-matriz com a forma da fibra... ..	39
Fig. 2.24 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	40
Fig. 2.25 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.....	48
Fig. 2.26 - Existência de compatibilidade dimensional entre agregados e fibras .....	50
Fig. 2.27 - Inexistência de compatibilidade dimensional entre agregados e fibras .....	50
Fig. 2.28 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um dado volume em função do fator de forma.....	51
Fig. 2.29 - Dosagem x fator de forma das fibras .....	52
Fig. 3.1 – Perfil de um pavimento rígido.....	56
Fig. 3.2 – Perfil de um pavimento flexível.....	56
Fig. 3.3 – Piso de concreto simples .....	57
Fig. 3.4 – Piso com armadura de retração .....	59
Fig. 3.5 – Piso estruturalmente armado .....	60
Fig. 3.6 - Piso protendido.....	61
Fig. 3.7 - Piso reforçado com fibras .....	62
Fig. 3.8 – Lona de polietileno .....	65
Fig. 3.9 – Fissuras de retração plástica .....	69
Fig. 3.10 - Fissuras de retração hidráulica .....	70

Fig. 3.11 – Microfissuras – craqueamento .....	71
Fig. 3.12 – Tratamento com epóxi semi-rígido .....	73
Fig. 3.13 – Acabadora mecânica.....	75
Fig. 3.14 – Empenamento da placa .....	76
Fig. 3.15 – Delaminação .....	79
Fig. 3.16 – Esborcinamento de juntas.....	80
Fig. 3.17 – Desgaste superficial por abrasão .....	81
Fig. 4.1 – Teor de fibras x tempo de Vebe .....	86
Fig. 4.2 – Ouriço .....	87
Fig. 4.3 – Concreto simples x concreto com fibras de aço .....	89
Fig. 4.4 - Canais deixados pelas fibras de polipropileno fibriladas após a exposição do concreto a temperaturas de 400°C .....	94
Fig.4.5 – Carregamento distribuído.....	97
Fig. 4.6 – Carregamento concentrado.....	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tipos de fibras e respectivas características .....	13
Quadro 2.2 – Comparativo de custos de um piso reforçado com malha dupla (estruturalmente armado) e com reforço de fibras de aço com teor de adição de 25 kg/m <sup>3</sup> .	46
Quadro 2.3 – Comparativo de custos de um piso reforçado com malha dupla (estruturalmente armado) e com reforço de fibras de aço com teor de adição de 65 kg/m <sup>3</sup> - volume crítico.....	47
Quadro 3.1 - Parâmetros que interferem na retração do concreto .....	68
Quadro 4.1 - Resistências mínimas à compressão do concreto para pisos comerciais e industriais .....	83
Quadro 4.2 – Fator de restrição em função do coeficiente de atrito .....	107
Quadro 4.3 – Coeficiente de atrito x tipo de sub-base.....	107
Quadro 4.4 – Relação volume de fibras x fator de tenacidade .....	110
Quadro 4.5 – Relação volume de fibras x fator de tenacidade .....	111

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA**

Com a globalização da economia, diversas alterações na sociedade, bem como na tecnologia utilizada na construção civil foram constatadas, principalmente as relacionadas ao uso do concreto. Foram desenvolvidas novas maneiras de dimensionar, novos equipamentos, novas ferramentas e até a engenharia de materiais.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), o concreto sem reforço sofre de certas deficiências. Os pontos fracos fizeram com que fossem desenvolvidos alguns tipos de concreto, como o reforçado com fibras de aço, que garantem às estruturas uma maior ductilidade (FIGUEIREDO, 2005). Assim também surgiram os concretos de alto desempenho, de alta resistência, alto adensáveis, etc. Com o uso de todo potencial disponível dos vários materiais de reforço, hoje já são produzidos diversos tipos de pavimento, cada um com suas vantagens.

O concreto com adição de fibras possui algumas propriedades que o diferenciam do concreto sem reforço, tanto no estado fresco como no endurecido. No estado fresco a coesão é aumentada, a retração plástica e a exsudação são reduzidas. No estado endurecido, incrementos na tenacidade à flexão, resistência à propagação das fissuras, resistência ao impacto, fadiga e ao cisalhamento, são conseqüências do incremento das fibras no concreto (FERNANDES, 2005).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), a produção do concreto reforçado com fibras é bem pequena se comparada à produção total de concreto, mas recentemente uma taxa de crescimento anual de 20 % foi constatada na América do Norte. No Brasil, o uso do concreto reforçado com fibras de aço é uma realidade, sendo nos pisos e pavimentos a utilização mais difundida. O concreto com fibras de aço é um material com uso praticamente consolidado em pavimentação industrial, com mais de dois milhões de metros quadrados executados no Brasil (NUNES, 2005).

Na década atual, no Brasil, surgiram grandes obras e o mercado da construção, que estava até aquele momento estagnado, ficou aquecido, gerando empregos e oportunidades. No estado de Pernambuco, em particular, construções de indústrias, portos, estaleiro, rodovias, centros de distribuição, entre outras, ratificaram esta melhora.

Apesar da notável evolução tecnológica, o piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço ainda não está sendo executado com frequência no estado de Pernambuco, pois a mudança de uma cultura, às vezes, não acompanha os passos do avanço tecnológico, sendo mais comum à utilização de pisos de concreto simples e pisos de concreto com dupla armadura. A escassez de normas nacionais também influencia na falta de propagação da técnica. É preciso derrubar alguns obstáculos para que a técnica se consolide.

## **1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO**

O material de construção mais utilizado pela humanidade é o concreto (ALMEIDA, 2005), estando sujeito a pesquisas variadas com o objetivo de reduzir os pontos fracos e ampliar o campo de aplicação na indústria da construção. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008):

***“O índice de consumo do concreto é muito maior atualmente do que 40 anos atrás. Estima-se que o consumo atual de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas métricas ao ano”.***

É um material antigo, mas a tecnologia associada a ele continua se desenvolvendo. A adição de fibras ao concreto confirma esse fato, sendo utilizadas com o objetivo de controlar a propagação de fissuras (SIMMONS, 2007).

Muitos pesquisadores de tecnologia do concreto dedicam seus estudos na busca pela redução da fragilidade desse material, assim o concreto reforçado com fibras tornou-se uma alternativa de material para quem precisa de um concreto com maior ductilidade, por exemplo.

Hoje, as vantagens na utilização do concreto reforçado com fibras de aço estão mais conhecidas. Apesar disso, é de se questionar o porquê do uso ainda limitado desse material. Isso ocorre devido à inexistência de referências normativas de cálculo e de caracterização ainda incompleta desse compósito (GROSSI, 2006).

Concreto com fibras são materiais resultantes da mistura do concreto comum com fibras descontínuas, geralmente aleatoriamente orientadas. As fibras de aço são as mais utilizadas dentre todas as fibras (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Também são usadas as de vidro, polímeros orgânicos e, com menor intensidade, as vegetais, como a juta e o sisal (RIPPER E SOUZA, 1998).

A adição de fibras ao concreto melhora algumas propriedades mecânicas, dependendo da dosagem, da geometria e do material do qual é fabricada a fibra, assim como a interação fibra-matriz (FIGUEIREDO, 2000).

A NBR 15530 - ``Fibras de Aço para Concreto – Especificação``, lançada no ano de 2007, estabelece os parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono. Mas não é possível garantir um bom desempenho do compósito somente utilizando fibras de boa qualidade, esse comportamento final também vai depender de outros fatores.

No estado de Pernambuco, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) ainda tem a sua aplicação restrita, apesar de existirem principalmente em empreendimentos estruturadores, como o complexo industrial-portuário do município de Suape, onde em alguns pisos elas estão sendo utilizadas como único reforço da estrutura, não se aplicando o uso de armaduras convencionais. A figura 1.1 mostra um piso industrial reforçado com fibras de aço em fase de execução localizado no referido complexo industrial.



Fig. 1.1 – Piso industrial reforçado com fibras de aço em fase de execução  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:34 hs)

O piso industrial, além de ser um local de trânsito intenso, também pode sofrer ataques de agentes agressivos, sendo necessário um trabalho de qualidade em todas as etapas construtivas. Esses pisos constituem uma das partes mais importantes da indústria, pois é sobre ele que escoam toda a produção. O mercado de pisos industriais brasileiros foi estimado em torno de 24 milhões de metros quadrados anuais, valor expressivo e importante para o mercado da construção civil (RODRIGUES et al., 2006).

Qualquer interrupção no processo produtivo das indústrias pode ter como consequência enormes prejuízos financeiros. Daí a importância dos estudos científicos que, aliados ao uso de normas estrangeiras (ASTM – C1018 (1994) American Society for Testing and Materials, JSCE – SF4 (1984) Japan Society of Civil Engineers), possam funcionar como embasamento para o dimensionamento e construção dos pisos de concreto reforçados com fibras de aço, inovando as técnicas locais.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar os pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço, com análise das condições de projeto e de execução, dimensionamento, mecanismos de reforço, mecanismos de transferência de tensões fibra x matriz, interações, parâmetros de eficiência, controle de qualidade do material, patologias e respectivas recuperações.

### **1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Contribuir principalmente com os profissionais ligados, direta ou indiretamente, à área de pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço, em virtude das dificuldades encontradas para dimensionar e executar este tipo de pavimento.

## **1.4 METODOLOGIA**

As dificuldades para realização da presente pesquisa foram acentuadas em decorrência da pequena quantidade de material bibliográfico disponível sobre o assunto abordado. Foram pesquisadas dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos científicos, revistas, livros e catálogos técnicos, enfim, buscou-se o maior número de fontes possíveis para proporcionar um levantamento rico e confiável sobre o assunto em questão.

Inicialmente foi realizado um estudo sobre os materiais compósitos de uma maneira geral, mais especificamente os reforçados com fibras contínuas e descontínuas, inseridos em matrizes cimentícias.

Foram pesquisadas algumas fibras utilizadas na construção civil, com ênfase nas fibras de aço, que são as mais usadas nos pisos industriais, abrangendo os diversos tipos e meios de produção.

Foram citadas obras recentes de pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço executadas no Brasil e no Estado de Pernambuco, com as respectivas características.

Pesquisou-se a definição do concreto reforçado com fibras de aço, com os respectivos mecanismos de reforços e transferências entre fibra e matriz, bem como os parâmetros de eficiência.

Realizou-se um levantamento sobre pisos industriais de concreto, explicando os principais tipos e formas de execução, com especial atenção para os reforçados com fibras de aço, abordando também as vantagens obtidas com a sua aplicação.

Foram analisados os diversos tipos de patologias em pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço, bem como os seus respectivos tratamentos.

Foi estudado o controle de qualidade de um piso de concreto reforçado com fibras de aço, informando a resistência mínima à compressão, relação água-cimento, diâmetro máximo dos agregados graúdos, abatimento, e teores de argamassa adequados. Também foram abordados os efeitos da adição de fibras com relação à trabalhabilidade e mistura desse material.

Estudou-se a interferência na resistência mecânica do piso industrial causada pela adição das fibras ao concreto.

Foram observadas as cargas atuantes nessas estruturas e os critérios de dimensionamento da mesma.

Foi feito um dimensionamento de um piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço sujeito a carregamentos distribuídos, móveis e concentrados, levando em consideração os efeitos causados pela retração e temperatura;

Nas considerações finais, foram expostas conclusões sobre a presente pesquisa com sugestão para trabalhos futuros.

Como complemento do trabalho foi realizada uma visita a uma obra de piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço, destinado a receber atividades de decapagem de peças metálicas (remoção de oxidações e impurezas inorgânicas), localizado no Estaleiro Atlântico Sul, Complexo Portuário de Suape/PE, sendo observadas as condições de execução e o controle de qualidade do material.

## **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A estrutura da dissertação é composta por cinco capítulos e está organizada da seguinte maneira:

O Capítulo 1, como já apresentado, é composto de apresentação do tema, justificativa do estudo, objetivos da pesquisa, metodologia empregada e estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 abrange uma ampla revisão bibliográfica. Inicialmente procurou-se definir os materiais compósitos e, em seguida, abordou-se o reforço com fibras, estudando os principais tipos empregados na construção civil. Pesquisou-se a origem do uso de fibras, bem como o uso no Brasil e em Pernambuco, citando algumas obras recentes de pisos onde foram utilizadas fibras de aço como reforço do concreto. Procurou-se definir o concreto reforçado com fibras de aço, os mecanismos de reforço e de transferência fibra x matriz e os parâmetros de eficiência envolvidos.

O capítulo 3 abrange um levantamento sobre pisos industriais de concreto, explicando os principais tipos e formas de execução, com especial atenção para os reforçados com fibras de aço, abordando as vantagens obtidas com a sua aplicação. Também foram mostradas as patologias relacionadas a esses pisos, bem como tratamentos.

No capítulo 4 foram analisados os critérios de projeto como controle de qualidade do material, interferências causadas no comportamento mecânico do concreto em decorrência da adição das fibras de aço, cargas atuantes e foi feito um exemplo de

dimensionamento dos pisos reforçados com fibras de aço, conforme o ACI 360 R (2006).

O capítulo 5 aborda as conclusões tiradas da presente pesquisa, bem como uma sugestão para trabalhos futuros.

No Apêndice é mostrada a execução de um piso de concreto reforçado com fibras de aço, localizado no Estaleiro Atlântico Sul, Complexo Portuário de Suape/PE, destinado a operações de decapagem de peças metálicas. Foram observadas as condições de execução e o controle de qualidade do material.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 COMPÓSITOS ESTRUTURAIS**

Está escrito no Novo Testamento que no Egito antigo já era costume a utilização de palha no fabrico de tijolos (ÊXODO 5, 6-7). Fica claro que a utilização de materiais compósitos não é recente, mas a tecnologia ligada a eles sim.

Os materiais compósitos são formados pela união de dois ou mais materiais com características e propriedades diferentes, que podem ser identificadas mesmo após a combinação. O objetivo é obter materiais com propriedades superiores do que aquelas encontradas em ligas cerâmicas, metálicas e materiais poliméricos convencionais (CALLISTER, 2005).

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço pode ser considerado um compósito, onde a matriz é o concreto de cimento Portland e o reforço é constituído pelas fibras de aço, distribuídas aleatoriamente na matriz, portanto é indispensável uma breve explanação sobre o referido assunto.

Esses materiais trouxeram a possibilidade de grandes avanços em determinadas áreas. Eles causaram impacto nas áreas esportivas, com raquetes de tênis leves e mais resistentes, por exemplo. No automobilismo, assim como nas aplicações aeroespaciais, naval, e também na construção civil, muitos produtos foram obtidos com a ajuda dessa tecnologia.

Na produção desses materiais estão envolvidos diversos fatores, como disponibilidade de matéria-prima, desempenho e preço, entre outros. As áreas de aplicações desses materiais são bem variadas, assim como os diferentes graus de importância de cada segmento (NETO e PARDINI, 2006).

Segundo NETO e PARDINI (2006), em algumas ciências, a parte financeira envolvida na produção dos compósitos fica em segundo plano, pois o desempenho é o principal alvo. Na construção civil, logicamente que o desempenho também é importante, mas o preço do material fala mais alto. Não adianta um material com

desempenho excelente e sem condições favoráveis de comercialização. A figura 2.1 mostra essa relação.

Nas ciências onde o desempenho está em primeiro lugar, mais estudos são realizados e mais dinheiro está envolvido na busca por melhores materiais, diferentemente da construção civil, onde se procura aliar bons produtos com preços viáveis e disponibilidade. A intensidade da atividade da construção civil em geral é maior, demandando um elevado volume de materiais, que se não estiverem disponíveis estão fadados a cair no esquecimento.

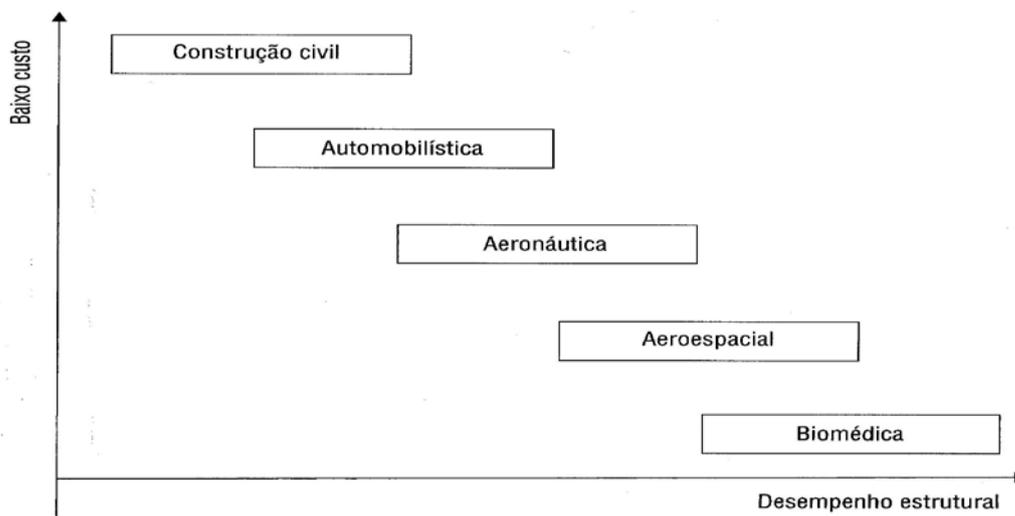


Fig. 2.1 - Baixo custo x desempenho  
(Fonte: Neto e Pardini, 2006)

## 2.2 REFORÇO COM FIBRAS

O reforço com fibras pode se constituir de fibras contínuas e alinhadas na mesma direção, fibras contínuas e alinhadas em duas direções e fibras descontínuas e aleatoriamente orientadas. A figura 2.2 ilustra as diferentes direções de reforço das fibras considerando uma matriz de propriedades semelhantes para ambos os casos e fibras de mesmas características mecânicas, com volumes idênticos.

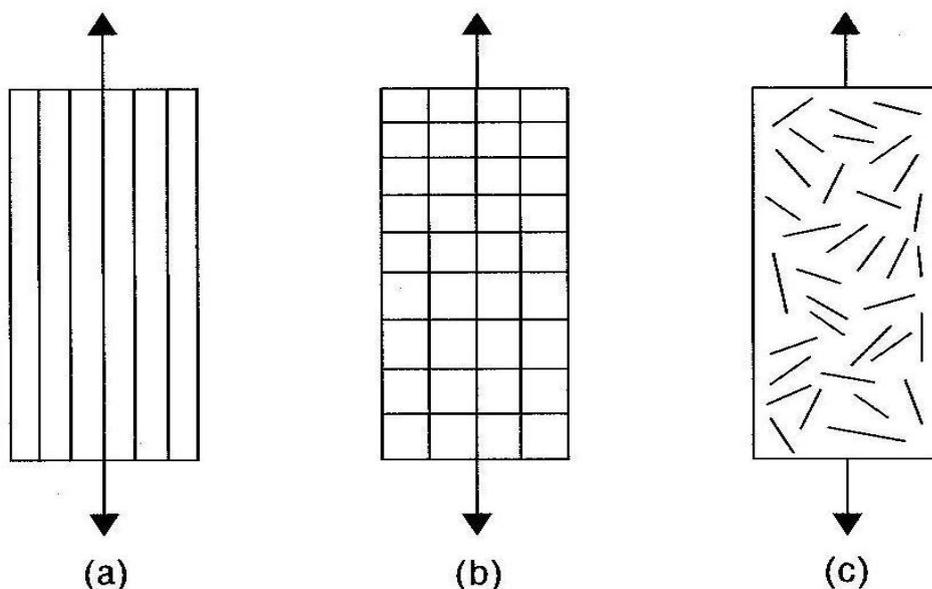


Fig. 2.2 - Direções de reforço das fibras  
(Fonte: Neto e Pardini, 2006)

Com a aplicação de uma tensão de tração longitudinal, o reforço com fibras contínuas e orientadas na mesma direção da tensão (a) é o mais eficiente, seguido do reforço com fibras contínuas e orientadas em duas direções (b) e por último, o reforço com fibras descontínuas e aleatórias (c). Na aplicação de esforços transversais, o reforço com fibras contínuas e orientadas em duas direções (b) seria o mais eficiente.

Com relação a adições para o concreto, o reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente orientadas (c) é na prática o mais utilizado em virtude da viabilidade em se obter o produto final.

A eficiência desse reforço também é função do volume de fibras empregado. A figura 2.3 mostra o comportamento no ensaio de tração na flexão de um concreto sem reforço de fibras e de concretos com diferentes teores de adição de fibras de aço.

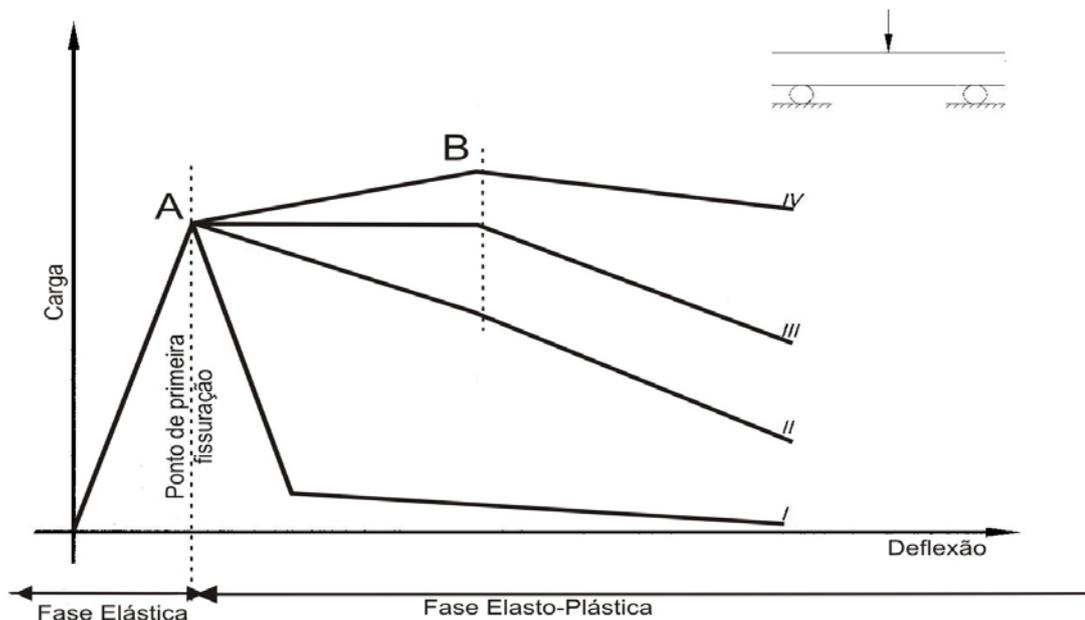


Fig. 2.3 - Ensaio de tração na flexão  
(Fonte: Sarzalejo et al., 2007)

Da figura 2.3 podemos concluir que:

- A curva I é a representação de um concreto sem adições de fibras, onde uma vez fissurado não apresenta mais nenhuma capacidade de resistência, colapsando imediatamente, mostrando toda sua fragilidade;
- A curva II demonstra um concreto reforçado com baixos teores de fibras, onde após a fissuração, o colapso ocorrerá de maneira mais lenta;
- A curva III representa um concreto com baixos teores de fibras, mas que manteve a capacidade portante mesmo após a fissuração da matriz, só colapsando após certo deslocamento; e
- A curva IV descreve o comportamento de um concreto reforçado com um volume de fibras que proporcionou o aumento da capacidade portante mesmo após a fissuração da matriz.

Uma vez aumentando o volume de fibras adicionadas, é possível melhorar a eficiência do compósito. Logicamente que esse volume tem um determinado limite, uma vez que quanto maior os teores, maior o impacto adverso na trabalhabilidade do material (FIGUEIREDO, 2005).

## 2.3 PRINCIPAIS TIPOS DE FIBRAS USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As fibras podem ser sintéticas e orgânicas (polipropileno ou carbono), sintéticas e inorgânicas (aço ou vidro), naturais e orgânicas (celulose) ou naturais e inorgânicas (asbesto ou amianto). No quadro 2.1 são mostradas as principais características de alguns tipos de fibras, como densidade, módulo de deformação e resistência à tração, de maneira que se possa fazer um breve comparativo entre as fibras descritas, geralmente utilizadas na construção civil.

MATERIAL	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (GPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
AÇO	7,85	160 - 200	350 - 2100
POLIPROPILENO	0,90	3,5 - 5	450 - 700
NYLON	1,10	5	900 - 1100
VIDRO	2,60	70 - 80	2500 - 3500
KEVLAR	1,45	60 - 120	3600
CARBONO	1,90	230 - 380	1800 - 2600
CELULOSE	1,50	10 - 40	350 - 2000
AMIANTO	2,60 - 3,40	160 - 200	200 - 3500

Quadro 2.1 - Tipos de fibras e respectivas características  
(Fonte: Chodounski e Vecili, 2007)

### 2.3.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO

Segundo FIGUEIREDO (2000), as fibras de polipropileno e nylon são de baixo módulo, em comparação com o módulo do concreto, e quando inseridas em uma matriz de concreto ou argamassa, têm como objetivo o controle de fissuras de retração plástica, não sendo utilizadas para fins estruturais. Elas vêm aparecendo também como uma alternativa às fibras de amianto no reforço de matrizes de base cimentícia.

O fibrocimento, tradicional compósito utilizado na construção civil, anteriormente consistia numa matriz de pasta de cimento reforçada com fibras de amianto. Basicamente eram dois materiais de características frágeis trabalhando em conjunto. Um compósito que “admite” utilizar dosagem de fibras em teores bem elevados (10% ou mais), devido às condições de produção, onde o excesso de água é removido por prensagem e filtragem concomitante.

Problemas de saúde ligados ao manuseio do amianto, reconhecidamente responsável pela asbestose, tornaram as fibras de polipropileno uma alternativa às de amianto, mesmo sabendo que estas últimas proporcionam um maior ganho de desempenho quanto a reforço mecânico do que as fibras orgânicas, de origens sintéticas ou vegetais.

FIGUEIREDO (2005), explicou que as fibras de polipropileno, mostradas na figura 2.4, são compostas por filamentos extremamente finos produzidos através do processo de extrusão. O módulo de deformação do concreto na fase de endurecimento é inferior ao da fibra (< 5 GPa). Nesse momento, as tensões associadas às deformações são baixas e compatíveis com os absorvidos pelas fibras sintéticas. Portanto, o grande benefício do uso dessas fibras é o controle de fissuração por retração plástica, onde o baixo módulo de elasticidade é suficiente para inibir a propagação das fissuras.

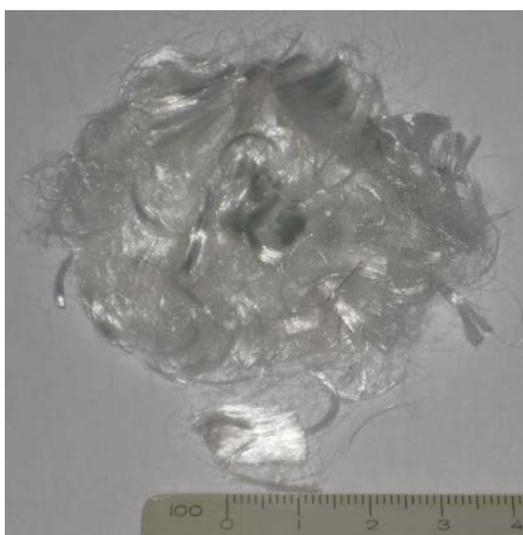


Fig. 2.4 - Fibras de polipropileno  
(Fonte: o autor, 17/12/2009 às 8:15 hs)

Segundo FIGUEIREDO (2000), no Canadá já foram testadas fibras de polipropileno de alto módulo de elasticidade, mas devido ao elevado custo deste material quando comparado às fibras de aço, elas não se tornaram competitivas no meio comercial.

Normalmente a adição de fibras de polipropileno ao concreto reduz a exsudação, piora a trabalhabilidade da “mistura” e tem grandes possibilidades de ocorrência de afloramento das fibras devido a sua baixa densidade, principalmente nas misturas de elevada plasticidade (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Segundo FIGUEIREDO (2000), os fabricantes de fibras de polipropileno recomendam dosagem padrão para qualquer tipo de aplicação, ignorando a ocorrência de diferentes níveis de solicitação a que o material poderá estar exposto. Este teor gira em torno de 900 a 1000 gramas por metro cúbico de concreto ou argamassa.

### **2.3.2 FIBRAS DE VIDRO**

Normalmente apresentam diâmetros de 0,005 a 0,015 mm e podem ser coladas para produzir elementos de fibras de vidro com diâmetros de 0,013 a 1,3 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Inicialmente existia uma barreira à utilização de fibras de vidro na adição a matrizes cimentícias. Essas fibras não eram resistentes aos álcalis presentes no cimento, comprometendo desta maneira a durabilidade do conjunto.

Atualmente existem no mercado um tipo de fibra de vidro, denominado AR, que contém  $ZrO_2$  (dióxido de zircônio) e  $Na_2O$  (óxido de sódio), conferindo resistência aos álcalis do cimento. As fibras de vidro têm como características alta resistência à tração, sendo esta resistência até maior do que nas fibras de aço convencional, conforme se percebe no quadro 2.1.

Baixo módulo de elasticidade, auto-abrasividade e baixa resistência à fadiga, são os pontos fracos dessas fibras quando inseridas em uma matriz (NETO e PARDINI, 2006). A figura 2.5 mostra um exemplo de fibras de vidro inseridas em uma matriz constituída por resina de poliéster.



Fig. 2.5 - Fibras de vidro inseridas em matriz de resina de poliéster - laboratório de materiais - UNICAP  
(Fonte: o autor, 18/12/2009 às 14:44 hs)

### **2.3.3 FIBRAS DE AÇO**

Segundo GROSSI (2006), as fibras de aço têm obtido notória aceitação no mercado mundial devido ao processo de obtenção relativamente barato, grande disponibilidade de fabricantes, boa aderência com a matriz, elevado módulo de elasticidade, facilidade de manuseio, utilização inofensiva a saúde humana e considerável ganhos de desempenho estrutural.

Segundo o ACI 544.1R (1996), são as mais utilizadas em relação às demais por serem mais facilmente encontradas no mercado, normalmente em caixas ou sacos contendo 20 kg, conforme a figura 2.6. Segundo FERRARI (2007), as fabricadas no Brasil possuem comprimentos que variam da ordem de 25 a 62,5 mm. Possuem resistência à tração entre 345 a 2100 MPa e módulo de elasticidade de 200 a 210 GPa.



Fig. 2.6 – Fibras de aço embaladas em caixas  
– laboratório de materiais - UNICAP  
(Fonte: o autor, 18/12/2009 às 14:54 hs)

São elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e tipos de aço. Várias formas surgiram ao longo dos anos devido à evolução do processo de produção e com o objetivo de se obter melhor ancoragem à matriz de cimento.

Normalmente possuem perfil longitudinal variável que pode se estender ao longo de todo o seu comprimento (onduladas) ou somente nas extremidades, no caso de ganchos. São comercializadas soltas, como mostra a figura 2.7, ou agrupadas em feixes de 10 a 30 fibras coladas por meio de cola solúvel em água, que se dissolve durante a mistura, conforme figura 2.8.

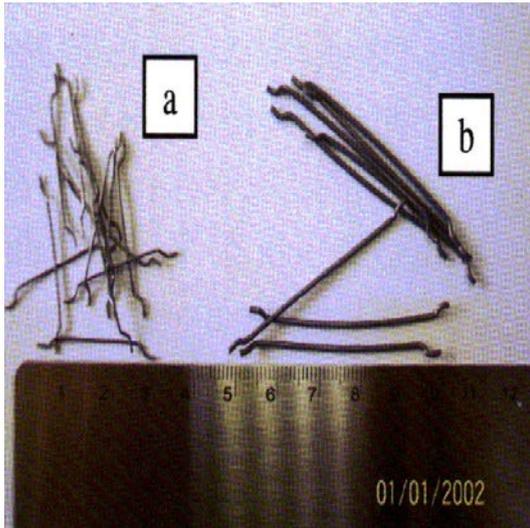


Fig. 2.7 - Fibras de aço soltas  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

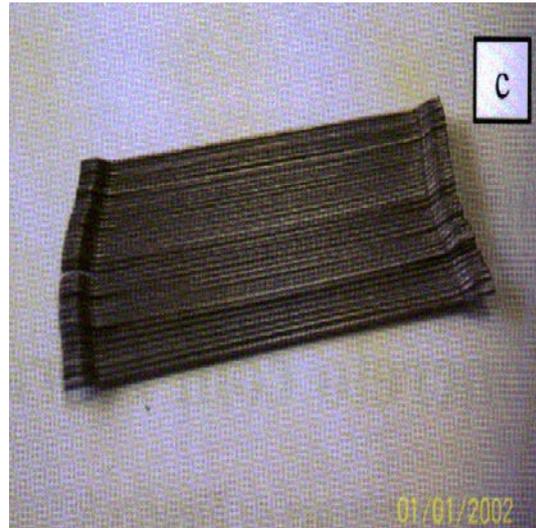


Fig. 2.8 - Fibras de aço coladas  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

O modo como se promove a ancoragem da fibra no concreto é importante, sendo as fibras com ganchos nas extremidades as mais eficientes. Quando submetidas à tração vão se retificando e transmitindo gradativamente a tensão para outras seções da matriz (VILLARES, 2001). A figura 2.9 exibe o dano causado no arrancamento da fibra com ancoragem em gancho além da interface fibra x matriz.



Fig. 2.9 - Fibra com extremidade em gancho, exibindo dano além da interface ao ser arrancada da matriz de cimento  
(Fonte: Bentur e Mindess, 1990)

Além de apresentarem boa resistência à tração, as fibras utilizadas como reforço no concreto devem possibilitar uma dispersão uniforme e uma orientação aleatória por toda a massa de concreto, produzindo assim maior uniformidade nas propriedades de resistência do compósito (VILLARES, 2001).

Segundo CHODOUNSKI (2008), existem três tipos mais comuns no mercado brasileiro. O primeiro tipo a ser produzido foi a fibra de aço corrugada, seguido da fibra com ancoragem em gancho e seção retangular e da fibra com ancoragem em gancho e seção circular.

### **2.3.3.1 FIBRA DE AÇO CORRUGADA**

As fibras de aço corrugadas são produzidas a partir do fio chato que sobra da produção da lâ de aço, tratando-se de uma sobra industrial. O fio é cortado com comprimento variando entre 25 e 60 mm (1" e 2 1/4") com diâmetro equivalente de 1,05 mm, e conformado longitudinalmente para se obter o formato corrugado, conforme a figura 2.10.

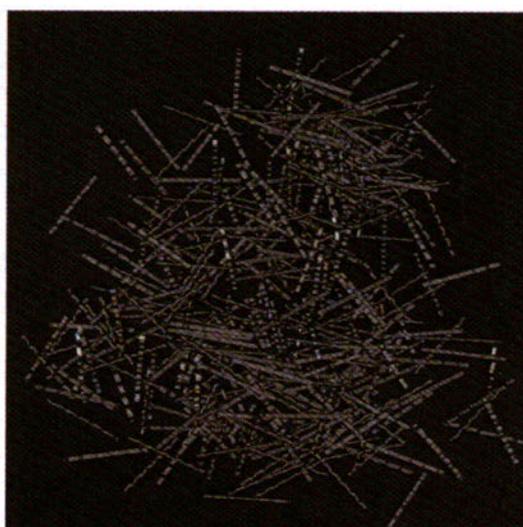


Fig. 2.10 – Fibras corrugadas  
(Fonte: Mehta e Monteiro, 2008)

São as de menor preço e desempenho, mas dependendo dos preços de mercado das armaduras convencionais e dos outros tipos de fibras, pode ser uma solução de excelente relação custo-benefício, o que viabiliza o seu uso mesmo em dosagens bem maiores. A adição destas fibras, dependendo do volume, interfere muito pouco na consistência do concreto.

### **2.3.3.2 FIBRA DE AÇO COM ANCORAGEM EM GANCHO E SEÇÃO RETANGULAR**

As fibras com ancoragem em gancho e seção retangular foram produzidas com o objetivo de atuar como reforço do concreto. São produzidas a partir de chapas de aço (convencional ou inox) cortadas na largura das fibras e conformadas de modo a se obter o formato desejado da ancoragem em gancho, com seção transversal retangular, que varia de 0,15 a 0,40 mm de espessura por 0,25 a 0,90 mm de largura (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Apresentam preço e desempenho maiores que as fibras corrugadas e menores que as trefiladas.

### **2.3.3.3 FIBRA DE AÇO COM ANCORAGEM EM GANCHO E SEÇÃO CIRCULAR**

O terceiro tipo, as fibras com ancoragem em gancho e seção circular, são produzidas a partir da trefilação progressiva do fio-máquina até a obtenção de fios com diâmetros de 0,25 mm a 0,80 mm e comprimentos entre 30 mm e 66 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Com o referido processo, o diâmetro inicial, que era de aproximadamente 6 mm passa para menos de 1 mm, obtendo-se fios de elevada resistência (> 1100 MPa). A figura 2.11 mostra um dessas fibras.



Fig. 2.11 - Fibra de aço com ancoragem em gancho e seção circular –  $l/d = 75$   
(Fonte: o autor, 17/12/2009 às 8:10 hs)

Essas fibras também podem ser produzidas com um elevado teor de carbono, resultando em fios com resistência ainda maiores ( $> 1700$  MPa), possibilitando o seu emprego em concretos de elevada resistência. As fibras de aço de arame trefilado lideram as vendas no Brasil e no mundo (RODRIGUES et al., 2006).

Existem ainda, as fibras especiais de arame trefilado produzidas com diâmetro inferior a 0,16 mm e comprimentos da ordem de 10 mm a 15 mm, utilizadas para reforço de concretos de elevadíssima resistência ( $> 100$  MPa). Essas fibras não são fabricadas atualmente no Brasil.

## 2.4 USO DE FIBRAS DE AÇO E, EM PARTICULAR, PISOS INDUSTRIAIS

Segundo SARZALEJO et al. (2007), a idéia de reforçar com materiais fibrosos, elementos resistentes, porém de elevada fragilidade, perde-se no tempo. No antigo Egito colocava-se palha em argilas para fazer tijolos. Existem outros exemplos históricos desse tipo de reforço, como revestimentos reforçados com crina de cavalo ou palha nas construções mais pobres para evitar fissuras de retração, forros em

gesso armado com trançados de bambu, conglomerados de cimento reforçado com fibras de amianto, etc.

A adição de palhas no fabrico dos tijolos na antiguidade já tinha como finalidade melhorar a resistência à tração dos tijolos bem como atuar no controle das trincas de secagem e, conseqüentemente, conseguir uma boa manipulação após seu cozimento ao sol (NETO, 1998). A orientação científica quanto à tecnologia do reforço com fibras é indiscutivelmente muito mais recente.

As fibras de aço vêm sendo empregadas em pavimentos industriais no Brasil desde meados dos anos 90, assim como as fibras de polipropileno, que apareceram um pouco depois, e as de náilon, que surgiram no final da década.

As fibras, ou armaduras de fibras, ao contrário das armaduras convencionais, são descontínuas e distribuídas na massa de concreto. Elas melhoram algumas propriedades do concreto como a resistência e o alongamento de ruptura à tração (RIPPER E SOUZA, 1998).

A adição de fibras de alto módulo de elasticidade ao concreto redistribui os esforços e conseqüentemente controla a propagação de fissuras, mesmo em baixas dosagens. O concreto tem a sua tenacidade aumentada, ou seja, mais energia será absorvida na deformação (FIGUEIREDO, 2000).

A inclusão dessas fibras ao concreto pode, em taxas mais elevadas, aumentar a sua resistência à primeira fissura e diminuir a abertura das fissuras em geral, resultando em um material mais durável (HOLANDA, 2002).

As fibras são efetivas no controle da fissuração porque elas são muito numerosas e porque elas estão pouco espaçadas. O papel de controle de fissuras se dá por meio da ligação entre as duas bordas da mesma. As fibras não reduzem a quantidade total das fissuras, mas reduzem a abertura delas. É praticamente impossível eliminar a fissuração no concreto, em especial a devida à retração (THOMAZ, 2008).

O concreto apresenta um comportamento frágil e essa fragilidade tende a aumentar com o aumento da resistência à compressão. Ao adicionar fibras ao concreto, a tendência é a redução dessa fragilidade e o aumento da ductilidade. As fibras diminuem a concentração de tensões nas extremidades das fissuras, atuando como

uma “costura” (FIGUEIREDO, 2005). A figura 2.12 ilustra a concentração de tensões na extremidade da fissura de um concreto sem reforço de fibras de aço. A figura 2.13 mostra as fibras atuando como ponte de transferência, diminuindo as tensões nas extremidades das fissuras.

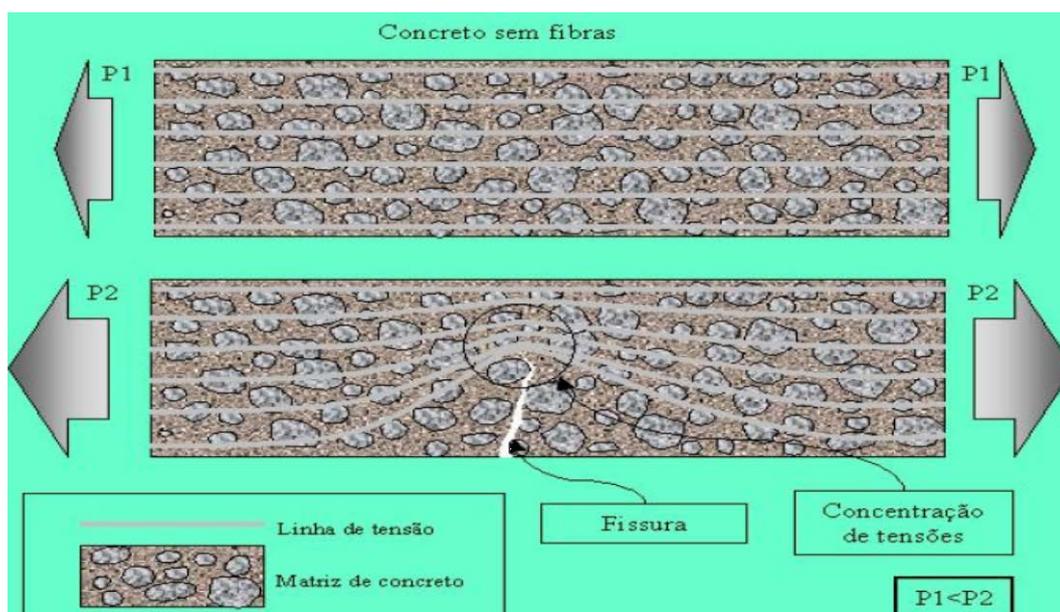


Fig. 2.12 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras (Fonte: Figueiredo, 2005)

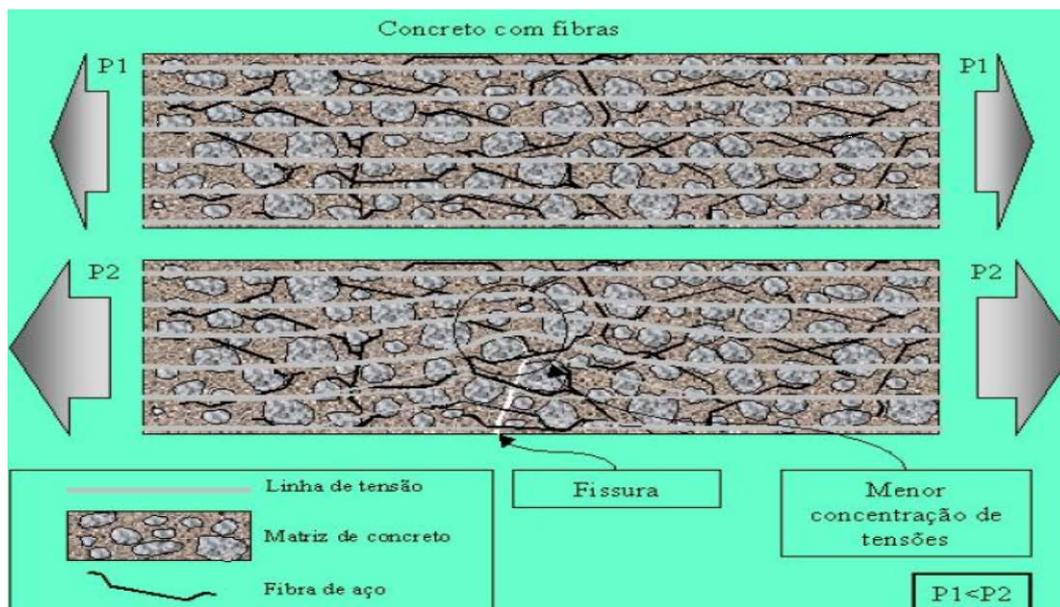


Fig. 2.13 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com reforço de fibras  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

No Brasil vários estudos foram realizados na área de aplicação de fibras de aço no concreto. Entre eles merecem destaque o trabalho realizado por NUNES (2006) sobre aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringido, e o estudo da aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras com alto teor de carbono realizado por SIMPLÍCIO (2008).

O concreto reforçado com fibras de aço pode ser empregado em elementos estruturais de concreto como armadura suplementar de combate ao cisalhamento, em elementos pré-moldados, em reparos de estruturas, painéis de vedação, revestimento de túneis e em placas apoiadas diretamente sobre o solo (RAMOS, 2002).

Também pode ser utilizado na pavimentação de pontes, aeroportos, portos, estacionamentos, postos de gasolina, pisos industriais, obras hidráulicas e na estabilização de taludes.

Na pavimentação de estradas, pistas e pátios de aeroportos, o objetivo da aplicação do CRFA é diminuir a espessura das lajes e reduzir a fissuração. Como exemplo, temos o terminal de cargas da Infraero em São Paulo, ilustrado na figura 2.14.



Fig. 2.14 - Piso Aeroportuário  
(Fonte: Eng. Ivan Marassatto – Maccaferri, 2007)

Outro exemplo de aplicação do concreto reforçado com fibras de aço é na produção de pré-moldados, conforme a figura 2.15.



Fig. 2.15 - Produção de pré-moldados  
(Fonte: Eng. Ivan Marassatto - Maccaferri, 2006)

No revestimento de túneis, o objetivo da aplicação do CRFA é a diminuição das perdas devido à reflexão do concreto projetado e a elevada capacidade de absorção de energia na fase pós-fissuração. A figura 2.16 está ilustrando o Túnel Cascavel,

localizado na BR 232, KM 68, no Estado de Pernambuco. O referido túnel foi revestido com projeção de concreto reforçado com fibras de aço.



Fig. 2.16 – Túnel Cascavel  
(Fonte: o autor, 16/05/2009 às 9:54 hs)

Entre as aplicações das fibras de aço no concreto, tiveram destaque os pisos e pavimentos industriais, os quais foram às grandes alavancas para a viabilização da produção dessas fibras no Brasil, que começaram a ser comercializadas no início da década de 90 (FERNANDES, 2005).

Como exemplo recente dessa aplicação no Estado de Pernambuco podemos citar a construção de um piso industrial no complexo industrial portuário do município de Suape/PE, destinado a atividades de decapagem de peças metálicas, conforme mostra a figura 2.17.



Fig. 2.17 - Piso industrial – Estaleiro Suape/PE  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:22 hs)

O desempenho do piso industrial de concreto é extremamente importante, seja em áreas de produção ou logística. É o único componente do edifício que interage diretamente com o processo produtivo, por onde circulam pessoas, equipamentos, atuando em diversos casos como a própria fundação de máquinas (RODRIGUES, 2007).

Esses pisos são estruturas solicitadas, predominantemente, por cargas acidentais e por cargas permanentes, devendo ser levados em consideração efeitos produzidos por variação de temperatura e retração (CARNIO, 1998).

A interação entre os materiais utilizados, as formas de acabamento, índices de planicidade e nivelamento desejados, manutenção, custos e usos, definem a vida útil de um pavimento industrial, executadas as manutenções previstas.

A utilização dessas fibras reforça o pavimento em toda a sua espessura, ao contrário das telas metálicas, que reforçam em uma determinada posição e ainda podem ser deslocadas com o tráfego de carrinhos de mão e pessoal durante a concretagem (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007). Além do mais, o concreto não precisa ser bombeado, podendo o caminhão betoneira lançá-lo no próprio local de execução da placa, como ilustrado na figura 2.18.



Fig. 2.18 - Lançamento de concreto  
(Fonte: Eng. Ivan Marassatto - Maccaferri, 2005)

Outras vantagens, como menor espaço para estoque, execução mais rápida e econômica, maior resistência ao impacto, maior resistência à variação térmica, melhor comportamento à fadiga, redução da espessura do piso e excelente controle de fissuração justificam a adição das fibras ao concreto na execução de pisos industriais.

Apesar dessas vantagens, é necessário um maior controle no acabamento da superfície do concreto, evitando assim que muitas fibras fiquem expostas, trazendo prejuízo estético para o pavimento não revestido (RODRIGUES, 2004).

Márcio Rocha Pitta, que foi engenheiro líder do núcleo de especialistas em pavimentação da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), falou que cada pavimento industrial tem personalidade própria. As possibilidades e as variáveis que determinam um projeto são tantas que as soluções adotadas para uma obra podem não ser ideais para outra, por mais parecidas que sejam suas características.

Com a evolução tecnológica, hoje encontramos no Brasil um grande número de opções para os pavimentos industriais. Os profissionais das áreas de projeto e execução atingiram um alto grau de especialização, tornando o Brasil um dos países líderes no dimensionamento de pavimentos, aproveitando todas as propriedades dos diversos materiais de reforço e, com isso, produzindo estruturas delgadas e funcionais (RODRIGUES, 2006).

## 2.5 ORIGEM E MOTIVAÇÃO DO USO DE FIBRAS

É antigo e intuitivo o conceito do uso de fibras para reforço do concreto com a finalidade de produzir um material com melhores propriedades mecânicas. Como o concreto possui boa resistência à compressão, mas baixa resistência à tração, a aplicação do mesmo com materiais específicos se torna necessária para melhorar o conjunto (VILLARES, 2001).

A idéia de se utilizar fibras descontínuas, adicionadas no instante do preparo do concreto, foi sempre uma das metas dos tecnologistas, criando um material de propriedades homogêneas, isotrópicas e estruturalmente moldáveis (VILLARES, 2001).

Os primeiros estudos sobre a utilização de fibras de aço ou de vidro no concreto são dos anos 50. Nos anos 60 apareceram os primeiros estudos sobre concreto reforçados com fibras sintéticas (SARZALEJO et al., 2007).

Na era moderna, começaram a surgir diversas aplicações para as fibras. Em 1847, LAMBOT registrou uma patente de um concreto feito com adição de fibras contínuas de aço em fios separados, o que pode ser uma idéia primitiva do concreto armado atual.

Em 1874, BERARD, na Califórnia (EUA), registrou uma patente em concreto com fibras a partir da sugestão do uso de rejeitos granulares de ferro em uma mistura de concreto para criar uma pedra artificial.

Em 1898, HATSCHECK inventou um processo de fabricação de pasta de cimento com adição de fibras de amianto, que veio a se popularizar mundialmente como material empregado na fabricação de telhas, caixas d'água, etc.

Em 1971, segundo GROSSI (2006), foi construído o primeiro pavimento com fibras de aço nos Estados Unidos, situado em uma estação de pesagem de caminhões na cidade de Ashland, Ohio (EUA).

As fibras devem ter sido originalmente introduzidas numa tentativa de fortalecer a matriz de cimento, sem se fazer distinção da diferença entre a resistência à tração do material e a sua tenacidade (ROSA, 2005).

O interesse despertado por esse estudo pode ser explicado pela expectativa de bons resultados no desenvolvimento de novos materiais, na economia de tempo no preparo do concreto reforçado com fibras de aço, em face ao tempo necessário para montagem e execução da armadura transversal, ou mesmo pela vantagem das fibras proporcionarem maior ductilidade à ligação (HOLANDA, 2002)

A introdução de fibras de aço no concreto transforma o seu comportamento na ruína de frágil para dúctil, diminuindo esse ponto fraco do material. Essas fibras apresentam grande vantagem com relação a outros tipos devido à sua alta resistência à tração e grande capacidade de aderência à matriz que a envolve (ARAÚZ, 2002).

## **2.6 USO DE FIBRAS NO BRASIL**

Devido ao comportamento técnico relativamente conservador dos construtores e projetistas brasileiros, a introdução de fibras de aço no concreto produzido no Brasil foi lenta, tornando-se mais efetiva nos anos 90, quando foi iniciada a produção das fibras no mercado brasileiro (VILLARES, 2001).

O primeiro registro da adição de fibras de aço para concreto projetado ocorreu na construção do túnel Ayrton Senna, em 1995, com a finalidade de revestimento.

A utilização desse compósito no Brasil vem se consolidando cada vez mais, sendo mais freqüentes aplicações na área de pisos e pavimentos, principalmente no sul e sudeste do país. A execução do piso do Terminal Libra 35 do Porto de Santos / SP merece destaque por ter sido utilizado como reforço do concreto somente a adição de fibras de aço, mesmo com condições de cargas atuantes muito elevadas, o que é normal para um piso portuário, aonde alguns contêineres podem chegar a pesar até 120 toneladas (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Outro exemplo de aplicação do CRFA foi a construção do piso da Fábrica de Tratores John Deer, em Triunfo/RS, em meados de 2006, com área de aproximadamente 41.000 m<sup>2</sup>, onde foi executado um piso com 16 cm de espessura

e dosagem de 25 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço com fator de forma igual a 75, utilizando concreto de 30 MPa, sendo consumidas aproximadamente 200 toneladas de fibras.

Também podemos citar a construção do piso da Fábrica da Bayer, em Belford Roxo/RJ, também em 2006, com área aproximada de 17.000 m<sup>2</sup>, espessura de 12 cm, dosagem empregada de 25 kg/m<sup>3</sup> de fibras com fator de forma igual a 75 e concreto de 30 MPa, tendo consumido aproximadamente 50 toneladas de fibras de aço.

### 2.6.1 PORTO DE SANTOS

O piso portuário, ilustrado na figura 2.19, foi executado entre fevereiro e julho de 2006 com a espessura de 35 cm, sendo utilizado concreto com Fck de 35 MPa e adição de 30 Kg / m<sup>3</sup> de fibras, com consumo total de 380 toneladas. A área total de execução foi de 36.500 m<sup>2</sup>.

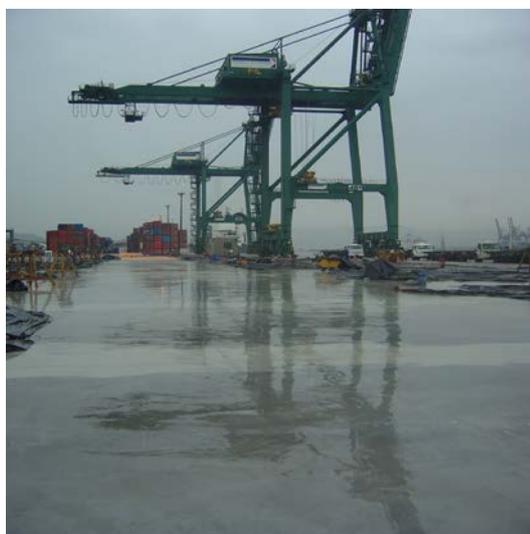


Fig. 2.19 - Libra terminal 35 S/A – Porto de Santos/SP  
(Fonte: Eng. Ivan Marassatto - Maccaferri, 2006)

As fibras utilizadas apresentavam comprimento de 60 mm e diâmetro de 0,80 mm, resultando em um fator de forma de 75. Apresentavam Módulo Elástico de 210 GPa e teor de 4.224 fibras por quilo.

## 2.7 USO DE FIBRAS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

No estado de Pernambuco, apesar da técnica de execução de pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço ainda não estar consolidada, podemos destacar como exemplo de boa execução, o piso do Galpão da Schincariol em Recife, no ano de 2007, conforme a figura 2.20.

Foram utilizadas fibras com fator de forma de 75, com dosagem de 25 kg / m<sup>3</sup>, totalizando aproximadamente 21 toneladas. A área do piso aproximada era de 7.000 m<sup>2</sup> com espessura de 12 cm. O concreto utilizado apresentava Fck de 30 MPa e FctM,k de 4,2 MPa. O piso foi executado com placas de dimensões de 10,00 x 8,00 m.



Fig. 2.20 - Execução de piso da Schincariol – Recife/PE  
(Fonte: Eng. Ivan Marassato - Maccaferri, 2007)

O piso da Fábrica da Vitarella, empresa do ramo alimentício, foi executado em 2007 no Recife com a utilização de fibras de aço com fator de forma igual a 75. A espessura da placa foi de 15 cm e foi utilizada uma dosagem de 25 kg/m<sup>3</sup>. O consumo de fibras chegou a cerca de 150 toneladas.

Em 2008 temos como exemplo a execução do piso do galpão de armazenagem da rede de supermercados Correfour, também na cidade do Recife. A área de aplicação foi de 11.000 m<sup>2</sup>, sendo consumido um total de 40 toneladas de fibras de aço com fator de forma de 75. A dosagem empregada foi de 25 kg/m<sup>3</sup> e a espessura da placa executada foi de 15 cm.

De acordo com os exemplos de aplicação citados no Brasil e no Estado de Pernambuco, podemos observar que foram usadas nos demais casos fibras com fator de forma igual a 75. Entre as fibras de aço com baixo teor de carbono disponível no mercado nacional, este fator de forma é o mais alto em disponibilidade. Segundo NUNES e AGOPYAN (1998), quanto maior o fator de forma da fibra, maior será a tenacidade do compósito.

## **2.8 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

O concreto reforçado com fibras de aço é simplesmente um concreto convencional com adição à matriz de elementos descontínuos de aço, conforme mostra a figura 2.21. O material resultante, sob certos aspectos, apresenta desempenho estrutural superior ao original (GROSSI, 2006).



Fig. 2.21 – Concreto com adição de fibras no estado fresco  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:10 hs)

Fibras com adequada resistência mecânica à tração distribuídas homogeneamente dentro do concreto, constituem uma micro-armadura eficaz para combater o fenômeno da fissuração por retração, além de conferir considerável ductilidade, dependendo da quantidade e da resistência das mesmas. Em tais circunstâncias, proporciona-se grande tenacidade ao concreto (SARZALEJO et al., 2007).

Segundo DOMENICHINI et al. (1995) apud SARZALEJO et al. (2007):

***“A utilização de fibras dentro da matriz de concreto tem como finalidade a formação de um material composto onde o conglomerado, que pode ser já considerado um material constituído por um esqueleto de agregados disperso em uma pasta de cimento hidratada, está unido a um elemento de reforço, formado por material fibroso de diferente natureza”.***

Segundo FERRARI (2007), a incorporação de fibras curtas de aço, de elevada resistência à tração e ductilidade, na matriz de concreto, pode melhorar a sua capacidade de carga e de deformação. A resistência à tração da matriz não melhora, mas pode ser mantida uma capacidade portante pós-fissuração e podem ser suportadas deformações bem maiores do que a matriz sem adição.

BENTUR e MINDESS (1990) esclarecem que as fibras de aço não são tão eficientes quanto às armaduras contínuas para suportar esforços de tração, mas apresentam papel fundamental no controle da propagação de fissuras no concreto.

Após a ruptura da matriz de concreto, as fibras sofrem um processo de arrancamento que demanda uma maior quantidade de energia para deformação e ruptura do concreto, proporcionando uma maior tenacidade. O aumento da tenacidade do material é uma consequência da boa interação entre a matriz e as fibras, garantindo a transferência de tensões entre as partes (NUNES e AGOPYAN, 1998).

A eficácia das fibras na melhoria das propriedades mecânicas da matriz frágil de cimento é controlada pelos processos pelos quais a força é transferida para as fibras e pelo efeito de “costura” das fissuras, proporcionado pelas fibras em estágios avançados de carregamento (HOLANDA, 2002).

As fissuras existentes numa matriz de concreto podem ser interceptadas pelas fibras, que se opõe a tendência de alargamento das fissuras devido a sua aderência com a matriz. Mais energia é necessária para que ocorra a abertura das fissuras, ocorrendo um aumento na tenacidade do material. A ruína torna-se menos frágil, por conta de deformações plásticas e do escorregamento das fibras (FERRARI, 2007).

O acréscimo na energia necessária para fissuração do compósito faz com que o comprimento e a abertura das fissuras sejam controlados, tornando o material menos permeável e menos susceptível aos problemas de durabilidade associados à penetração de água e agentes agressivos (NUNES, 2006).

Além disso, o concreto reforçado com fibras de aço oferece a possibilidade de aumentar o espaçamento entre as juntas de controle. Pode-se aumentar a distância entre elas de 30% a 100% além do previsto originalmente pelos métodos convencionais, possibilitando a realização de placas com maiores dimensões (SARZALEJO et al., 2007).

## **2.9 MATRIZ DE CONCRETO**

O concreto, apesar das inúmeras vantagens, apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Além disso, tem uma resistência à tração bem inferior à compressão.

Segundo MEHTA E MONTEIRO (2008), a ruptura na tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é comprimido.

A reduzida capacidade de resistência à tração do concreto decorre da sua grande dificuldade de interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de esforço. Na tração, a direção de propagação da fissura é transversal à direção da tensão principal. Com o crescimento de cada fissura a área de suporte de carga fica reduzida, causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das mesmas, (FIGUEIREDO, 2000).

No concreto simples uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões. Esse desvio das linhas de tensão irá implicar numa concentração de tensões nas extremidades da fissura e se essa tensão superar a resistência da matriz ocorrerá à ruptura abrupta do material. Não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado (FIGUEIREDO, 1997).

No caso particular do concreto utilizado em pisos industriais, ele apresenta distintas formas de aplicação e sempre é aplicado em peças com elevada relação superfície exposta / volume, onde a secagem rápida do concreto ainda fresco provoca retração e conseqüentemente maior incidência de fissuras. Como as fibras atuam com bastante eficiência no controle de propagação de fissuras em matrizes cimentícias, estão cada vez mais sendo utilizadas na construção civil, caracterizando uma evolução no processo construtivo.

## **2.10 MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS**

Para facilitar o entendimento do reforço das fibras em uma matriz de concreto, Figueiredo (2000) ilustrou uma matriz com dois tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade e outra de alto módulo, mostradas na figura 2.22. Todas as fases foram consideradas como de comportamento elástico perfeito. O objetivo é comparar o reforço proporcionado pelas fibras de alto módulo e pelas de baixo módulo de elasticidade, a uma matriz de concreto de propriedades mecânicas semelhantes.

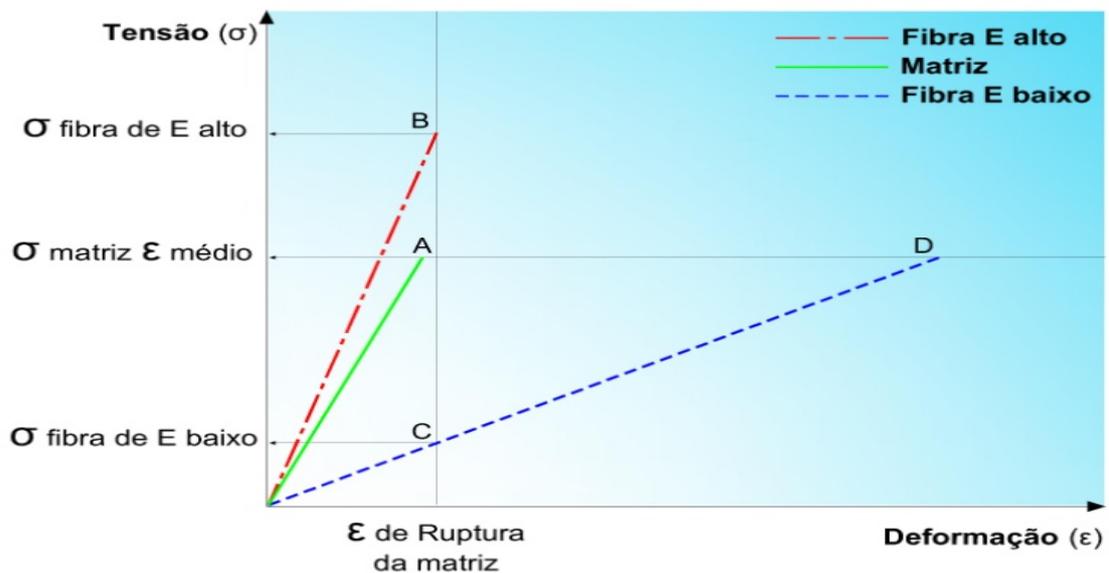


Fig. 2.22 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto  
(Fonte: Figueiredo, 2000)

A ruptura da matriz ocorre no ponto A. Nesse momento, as fibras de aço, consideradas de alto módulo de elasticidade apresentam elevado nível de tensão, o que possibilita a atuação dessas fibras como reforço já a partir do ponto B, caso sua resistência não seja superada, o que acontece quando se utiliza um baixo consumo de fibras. Na utilização de fibras de baixa resistência, sua capacidade de reforço pós-fissuração será prejudicada ou até inexistente, pois no momento da ruptura da matriz, elas já estarão rompidas (FIGUEIREDO, 2005).

No caso das fibras de baixo módulo, na ocorrência da ruptura da matriz, elas apresentam uma tensão muito baixa neste nível de deformação (ponto C). Para atuarem como reforço elas deveriam se deformar até o ponto D, apresentando assim o mesmo nível de tensão da matriz fissurada, ou seria necessário um elevado teor das mesmas para se chegar ao mesmo nível de tensão da matriz sem a necessidade de um deslocamento acentuado.

No primeiro caso, mesmo que as fibras tivessem resistência suficiente para conseguirem se deformar até o ponto D, a matriz já estaria completamente fraturada.

Na segunda hipótese, um elevado teor possivelmente tornaria inviável a aplicação do material.

## **2.11 MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES**

Segundo BENTUR e MINDESS (1990), a transferência de tensões entre a matriz e as fibras ocorre antes e após a fissuração da matriz. Antes da fissuração, a transferência de tensões é de natureza elástica, as deformações na interface são compatíveis para a fibra e a matriz e a transferência de tensões ocorre por aderência.

A tensão de aderência desenvolvida na interface é necessária para distribuir o carregamento externo entre as fibras e a matriz, já que possuem diferentes módulos de elasticidade. Desta forma, os dois componentes apresentarão a mesma deformação na interface (HOLANDA, 2002).

O mecanismo elástico é dominante enquanto o limite de resistência ao cisalhamento na interface fibra-matriz não é superado pelas tensões de cisalhamento, não ocorrendo descolamento das fibras. Nessa etapa, a fibra ainda não atua como ponte de transferência de tensões através das fissuras (NUNES e AGOPYAN, 1998).

Após a fissuração, ocorre ruptura da adesão da matriz com as fibras, e o processo de transferência de tensões na interface entre os dois componentes passa a ser controlado por tensões de atrito (BENTUR e MINDESS, 1990).

A transição da transferência de tensões elásticas para tensões por atrito ocorre quando a tensão tangencial na interface excede a resistência de aderência entre a fibra e a matriz. Inicia-se a ruptura da adesão e as tensões tangenciais de atrito começam a atuar na interface (FERRARI, 2007).

A tensão de cisalhamento supera a resistência ao cisalhamento da interface fibra-matriz, ocorrendo descolamento da fibra e posterior escorregamento e arrancamento da mesma. As tensões de cisalhamento por atrito são distribuídas uniformemente ao longo da interface fibra-matriz. As fibras atuam como ponte de transferência de tensões (NUNES e AGOPYAN, 1998).

A eficiência da fibra, que providencia mecanismos de absorção de energia relacionados com a ruptura da aderência fibra/matriz e o arrancamento das fibras presentes na zona de fissura, depende da sua interação com a matriz, que garante a transferência de tensões para as fibras e vice-versa, conforme ilustrado na figura 2.23.

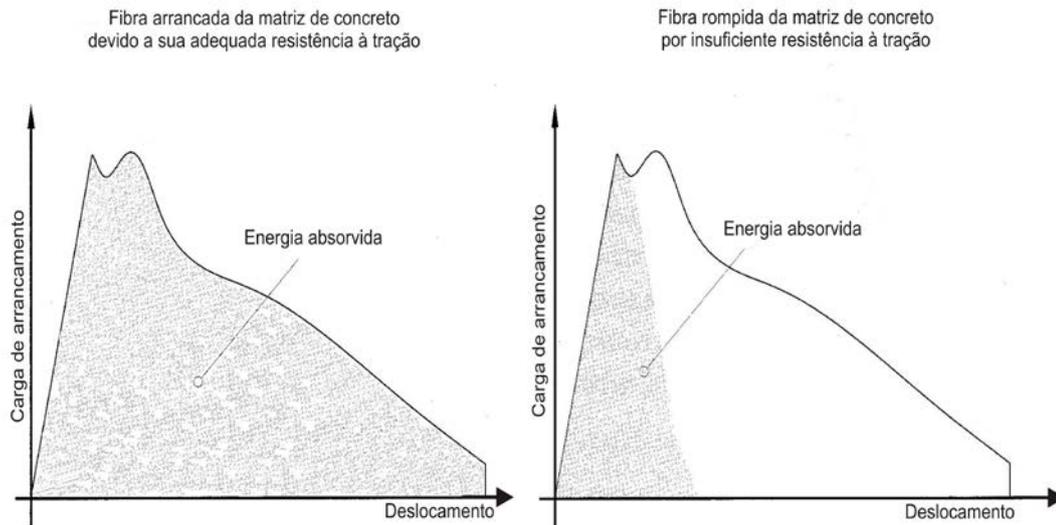


Fig. 2.23 - Interação Fibra x Matriz – Importância da resistência à tração das fibras  
(Fonte: Sarzalejo et al., 2007)

Segundo BALAGURU e SHA (1992) apud HOLANDA (2002), quando uma força de tração é aplicada à matriz, parte dela é transferida para as fibras. Aparecem tensões tangenciais ao longo da superfície das fibras, as quais auxiliam na transferência de parte da força aplicada para as fibras.

Para as fibras com ancoragem em gancho, existe o mecanismo de transferência de tensões através da ancoragem mecânica da fibra na matriz, conseguida através das deformações nas extremidades das fibras (NUNES e AGOPYAN, 1998). A variação da eficiência entre a interface fibra-matriz como consequência da diferente forma da fibra é mostrada na figura 2.24. A solicitação de carga para o deslocamento da fibra é maior com a presença da ancoragem. A presença do gancho mobiliza um maior volume da matriz para resistir à extração da fibra (FERRARI, 2007).

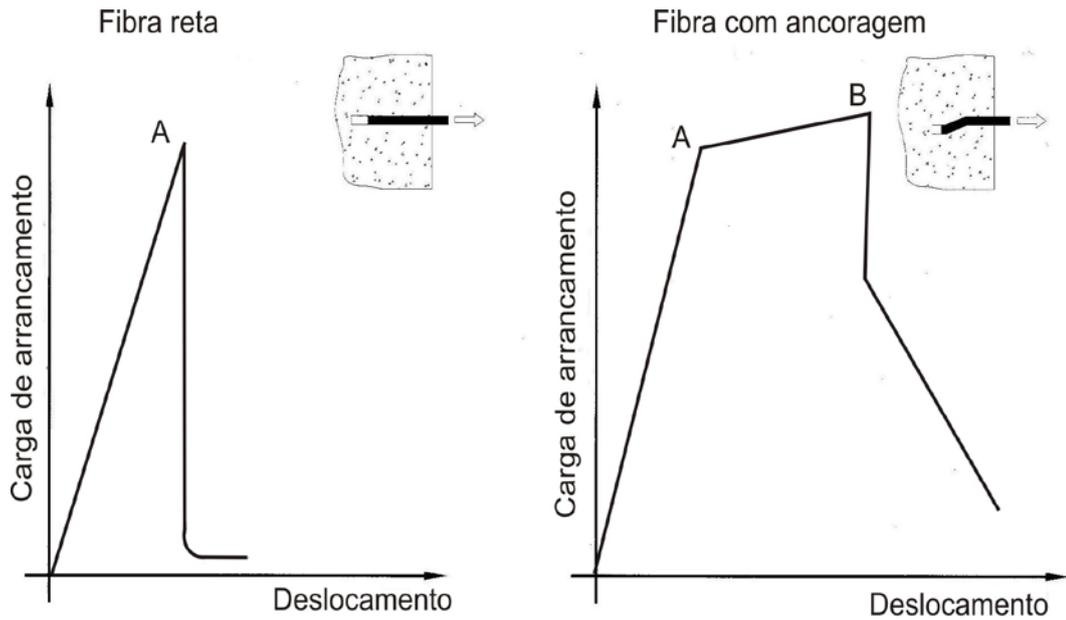


Fig. 2.24 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra-matriz com a forma da fibra (Fonte: Sarzalejo et al. 2007)

## 2.12 PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA

A utilização de critérios racionais para a escolha e dosagem da fibra é muito importante. Para se obter resultados positivos, ou seja, para que as fibras atuem com sucesso no mecanismo de ponte de transferência de tensões, as mesmas devem apresentar comprimento e volumes adequados, além de uma boa interação com a matriz. O nível de tensão que as fibras conseguem transferir pelas fissuras depende dos seguintes fatores:

### 2.12.1 VOLUME CRÍTICO

O volume crítico corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante do compósito a partir da ruptura da matriz, sendo que para dosagens maiores que o volume crítico, o compósito continua aceitando níveis crescentes de carregamentos (FIGUEIREDO, 2000), conforme apresenta a figura 2.25.

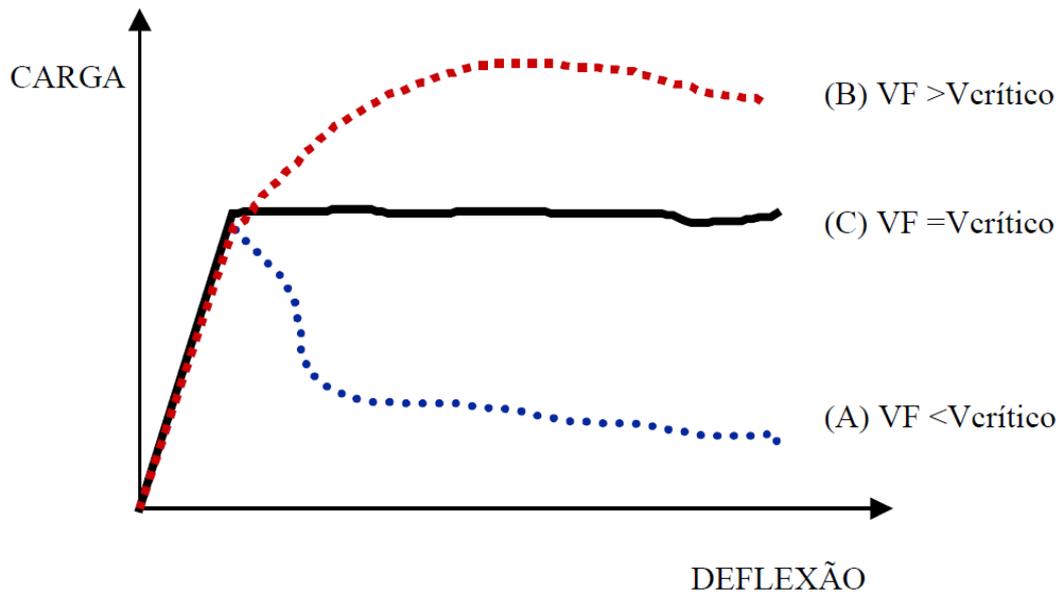


Fig. 2.25 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (Fonte: Figueiredo, 2000)

Segundo FIGUEIREDO (2000), as fibras de aço não se destinam ao mero controle de fissuração, pois como elas apresentam elevado módulo de elasticidade podem ser destinadas ao reforço primário do concreto, como nos componentes de pequena espessura, onde as barras de aço podem não ser utilizadas, como em painéis. Para outras aplicações, que não são as de reforço, tal qual no controle da retração, são denominadas de reforço secundário (ROSA, 2005).

Um volume crítico da ordem de 0,31% do volume de concreto foi apresentado por AVESTON et al. (1971) apud FIGUEIREDO (2000), sendo obtido da seguinte maneira:

- Primeiras definições:

deformação última da matriz:  $\epsilon_{mu}$

tensão última da matriz:  $\sigma_{mu}$

volume crítico de fibras em porcentagem:  $V_{fcrit}$

deformação da fibra:  $\epsilon_f$

tensão última das fibras:  $\sigma_f$

módulo de elasticidade da fibra:  $E_f$

módulo de elasticidade da matriz:  $E_m$

volume do compósito:  $V_C$

volume de fibras no compósito:  $V_f$

volume da matriz no compósito:  $V_m$

- O volume total do compósito é igual ao volume de fibras mais o volume da matriz:

$$V_C = V_f + V_m = 1$$

- Na ruptura da matriz, a deformação da fibra é a mesma da matriz:

$$\epsilon_f = \epsilon_{mu}$$

- A tensão aplicada na fibra é:

$$\sigma_f = \epsilon_{mu} \times E_f$$

- A tensão de ruptura da matriz:

$$\sigma_{mu} = \epsilon_{mu} \times E_m$$

- Assim:

$$\sigma_c \times V_C = \sigma_f \times V_f + \sigma_m \times V_m$$

$$\sigma_c \times 1 = \sigma_f \times V_f + \sigma_m \times (1 - V_f)$$

$$\sigma_c = \epsilon_{mu} \times E_f \times V_{f_{crit}} + \sigma_{mu} \times (1 - V_{f_{crit}}) \quad (1)$$

- Na ruptura da matriz, o carregamento é transferido para as fibras:

$$\sigma_c = \sigma_{fu} \times V_{f_{crit}}$$

- Portanto:

$$\sigma_{fu} \times V_{fcrit} = \epsilon_{mu} \times E_f \times V_{fcrit} + \sigma_{mu} \times (1 - V_{fcrit}) \quad (2)$$

- Logo:

$$V_{fcrit} = \frac{\sigma_{mu}}{(\sigma_{fu} - \epsilon_{mu} \times E_f + \sigma_{mu})} \quad (3)$$

- Sabe-se que:

$$E_c = E_f \times V_f + E_m \times V_m = E_f \times V_{fcrit} + E_m \times (1 - V_{fcrit})$$

- Tem-se:

$$E_f = \frac{E_c - E_m + E_m \times V_{fcrit}}{V_{fcrit}} \quad (4)$$

- Portanto:

$$V_{fcrit} = \frac{\epsilon_{mu} \times E_c}{\sigma_{fu}} \quad (5)$$

Para o concreto reforçado com fibras temos:

$$\epsilon_{mu} = 100 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_{mu} = 3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fu} = 1000 \text{ MPa}$$

$$E_f = 200 \text{ GPa}$$

Obtém-se um volume crítico de fibras de 0,31 %. Esta modelagem considera as fibras contínuas e perfeitamente alinhadas ao eixo de tensões principais. Na prática, as fibras são descontínuas e distribuídas de maneira aleatória. Dessa maneira, é preciso utilizar fatores de eficiência para se obter uma maior aproximação entre a teoria e a prática. O fator de eficiência majorador do volume crítico está associado ao volume de fibras empregado, dessa forma a equação (1) passará a ser:

$$\sigma_c = \epsilon_{mu} \times E_f \times \eta_1 \times V_{fcrit} + \sigma_{mu} \times (1 - \eta_1 \times V_{fcrit}) \quad (6)$$

A equação (2) passa a ser:

$$\sigma_{fu} \times \eta_1 \times V_{fcrit} = \epsilon_{mu} \times E_f \times \eta_1 \times V_{fcrit} + \sigma_{mu} \times (1 - \eta_1 \times V_{fcrit}) \quad (7)$$

A equação (3) passa a ser:

$$V_{fcrit} = \frac{\sigma_{mu}}{(\sigma_{fu} - \epsilon_{mu} \times E_f + \sigma_{mu}) \times \eta_1} \quad (8)$$

O volume crítico corrigido passa a ser o volume crítico sem correção dividido por pelo fator de eficiência:

$$V_{fcrit} = \frac{\epsilon_{mu} \times E_c}{\sigma_{fu} \times \eta_1} \quad (9)$$

Adotou-se o valor do fator de eficiência referente às fibras orientadas em duas direções, pois é normalmente o esperado para essa situação (FIGUEIREDO, 2000):

$$\eta_1 = 0,375$$

Com isso, chega-se ao valor do volume crítico para fibras descontínuas e distribuídas de maneira aleatória de 0,83 %, o que representa uma dosagem mínima de 64,74 kg/m<sup>3</sup>, o que pode inviabilizar a produção de determinado compósito devido ao custo final. Na maioria dos casos, a utilização se encontra abaixo do volume crítico, buscando-se o controle das fissuras de retração e aumento da ductilidade.

Segundo FIGUEIREDO (2005), a utilização de fibras de aço com volumes abaixo do crítico traz como vantagem a pouca influência exercida sobre a trabalhabilidade, pois quanto maior a quantidade de fibras maior será a coesão.

Para NUNES (2006), grandes volumes de fibras incorporados à matriz podem prejudicar o comportamento pós-fissuração em função dos problemas de compactação decorrentes da grande quantidade de fibras presentes no compósito.

Desta forma, um volume excessivo de fibras pode trazer prejuízos na resistência mecânica do compósito em vez dos benefícios em termos de tenacidade proporcionados pela adição das mesmas.

Segundo o EHE (2008), os elementos estruturais de concreto reforçados com fibras de aço devem conter um volume mínimo de fibras de 20 kg/m<sup>3</sup> de concreto, não sendo aconselhadas dosagens abaixo desse valor.

### **2.12.1.1 FIBRAS X ARMADURA DUPLA - COMPARATIVO DE CUSTOS**

Primeiramente foi realizado um comparativo de custos entre a execução de uma placa de concreto de 15 cm de espessura com reforço de armadura dupla e uma placa de 15 cm de espessura adicionada de fibras de aço com fator de forma igual a 75 e dosagem de 25 kg/m<sup>3</sup>.

A resistência à compressão do concreto para os dois casos foi a mesma. O volume de fibras utilizado foi abaixo do volume crítico, caso mais usual. Foram consideradas espessuras iguais para mostrar que mesmo abrindo mão da vantagem de se obter menores espessuras com o concreto fibro-reforçado, custos inferiores são obtidos em comparação com a placa estruturalmente armada. O custo final do concreto com fibras nessa comparação foi de aproximadamente 72% do estruturalmente armado.

O fator diferencial é que no concreto fibro-reforçado não são necessários o bombeamento, a utilização de espaçadores e a mão-de-obra do ferreiro. Além do mais, o gasto com as fibras para essa dosagem foi menor, como é mostrado no quadro 2.2. Os preços foram tirados do banco de dados SINAPI (sistema nacional de pesquisa de custo e índice da construção civil), localidade Recife, mês de novembro de 2009.

materias	custo unitário R\$	tela soldada		fibras de aço	
		quant./m <sup>2</sup>	custo/m <sup>2</sup>	quant./m <sup>2</sup>	custo/m <sup>2</sup>
concreto fck 30 Mpa	261,54 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	39,23	0,15	39,23
armadura dupla	4,60 / kg	11,27 kg	51,84	na	na
fibras FF=75 - 25 kg/m <sup>3</sup>	6,90 / kg	na	na	3,75 kg	25,87
mão de obra - ferreiro	7,20 / h	0,15	1,08	na	na
selagem de juntas	0,66 / m	4,00 m	2,64	4,00 m	2,64
lona plástica	0,65 / m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup>	0,65	1,00 m <sup>2</sup>	0,65
mão de obra lançamento e adensamento - concreto	32,96 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	4,94	0,15 m <sup>3</sup>	4,94
cura	1,10 / m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup>	1,10	1,00 m <sup>2</sup>	1,10
bombeamento	20,00 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	2,10	na	na
espaçadores	0,35 / und	1 und	0,35	na	na
<b>custo p/ m<sup>2</sup></b>			<b>103,93</b>		<b>74,43</b>

Quadro 2.2 - Comparativo de custos de um piso reforçado com malha dupla (estruturalmente armado) e com reforço de fibras de aço com teor de adição de 25 kg/m<sup>3</sup> (Fonte: o autor)

Um segundo comparativo foi feito entre duas placas de características iguais as anteriores, utilizando o mesmo tipo de fibras, mas com dosagem de 65 kg/m<sup>3</sup>, caracterizando um volume igual ao crítico. A resistência à compressão do concreto foi mantida igual para ambos os casos.

Nesse comparativo o reforço com fibras de aço se mostrou cerca de 10 % acima do reforço com malha dupla, como mostrado no quadro 2.3. Mesmo sem a necessidade de bombear o concreto, sem uso de espaçadores e mão-de-obra do ferreiro, o valor ficou acima do valor da placa com malha dupla devido ao custo das fibras em decorrência do maior volume utilizado. Os preços são baseados nos insumos SINAPI (sistema nacional de pesquisa de custo e índice da construção civil), localidade Recife, mês de novembro de 2009.

materias	custo unitário R\$	tela soldada		fibras de aço	
		quant./m <sup>2</sup>	custo/m <sup>2</sup>	quant./m <sup>2</sup>	custo/m <sup>2</sup>
concreto fck 30 Mpa	261,54 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	39,23	0,15	39,23
armadura dupla	4,60 / kg	11,27 kg	51,84	na	na
fibras FF=75 - 65 kg/m <sup>3</sup>	6,90 / kg	na	na	9,75 kg	67,28
mão de obra - ferreiro	7,20 / h	0,15	1,08	na	na
selagem de juntas	0,66 / m	4,00 m	2,64	4,00 m	2,64
lona plástica	0,65 / m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup>	0,65	1,00 m <sup>2</sup>	0,65
mão de obra lançamento e adensamento – concreto	32,96 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	4,94	0,15 m <sup>3</sup>	4,94
Cura	1,10 / m <sup>2</sup>	1,00 m <sup>2</sup>	1,10	1,00 m <sup>2</sup>	1,10
bombeamento	20,00 / m <sup>3</sup>	0,15 m <sup>3</sup>	2,10	na	na
espaçadores	0,35 / und	1 und	0,35	na	na
<b>custo p/ m<sup>2</sup></b>			<b>103,93</b>		<b>115,84</b>

Quadro 2.3 - Comparativo de custos de um piso reforçado com malha dupla (estruturalmente armado) e com reforço de fibras de aço com teor de adição de 65 kg/m<sup>3</sup> (Fonte: o autor)

## 2.12.2 COMPRIMENTO CRÍTICO

Segundo GROSSI (2006), comprimento crítico da fibra é o comprimento da fibra acima do qual o estado limite último se dar por ruptura da fibra. É aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento, proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo BALAGURU e SHA (1992) apud HOLANDA (2002), comprimento crítico é o comprimento embutido que fornece maior resistência ao arrancamento, sem ocasionar a ruptura da fibra. O comprimento da fibra deve ser suficiente para garantir uma aderência necessária com a matriz e evitar arrancamentos com facilidade demasiada (EHE, 2008).

Com a utilização de fibras com comprimento menor que o crítico, quando as mesmas estiverem trabalhando como ponte de transferência serão arrancadas onde tiverem o menor comprimento embutido. Com o comprimento da fibra igual ao crítico, a tensão atuante no centro da mesma será igual a sua tensão de ruptura, como se vê na figura 2.26. O comprimento acima do crítico levará a fibra à ruptura

sem que a mesma atue como ponte de transferência de tensões, pois a tensão de aderência fibra-matriz será muito alta, assim a fibra não vai passar pelo mecanismo de atrito fibra-matriz, pois vai romper antes do descolamento.

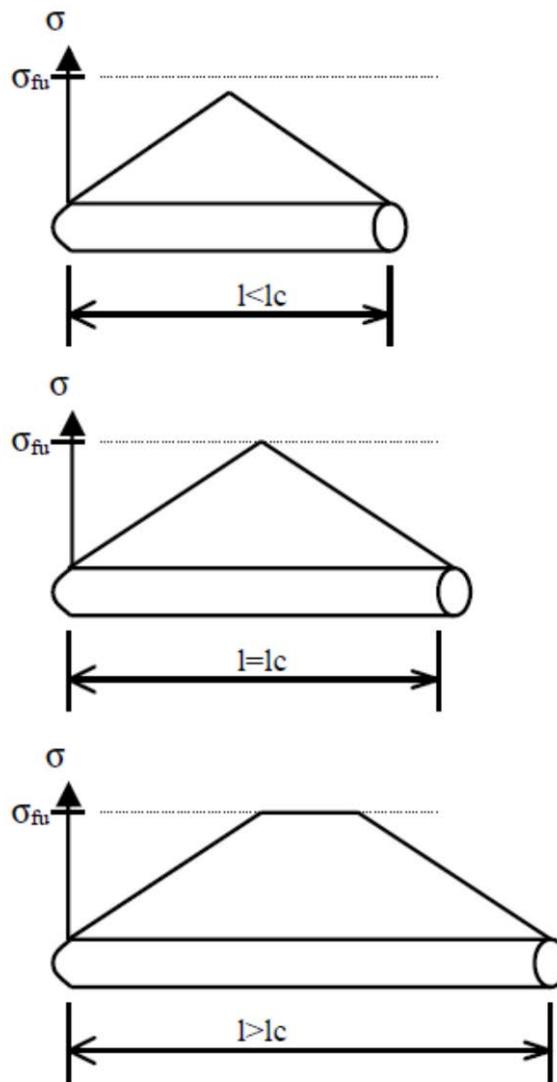


Fig. 2.26 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico  
(Fonte: Figueiredo, 2000)

Segundo MILLER (2008), um comprimento adequado de fibras deve ser aquele que confira a sua distribuição aleatória na matriz e esteja compatível com a dimensão máxima do agregado.

No concreto projetado, o comprimento da fibra deve ser inferior a  $2/3$  do diâmetro do tubo (EHE, 2008). Com isso, para manter a compatibilidade dimensional entre fibra e

agregado, reduz-se o diâmetro máximo do agregado para 9,5 mm (FIGUEIREDO, 1997).

No caso de pavimentos, onde não há grandes restrições quanto à dimensão dos componentes do concreto, é possível utilizar fibras mais longas, com até 60 mm de comprimento, compatíveis com agregados de maiores dimensões (19mm e 25mm).

Segundo NUNES et al. (2001) apud NUNES (2006), em ensaios de tenacidade à flexão foi demonstrado que o comprimento da fibra influencia na tenacidade do compósito apenas para deslocamentos verticais maiores. Para deslocamentos verticais menores, onde as fissuras ainda não estão se propagando, o aumento da tenacidade é consequência do número de fibras distribuídas na matriz, ou seja, o aumento da tenacidade é dependente, nessa situação, do número de fibras que interceptam uma fissura.

### **2.12.3 COMPATIBILIDADE DIMENSIONAL**

Deve-se avaliar a correta escolha do tipo de fibra a ser empregada para que as mesmas possam interceptar as fissuras. A fibra que deve atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras deve ter um comprimento tal que facilite o seu correto posicionamento em relação à fissura. Quando não há uma compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura.

Segundo FIGUEIREDO (2005), as fibras devem ter comprimento maior ou igual ao dobro da dimensão máxima do agregado, possibilitando a interceptação das fissuras pelas fibras dispersas no concreto. Quanto maior o agregado, maior a dificuldade para a uniformização das fibras na mistura.

Segundo NUNES (2006), quando a abertura da fissura ainda é pequena, o comprimento da fibra pouco contribui para o desempenho do compósito. Entretanto, ele não pode ser negligenciado quando de sua escolha para reforço da matriz. Deve-se considerar o aspecto da probabilidade da fissura ser interceptada pela fibra e neste sentido o comprimento da fibra deve ser considerado quando da compatibilidade dimensional entre a fibra e o agregado.

A figura 2.27 ilustra a existência de compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, onde as fibras interceptam as fissuras. Na figura 2.28 observa-se a incompatibilidade dimensional entre agregados e fibras, onde as fibras praticamente não interceptam as fissuras.

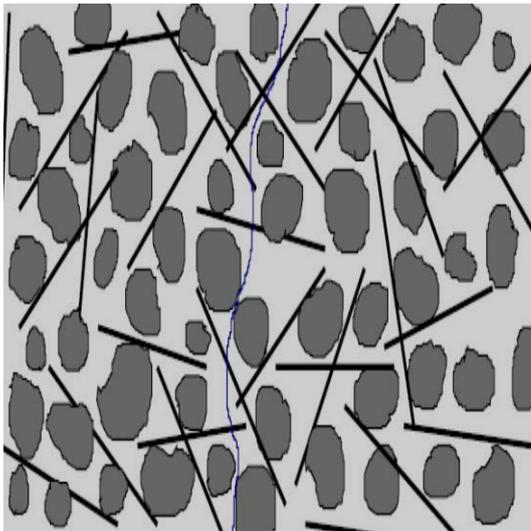


Fig. 2.27 - Existência de compatibilidade dimensional entre agregados e fibras  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

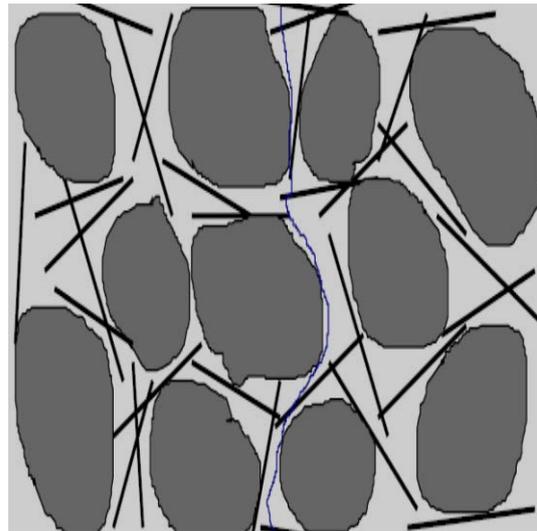


Fig. 2.28 - Inexistência de compatibilidade dimensional entre agregados e fibras  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

#### 2.12.4 FATOR DE FORMA DAS FIBRAS

As fibras são caracterizadas geometricamente pelo fator de forma, dado pela relação entre o seu comprimento e o seu diâmetro equivalente. Segundo NUNES (2006), o fator de forma é um índice capaz de indicar com apenas um número o grau de eficiência da fibra em função da sua geometria.

As fibras normalmente apresentam uma elevada área específica em função da alta relação comprimento/diâmetro e conseqüentemente uma elevada área de interface entre fibra e matriz. O aumento do fator de forma aumenta a área disponível para aderência por unidade de volume, passando por um mínimo que equivale a uma partícula esférica (NETO e PARDINI, 2006), como demonstrado na figura 2.29.

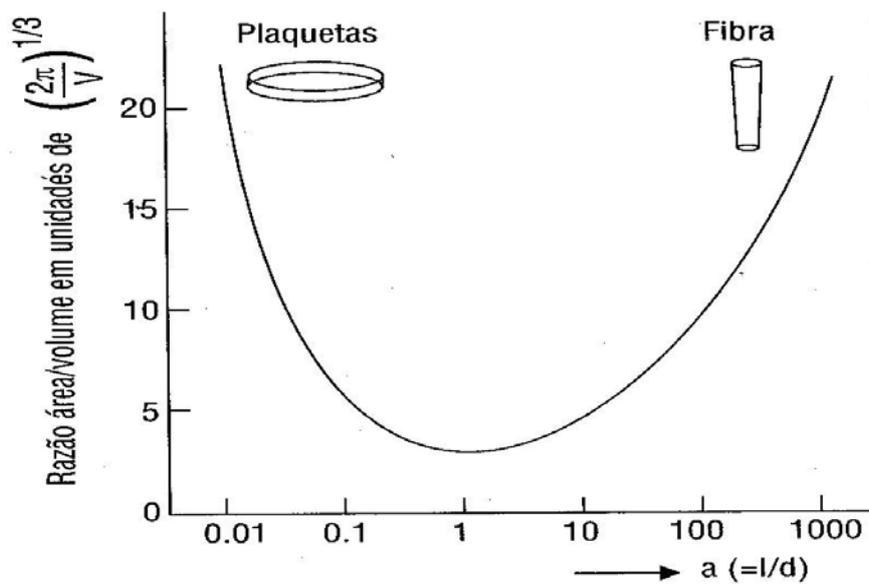


Fig. 2.29 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um dado volume em função do fator de forma (Fonte: Neto e Pardini, 2006)

O aumento do fator de forma em uma fibra com comprimento constante representa redução no seu diâmetro. Com isso, reduz-se o espaçamento entre as fibras e aumenta-se o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensões no compósito.

O aumento do fator de forma também pode representar o aumento no comprimento da fibra, melhorando a aderência fibra-matriz. A resistência ao arrancamento da fibra é aumentada, demandando uma quantidade maior de energia para arrancá-la da matriz. De qualquer maneira, quanto maior o fator de forma da fibra, maior será a tenacidade do compósito (NUNES e AGOPYAN, 1998).

Segundo SARZALEJO et al. (2007), com o incremento do fator de forma, diminui-se a quantidade de fibras necessária para alcançar um determinado resultado, conforme a figura 2.30.

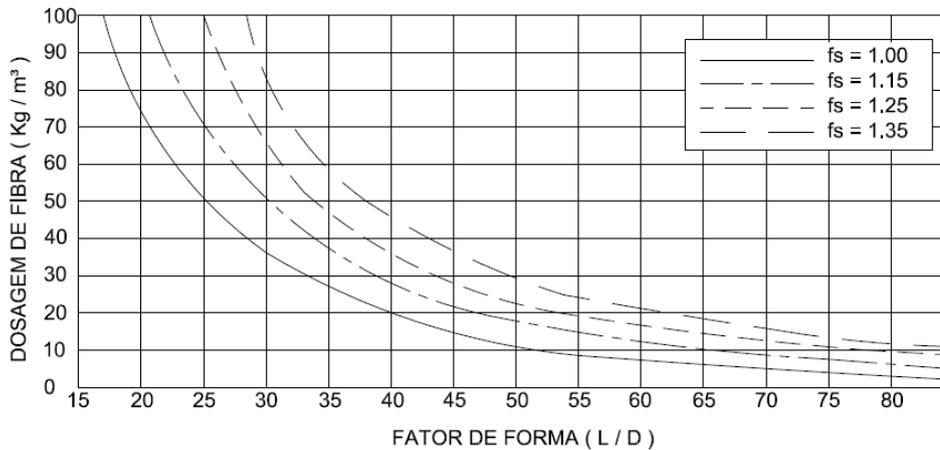


Fig. 2.30 - Dosagem x fator de forma das fibras  
(Fonte: Sarzalejo et al., 2007)

## 2.13 NORMAS DA ABNT RELATIVAS AO USO DE FIBRAS

A falta de normas brasileiras sobre a execução de pisos de concreto reforçados com fibras de aço é um degrau a ser superado. Esta escassez de normas nacionais pode influenciar na propagação da técnica construtiva. Não existem referências normativas de cálculo no Brasil para esse tipo de compósito. No ano de 2007 foram publicadas duas normas focando o uso de fibras de aço para concreto.

Uma delas foi a revisão da Norma NBR 8890:03 – Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaios, que previu o uso de fibras de aço como reforço de tubos. Esta Norma descreve, entre outros, o ensaio de compressão diametral de tubos de concreto reforçados com fibras de aço para águas pluviais e esgotos sanitários, bem como a aparelhagem necessária para fazê-lo.

Comparando com a especificação antiga, a nova norma apresenta maiores exigências para os tubos reforçados com fibras de aço em relação aos convencionais. Ela não permite qualquer tipo de dano ao componente quando submetido à carga de fissuração prevista para o tubo convencionalmente armado.

Entretanto ela é inovadora, pois possibilita a utilização de uma inovação tecnológica mesmo sem a mesma ter sido aplicada de maneira rotineira nas obras.

A norma NBR 15530:07 – Fibras de aço para concreto – especificação, estabelece parâmetros de classificação para fibras de aço de baixo teor de carbono e define os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e ao dobramento. Ela é direcionada ao produto fibra, sem regular a verificação de desempenho da mesma no concreto, possibilitando simplesmente uma garantia de comportamento mínimo.

Em outras palavras, não é possível garantir o bom desempenho de um CRFA apenas usando-se uma fibra de boa qualidade, mas verificando como a mesma foi corretamente especificada, dosada e o controle do material feito segundo o recomendado pela boa técnica. Portanto o uso de uma fibra que atenda a norma não garante o desempenho final no CRFA.

### 3 PISOS INDUSTRIAIS

Segundo RODRIGUES et al. (2006), o tamanho do mercado brasileiro de pisos industriais de concreto é de 24 milhões de metros quadrados por ano, divididos da seguinte maneira:

- 8 milhões m<sup>2</sup>/ano sem projetos;
- 8 milhões m<sup>2</sup>/ano sem projeto formal, mas com acompanhamento de engenheiros;
- 8 milhões m<sup>2</sup>/ano obras com projeto.

O piso industrial constitui uma das partes mais vitais da construção industrial e é a mais vulnerável e problemática. O desempenho do piso industrial de concreto é extremamente importante, sejam em áreas de produção ou logística, pois qualquer interrupção no processo de produção gera enormes prejuízos financeiros (RODRIGUES, 2007).

Esses pisos cresceram muito em importância a partir da década de 1990, quando realmente passaram a ser considerados de fato como um equipamento da indústria. Seus métodos de execução têm evoluído significativamente nas últimas décadas. Segundo RODRIGUES (2004), a história da pavimentação industrial no Brasil é bastante recente, com pouco mais de vinte anos, antes disso havia pouca preocupação com critérios de projetos.

Ela relata que antes de 1995 era costume no Brasil o dimensionamento de pavimentos industriais em concreto simples, de acordo com a didática americana, baseados nos critérios da PCA (Portland Cement Association). A partir daquele ano surgiram novas tendências de dimensionamentos, vindas da Europa, conduzindo a pavimentos esbeltos e placas de grandes dimensões.

A grande diferença entre as escolas americana e européia é que a primeira trabalha com concreto simples, produzindo estruturas de elevada rigidez e placas de pequenas dimensões, e a segunda foca pavimentos reforçados.

O Brasil nos últimos dez anos vem seguindo a metodologia europeia. O avanço das técnicas de dimensionamento de pavimentos estruturalmente armados colaborou para esse fato. O emprego dessa escola resulta em pisos economicamente mais atraentes, tanto sob o ponto de custo inicial como de manutenção, em contrapartida, exigem execução mais cuidadosas.

O dimensionamento conservador pode gerar a inviabilização da construção por aumentar demasiadamente seu custo. O sub-dimensionamento pode causar problemas estruturais e diminuir a vida útil do pavimento ou piso, gerando prejuízos com a execução de reparos e reforços e provocando transtornos aos usuários (OLIVEIRA, 2000). Um projeto correto contribui para garantir as vantagens apresentadas pelos pavimentos de concreto, entre elas a durabilidade.

### **3.1 PISOS DE CONCRETO**

O piso pode ser considerado um sistema constituído de elementos que não podem falhar, pois o todo pode ser comprometido. Suas características, como resistência, integridade superficial e planicidade, passam a ser percebidas diretamente pela produção e, qualquer reparo necessário interfere diretamente no processo produtivo (RODRIGUES, 2007).

Uma das principais vantagens dos pisos e pavimentos de concreto de cimento Portland é a durabilidade. Algumas vezes esses pisos podem funcionar mais de vinte anos sem sofrer intervenções para reparo ou manutenção (OLIVEIRA, 2000).

Os pisos de concreto são considerados rígidos e têm concepções diferentes dos flexíveis, como mostra a figura 3.1. A camada de rolamento também funciona como estrutura, redistribuindo os esforços e diminuindo a tensão imposta à sub-base, normalmente a única camada entre a placa e o subleito. Nos pavimentos flexíveis a distribuição das cargas é realizada em uma área muito menor, gerando grande pressão na fundação do pavimento, conforme a figura 3.2.



Fig. 3.1 - Diferenças básicas entre pavimentos rígidos e flexíveis  
(Fonte: ABCP)

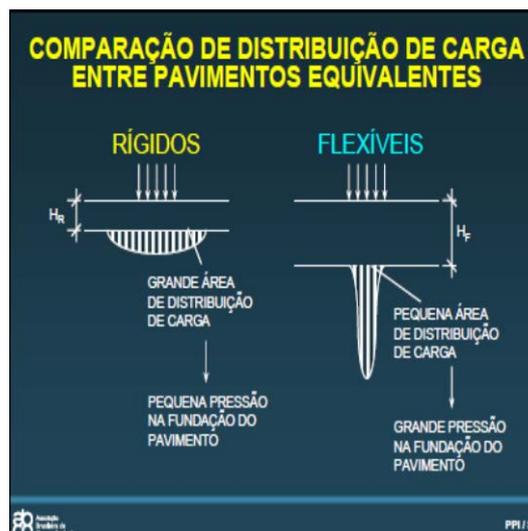


Fig. 3.2 - Esquema de distribuição de cargas em pavimentos rígidos e flexíveis  
(Fonte: ABCP)

### 3.2 FINALIDADE DOS PISOS DE CONCRETO

Segundo CHODOUNSKI e VIECILI (2007), as finalidades básicas do piso de concreto são:

- 1) Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo carregamento;
- 2) Proporcionar perfeito rolamento, quanto ao conforto, limpeza e segurança, das cargas móveis, possuindo textura superficial adequada à futura utilização;
- 3) Resistir aos esforços mecânicos (flexão, compressão, impacto e abrasão) e a ataques químicos ou biológicos (ácidos, bases, sangue, açúcar, sulfatos, bactérias, entre muitos outros).

Segundo o ACI 302 R (2004), a qualidade de um piso industrial de concreto depende da obtenção de uma superfície de elevada dureza e durabilidade, plana e relativamente livre de fissuras, que esteja em conformidade com um nível de referência e que possua uma textura superficial adequada à futura utilização.

A superfície deve ainda garantir a facilidade de limpeza, o escoamento de líquidos, a movimentação de cargas, o deslocamento de equipamentos, além de resistência à

abrasão e durabilidade que atendam às necessidades do usuário final. Portanto, diante de tantos pré-requisitos, nota-se a importância desse elemento do sistema.

### 3.3 TIPOS DE PISOS DE CONCRETO

#### 3.3.1 PISO DE CONCRETO SIMPLES

São pisos onde não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado, pois eles não apresentam nenhum tipo de reforço, como armaduras, por exemplo. Podem ser utilizadas barras de transferência nas junções das placas, o que não descaracteriza esse material (OLIVEIRA, 2000). A figura 3.3 ilustra a seção de um piso de concreto simples sem utilização de barras de transferência.

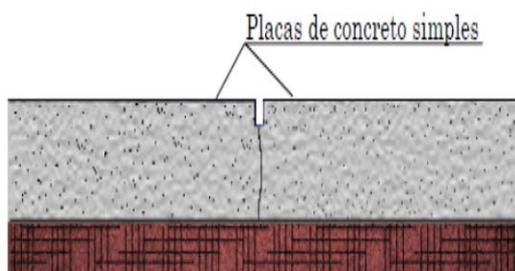


Fig. 3.3 – Piso de concreto simples  
(Fonte: Oliveira, 2000)

O dimensionamento do piso é efetuado limitando-se a tensão de tração na parte inferior da placa de concreto a certo valor, chamado admissível, correspondente à resistência à tração na flexão dividida por um coeficiente de segurança (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Apesar de amplamente empregado nos pavimentos rodoviários e urbanos, a placa de concreto simples tem sido pouco adotada na execução de pisos industriais no Brasil. Na maior parte dos casos, os concretos recebem algum tipo de adição.

A desvantagem desse tipo de piso é a grande limitação nas dimensões das placas, sendo recomendados comprimentos máximos da ordem de 4 a 6 metros, largura de 3 a 4 metros e espessura entre 15 e 20 cm, para pisos sem dispositivos de ligação. Com a utilização desses dispositivos, as dimensões podem chegar a 7 m e a espessura variar de 16 a 45 cm (OLIVEIRA, 2000).

Na prática, em alguns casos no Brasil já foram executadas placas com mais de 50 cm de espessura, em virtude das elevadas cargas atuantes, como em pisos portuários, por exemplo.

Devido à limitação no tamanho das placas, obtém-se um maior número de juntas, acarretando em maiores probabilidades de ocorrência de patologias ligadas as mesmas. Além do mais, uma maior quantidade de juntas significa maiores quantidades de material destinado ao tratamento das mesmas, como o epóxi semi-rígido.

Por outro lado, a placa de concreto simples apresenta rigidez bastante superior a dos pisos armados em razão de espessuras maiores, fato que diminui o risco e a incidência de problemas de empenamento.

### **3.3.2 PISO COM ARMADURA DE RETRAÇÃO**

É um dos mais empregados nos pavimentos industriais. É constituído de uma armadura (tela soldada) posicionada no terço superior da placa de concreto, justamente para combater as fissuras de retração hidráulica. Dessa maneira é possível executar placas com dimensões bem maiores se comparadas às de concreto simples. A figura 3.4 mostra a seção de um piso de concreto com armadura de retração.

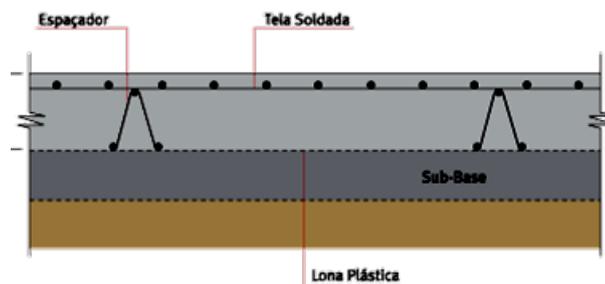


Fig. 3.4 – Piso com armadura de retração  
(Fonte: Rodrigues, 2004)

Nos EUA comumente se emprega armadura de retração composta por barras de aço de diâmetro maior que no Brasil, o que confere maior rigidez além de facilitar o seu posicionamento. O espaçamento entre as barras é, em geral, em torno de 40 a 45 cm, permitindo que os operários trabalhem pisando entre as mesmas.

No nosso país, grande parte das armaduras de retração utilizadas são telas eletro soldadas com fios de diâmetro reduzidos, conseqüentemente apresentam pequena rigidez. São comuns problemas de fissuras causados por posicionamento inadequado das armaduras de retração (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Na utilização de veículos guiados por indução magnética, as barras de pequeno diâmetro devem estar posicionadas a mais de 5 cm da superfície, e na utilização de barras com diâmetro superior a 5/8", a distância para a superfície da placa deve ser superior a 7,5 cm, com possibilidade de acarretar em prejuízos no controle das fissuras de retração e do empenamento.

### 3.3.3 PISO DE CONCRETO ESTRUTURALMENTE ARMADO

Ao contrário do pavimento simples, o pavimento estruturalmente armado pode ser dimensionado com placas de dimensões bastante superiores, bastando para isso estabelecer uma taxa de armadura compatível com as suas dimensões.

Outro ponto fundamental para a sua adoção é relativo às questões ambientais, por consumir consideravelmente menores volumes de matéria prima – como os agregados – do que os pavimentos flexíveis e os pavimentos de concreto simples.

Na Europa este tipo de piso é empregado há mais de 50 anos (RODRIGUES, 2006). Ele possui duas malhas de armadura: uma situada abaixo do plano médio (armadura positiva), resistindo à tração provocada pelo momento, e outra acima, para controlar a fissuração por retração, de acordo com a figura 3.5.

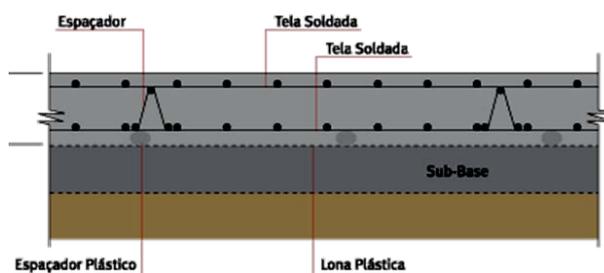


Fig. 3.5 – Piso estruturalmente armado  
(Fonte: Rodrigues, 2004)

No dimensionamento dos pisos estruturalmente armados, tira-se proveito da boa resistência à compressão do concreto associada à elevada resistência à tração do aço, o que resulta sempre em placas de menores espessuras em comparação aos pisos de concreto simples. A resistência à tração do concreto é desprezada para efeito de dimensionamento. São empregados em áreas de carregamentos elevados. É possível liberar o uso desses pisos em um prazo muito menor que os outros pisos.

A distância entre juntas é função da taxa de armadura de retração adotada, variando entre 5 e 20 metros, apesar de já existirem diversas referências de obras no Brasil com placas de até 40m (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

### 3.3.4 PISO DE CONCRETO PROTENDIDO

Tanto no Brasil como no exterior, já foi bastante utilizado em aeródromos. É utilizado quando há tráfego pesado, tendo sua principal aplicação nas pistas e nos pátios de aeroportos. Um dos principais exemplos dessa aplicação é a pista do aeroporto Tom

Jobim, no Rio de Janeiro, que foi construída há cerca de 30 anos (RODRIGUES et al., 2006).

O grande atrativo desses pisos é a possibilidade de execução praticamente sem juntas, diminuindo consideravelmente as patologias ligadas às mesmas. Segundo OLIVEIRA (2000), pode-se executar placas de até 150 metros de comprimento.

Apesar das vantagens, esse sistema se desenvolveu timidamente, sendo utilizado em algumas situações esporádicas, apesar do sucesso das experiências anteriores. A figura 3.6 mostra a seção de um piso de concreto protendido.

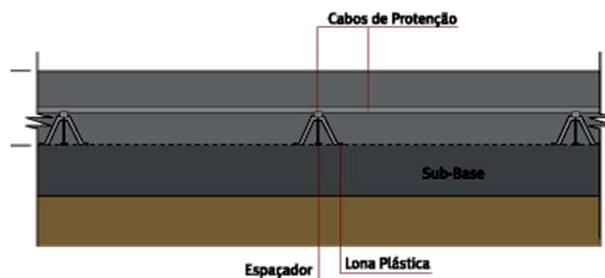


Fig. 3.6 - Piso protendido  
(Fonte: Rodrigues, 2004)

### 3.3.5 PISO DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

A chegada das fibras de aço no Brasil promoveu uma verdadeira revolução na engenharia de pavimentação industrial, pois abriu toda metodologia de dimensionamento empregada na Europa, possibilitando o aperfeiçoamento das técnicas de projeto de outros tipos de pavimento, em particular o armado (RODRIGUES et al., 2006). É um material relativamente recente e tem sido muito estudado nas duas últimas décadas. A figura 3.7 demonstra a seção de um piso de concreto reforçado com fibras de aço.

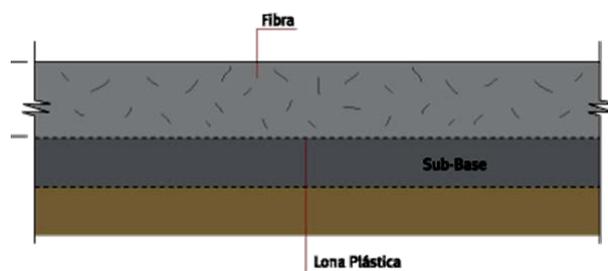


Fig. 3.7 - Piso reforçado com fibras  
(Fonte: Rodrigues, 2004)

O uso de fibras de aço no concreto possibilita o incremento da tenacidade do concreto, representada pela energia necessária para conduzir a peça ao colapso, permitindo ao concreto maiores deformações antes da ruptura. Segundo FIGUEIREDO (2005), a tenacidade representa o trabalho dissipado no material até certo nível de deflexão.

Em peças estruturais onde há possibilidade de redistribuição de esforços, como lajes apoiadas sobre meio elástico, pisos de concreto e pavimentos rígidos, as fibras de aço substituem as armaduras convencionais, tanto como função estrutural bem como função de combate à retração e controle de fissuração.

O concreto com fibras está cada vez mais sendo utilizado em pavimentos de aeroportos, pavimentos de estradas, leito de pontes, pisos industriais, estruturas de suporte de máquinas, dormentes e tanques de estocagem.

Esses elementos reforçados com fibras de aço apresentam capacidade de carga muito superior que as peças de concreto simples, além de mudarem o comportamento do concreto de frágil para dúctil, permitindo carregamentos crescentes mesmo após início do processo de fissuração.

Segundo FIGUEIREDO (2000), a adição de fibras ao concreto muda o comportamento do mesmo, que deixa de ter o caráter marcadamente frágil. A fibra serve como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas.

CARNIO (1998), afirma que a adição das fibras de aço ao concreto controla a abertura das fissuras e a sua propagação. Devido a esse controle da fissuração, o material apresenta capacidade de se deformar, absorvendo os esforços.

Mesmo em dosagens baixas, é garantido grande controle de fissuração do concreto e incremento da resistência ao impacto, pela ligação a nível micro das porções frágeis ao redor dos agregados graúdos resistentes (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Segundo o ACI (1998), nos pisos reforçados com fibras de aço, a execução das ranhuras para obtenção de textura antiderrapante deverá ser realizada o mais tarde possível a fim de evitar o afloramento excessivo das fibras.

Nos pisos de concreto com acabamento liso-espelhado, deve haver apenas uma atenção especial na retirada das fibras que afloram ainda durante o acabamento, de modo que a superfície acabada não apresente um número excessivo de fibras na superfície.

### **3.3.5.1 VANTAGENS OBTIDAS COM A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO COM FIBRAS DE AÇO**

Segundo o ACI 360 R (2006), com a utilização de fibras de aço como reforço do concreto, são obtidas as seguintes vantagens:

- Aumento da resistência ao impacto e a fadiga, quando comparado com reforço com barras ou malhas de aço;
- Simplicidade e praticidade na execução;

Segundo CHODOUNSKI e VIECILI (2007), outras vantagens também são obtidas, como:

- Execução de placas menos espessas;
- Aumento da distância entre as juntas;

FIGUEIREDO (2005) afirma que a maior vantagem é o aumento da **tenacidade** do material.

### **3.4 PATOLOGIAS E RECUPERAÇÃO DE PISOS INDUSTRIAIS EXECUTADOS COM FIBRAS DE AÇO**

As patologias nos pisos industriais de concreto podem significar enormes perdas financeiras, uma vez que, dependendo da intensidade das mesmas, poderá ocorrer uma interrupção no processo produtivo das indústrias.

Para minimizar o surgimento dessas indesejáveis ocorrências, é indispensável cuidados com o projeto, a execução e o uso de materiais adequados. Deve-se fazer o máximo para prevenir problemas, já que os gastos com a recuperação podem ser até superiores ao custo de execução do piso.

Muitas vezes, os pisos de concreto em áreas industriais não recebem nenhum tipo de revestimento, ficando a superfície do concreto sujeita as solicitações das cargas. O desgaste prematuro, uma fissuração acentuada e o empenamento das bordas, podem reduzir seriamente o valor estético e funcional do piso.

Apesar da adição de fibras de aço ao concreto minimizar algumas patologias, como a retração, por exemplo, este material não está imune a elas. Podem ser obtidos melhores resultados, mas não se pode evitá-las completamente.

#### **3.4.1 UMIDADE ASCENDENTE**

Esse problema está diretamente ligado a durabilidade dos revestimentos aplicados. Uma umidade excessiva próxima à superfície da placa do concreto é um desastre para a aderência de pinturas e revestimentos resinados, de pisos de madeira, vinílicos e de carpetes. É fundamental para o desempenho do sistema de revestimento que o concreto seja deixado “secar” antes da sua instalação (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

O tempo necessário para que o concreto apresente uma umidade compatível com a aplicação dos revestimentos varia em função da sua composição, das condições

ambientais e da espessura da placa. Quanto mais espessa a placa e maior a umidade do ar, mais tempo levará para que a umidade do concreto seja reduzida a um nível aceitável. Com relação ao fator água/cimento, quanto menor for essa relação, menor será o tempo de secagem do concreto.

Entretanto, mesmo que inicialmente seco no momento da aplicação do revestimento, o concreto pode ter o fluxo de vapor d'água retomado para a superfície pela mudança das condições de temperatura e umidade do ambiente, ou pode ter esse fluxo induzido pela presença de fonte externa de umidade.

A umidade que migra para a superfície da placa de concreto pode ser proveniente da própria água de amassamento ou do subleito saturado, em razão da existência de lençol freático alto, ou saturar-se acidentalmente com o vazamento de tubulações de águas.

Para controle da umidade ascendente, usualmente se empregam uma ou duas camadas de lona de polietileno de espessura de 0,2 mm ou mais, conforme mostrado na figura 3.8. Essa lona é colocada sob os pisos de concreto, e é denominada “barreira ao vapor” ou “retardadora de vapor”, sendo a segunda denominação mais coerente, pois a mesma não é 100% eficiente, mas promove uma sensível redução do fluxo de umidade.



Fig. 3.8 - Lona de polietileno – Piso industrial no Estaleiro de Suape/PE  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:08 hs)

Existe uma divergência na literatura com relação à posição mais adequada dessa camada de “bloqueio”. Uma vertente acredita que o uso imediatamente inferior a placa de concreto pode agravar a ocorrência de fissuração por retração plástica, empenamento e o “borrachudo”, pois embora ela bloqueie a umidade ascendente, ao mesmo tempo ela dificulta a perda de água do concreto para a base granular, aumentando assim a retração diferencial entre o topo e a base da placa.

Por outro lado, a lona plástica instalada abaixo da camada granular retém essa parcela da água do concreto perdida para a base, a qual não tendo outro caminho, tenderá a migrar para o topo da placa sob a forma de vapor, de forma bem mais lenta, acarretando no atraso da aplicação do revestimento.

Essa camada granular também desempenha importante papel na interrupção da ascensão da umidade por capilaridade, pois dependendo do tipo de solo, a água pode subir por poucos centímetros ou mesmo por poucos metros, como nos solos argilosos (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

O fato é que se empregado um concreto de alta qualidade, com baixa relação água/cimento e baixo consumo de água, o desempenho do piso será o mesmo, independentemente de concreto e lona de polietileno estiverem separados pela camada granular ou não (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Além das medidas descritas anteriormente, é indispensável o planejamento e construção de um adequado sistema de drenagem para se evitar a saturação do subleito.

### **3.4.2 FISSURAS**

Segundo CHODOUNSKI (2007), há dois tipos de fissuras em pisos de concreto: fissuras estruturais e fissuras de retração. O aparecimento de fissuras nos pisos e pavimentos de concreto, normalmente está relacionado à:

- Recalques de fundação;

- erros de projeto;
- procedimentos executivos inadequados;
- falha dos materiais; e
- sobrecarga.

As fissuras estruturais geram grande preocupação ao usuário do piso, pois se entende que a falha da fundação, do projeto ou da execução, possa comprometer o desempenho, e que o processo de deterioração seja progressivo e inevitável. Em áreas de tráfego pesado e intenso, a evolução da fissuração pode ser acelerada. Não se tomando medidas para a recuperação da estrutura, a fissuração pode evoluir rapidamente, conduzindo ao comprometimento da operação sobre o pavimento.

Fissuras induzidas pela retração restringida do concreto são menos preocupantes, pois o agente causador da patologia é dissipado com o tempo e os reparos podem ser executados sabendo-se que a causa foi controlada e os riscos de nova ocorrência são pequenos.

### **3.4.2.1 FISSURAS DE RETRAÇÃO**

A retração por secagem é a redução de volume do concreto devido à perda de água com o tempo, que quando restringida induz ao aparecimento de tensões de tração na peça de concreto. A consequência da retração excessiva do concreto pode ser a fissuração e empenamento do piso.

Os tecnologistas sempre buscaram concretos de baixa retração mediante o ajuste do consumo de água e aglomerante, do teor de finos e de argamassa, etc. CHODOUNSKI e VIECILI (2007) tentaram resumir os efeitos esperados na retração a partir de alguns parâmetros, como mostrado no quadro 3.1.

<b>PARÂMETRO DO TRAÇO</b>	<b>EFEITO ESPERADO NA RETRAÇÃO</b>	
CONSUMO DE ÁGUA	QUANTO MAIOR	MAIOR A RETRAÇÃO
RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO	QUANTO MAIOR	MAIOR A RETRAÇÃO
TEOR DE ADIÇÃO MINERAL	QUANTO MAIOR	MAIOR A RETRAÇÃO
TEOR DE FINOS/ARGAMASSA	QUANTO MAIOR	MAIOR A RETRAÇÃO
<b>VOLUME DE AGREGADOS</b>	<b>QUANTO MAIOR</b>	<b>MENOR A RETRAÇÃO</b>
ABSORÇÃO DOS AGREGADOS	QUANTO MAIOR	MAIOR A RETRAÇÃO
<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AGREGADO</b>	<b>QUANTO MAIOR</b>	<b>MENOR A RETRAÇÃO</b>

Quadro 3.1 - Parâmetros que interferem na retração do concreto  
(Fonte: Chodounski, 2007)

### 3.4.2.1.1 FISSURAS DE RETRAÇÃO PLÁSTICA

As fibras são efetivas no controle da fissuração porque elas são muito numerosas e porque elas estão pouco espaçadas. O papel de controle de fissuras se dá por meio da ligação entre as duas bordas da mesma.

É praticamente impossível eliminar a fissuração no concreto, em especial a devida à retração. Na realidade, o que se espera com a adição das fibras, é o retardamento da fissuração, para que o concreto possa adquirir resistência adequada para resistir às tensões geradas.

Alguns fatores como temperatura do ar e do concreto, umidade relativa do ar e velocidade do vento, combinados, podem causar uma elevada taxa de evaporação da água da superfície do concreto ainda no estado fresco.

Quando a taxa de evaporação da umidade do concreto fresco for maior que a taxa de exsudação, a camada de concreto mais próximo à superfície retrai. A retração diferencial entre a superfície e o concreto mais abaixo induz ao aparecimento de tensões. Nessa fase, o concreto é bastante susceptível à fissuração devido a sua baixíssima resistência.

As fissuras típicas de retração plástica são paralelas entre si, com espaçamentos entre 0,2 e 1,0 m, e normalmente, com profundidade entre 25 a 75 mm e grande abertura. Há situações da fissura atingir toda a seção da peça. A figura 3.9 mostra um exemplo de fissuras de retração plástica.



Fig. 3.9 – Fissuras de retração plástica  
(Fonte: Thomaz, 2008)

A diminuição da temperatura do concreto com adição de água gelada ou gelo, ou resfriamento dos agregados, colocação de anteparos para bloqueio do vento, alteração do horário de concretagens para período de menor temperatura e aspersão de neblina de água, são medidas que têm grande eficácia na redução desse tipo de fissuração.

A adição de fibras de aço e/ou polipropileno, em dosagens corretas, também atuam no “combate” a essa patologia. As fibras de polipropileno são inseridas ao concreto com o objetivo de, unicamente, controlar as fissuras de retração plástica, pois a capacidade de reforço das mesmas se limita às primeiras horas de vida do concreto, quando os módulos de elasticidade são compatíveis. Já as fibras de aço também controlam a propagação de fissuras de retração hidráulica.

#### **3.4.2.1.2 FISSURAS DE RETRAÇÃO HIDRÁULICA**

Esse tipo de fissura, normalmente apresenta abertura bastante variável e ocorre transversalmente ao sentido da placa. Um exemplo dessa patologia é mostrado na figura 3.10.

Em placas de grandes dimensões, em virtude da grande movimentação da placa durante a retração, as juntas ou as fissuras, quando aparecem, são de grande abertura.

Quando as fissuras surgem nas primeiras idades, indicam atraso nos procedimentos de corte das juntas de retração (juntas serradas) ou cura deficiente. Quando ocorrem em idades avançadas, podem indicar deficiências no projeto ou na execução.



Fig. 3.10 - Fissuras de Retração hidráulica  
(Fonte: o autor, 20/12/2009 às 6:55 hs)

A intensidade das tensões de tração induzidas pela variação de volume da placa de concreto é função do valor da retração (encurtamento unitário), do grau de restrição ao movimento da placa e dos valores do módulo de deformação.

Além das medidas a serem tomadas para redução da retração propriamente dita, outros fatores como especificação de um espaçamento adequado entre juntas, adição de fibras de aço e/ou emprego de armadura de combate à retração, podem contribuir para minimizar esse tipo de fissura de retração.

### 3.4.2.2 MICROFISSURAS - CRAQUEAMENTO

São caracterizadas por apresentarem pequenas profundidades ( $< 3\text{mm}$ ), abertura reduzida (microfissuras) e pequeno espaçamento entre si ( $\sim 50\text{mm}$ ). São pouco visíveis, mas com o tempo, principalmente em pisos expostos à sujeira excessiva, ficam destacadas devido ao acúmulo de pó no seu interior. A figura 3.11 mostra um exemplo de craqueamento.



Fig. 3.11 - Microfissuras – craqueamento  
(Fonte: o autor, 20/12/2009 às 7:25 hs)

Essa patologia não compromete estruturalmente a placa e não necessariamente indica o início de uma deterioração do piso. O aparecimento dessa patologia independe do tipo de reforço utilizado, podendo aparecer nos concretos com reforço de fibras.

Entre os fatores que contribuem para a ocorrência desse tipo de fissura temos a utilização de concretos com elevados teores de finos e agregados com excesso de impurezas, cura deficiente, condição de exposição da placa durante e logo após o acabamento e operações inadequadas de acabamento, como excesso de desempenho com acabadoras mecânicas, que induzem a subida excessiva de material fino.

### **3.4.2.3 REPARAÇÃO DE FISSURAS**

Independentemente de ordem estética, estrutural e de durabilidade, é necessária a reparação das fissuras. Existem dois tipos de fissuras, as ativas, que apresentam movimentos alternados de abertura e fechamento ao longo do tempo, e as passivas, quando não há movimentação. A definição dos procedimentos para reparo das fissuras só deverá ocorrer após a definição do tipo das mesmas.

Se a causa da fissura não for eliminada, o reparo deverá ser executado com materiais flexíveis, como poliuretano ou epóxi semi-rígido. Nesse caso, o tratamento consiste em selamento superficial da fissura. Caso as causas sejam identificadas e anuladas, a fissura poderá ser tratada com materiais rígidos.

#### **3.4.2.3.1 TRATAMENTO COM EPÓXI**

Com o auxílio de pressão, podem-se injetar fissuras de até 0,1 mm de abertura com epóxi. Segundo CHODOUNSKI e VIECILI (2007), há casos de injeções perfeitas em fissuras de 0,05 mm. As pressões de injeção não ultrapassam 0,5 MPa, podendo ser inferiores a 0,1 MPa para fissuras com abertura superior a 0,6 mm, e maiores que 0,6 ou 0,7 MPa, para fissuras com abertura menor que 0,1 mm.

Ao longo da fissura, num intervalo de 20 a 50 cm, fazem-se orifícios de diâmetros entre 12,50 mm e 20 mm para alojamento dos bicos de injeção. Quanto menor for a abertura da fissura, menor deverá ser o espaçamento entre os furos.

Em seguida é realizada a limpeza da superfície do concreto ao longo do comprimento da fissura. Colocam-se os bicos injetores e faz-se a colmatação superficial da fissura com material termoplástico, de modo que o epóxi injetado não “fuja”, a não ser pelos bicos instalados. O reparo em si é feito introduzindo o epóxi pelos bicos através de pressão, até que o mesmo comece a sair pelo bico seguinte, assim sucessivamente. A figura 3.12 ilustra um tratamento de fissura com epóxi semi-rígido.



Fig. 3.12 - Tratamento com epóxi semi-rígido  
(Fonte: Abreu, 2007)

### **3.4.2.3.2 TRATAMENTO COM POLIMETILMETACRILATO**

Esse polímero é caracterizado pelo alto peso molecular, baixíssima viscosidade, elevada resistência e cura rápida, o que o torna muito interessante para recuperação de fissuras nas estruturas de concreto. A baixa viscosidade faz com que esse material penetre em fissuras de pequena abertura, sendo possível sua utilização em fissuras com abertura de 0,1 mm, somente pela ação da gravidade (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

A preparação da superfície é feita de maneira idêntica ao caso da aplicação do epóxi. Como o material é inserido por gravidade, é importante o jateamento de ar sobre a fissura para a eliminação de toda a poeira interna, que poderia impedir o total preenchimento do polímero.

No reparo de placas empenadas e fissuradas, primeiramente deverá ser efetuada a estabilização da movimentação vertical das mesmas através da injeção de nata de cimento ou grauth sob a placa, para prosseguir com o tratamento da fissura.

### **3.4.3 CRUSTING (BORRACHUDO)**

Esta patologia descreve o comportamento elástico do concreto, semelhante ao que acontece nos solos com excesso de umidade. Ocorre um ressecamento superficial do concreto, criando a falsa impressão de que é o momento correto para início das operações de acabamento. As camadas inferiores não apresentam a mesma rigidez ou resistência, sendo assim, o peso das acabadoras não é suportado, tendo como consequência a ruptura da “casca” superficial, resultando em um comprometimento estético e funcional.

O termo “borrachudo” é utilizado nos pavimentos flexíveis para descrever um fenômeno que se inicia com a presença de umidade e que termina deixando depressões no revestimento final. Como exemplo, podemos supor uma concentração de água sobre o revestimento, normalmente “alojada” em alguma depressão, que com o tempo tende a infiltrar no pavimento. Essa água chega às camadas inferiores do pavimento gerando um adensamento. Como os pavimentos são flexíveis, eles acabam por acompanhar as deformações impostas pela base, mostrando as depressões chamadas “borrachudo”.

Nos dois casos, rígidos e flexíveis, a patologia está ligada a “umidades” nas camadas inferiores. Talvez por isto a utilização no meio construtivo do mesmo termo para representar fenômenos diferenciados.

Geralmente esta patologia nos pavimentos de concreto reforçados com fibras de aço está associada ao uso de acabadoras mecânicas, mostrada na figura 3.13, devido ao peso próprio das mesmas. É pouco provável a ocorrência deste problema em pisos com acabamento “vassourado” ou “lonado”, onde não se utilizam equipamentos pesados.



Fig. 3.13 - Acabadora mecânica  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:43 hs)

Quando se utiliza lona plástica diretamente sob o concreto, a mesma conduz a uma velocidade menor de endurecimento do mesmo, pois a lona é uma barreira a perda de água pela parte inferior da placa. Em concretagens a céu aberto, há uma probabilidade maior de perda de água na parte superior com o aumento temperatura ambiente, gerando retração diferencial.

Temperatura fria da sub-base, temperatura elevada do ar, baixa umidade relativa, exposição direta da placa ao vento e ao sol, e a própria dosagem do concreto integram a lista de fatores que podem gerar condições para a ocorrência deste fenômeno (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007). Uma baixa taxa de exsudação tende a favorecer a ocorrência dessa patologia, assim como placas mais espessas.

A adição de fibras de aço no concreto tende a diminuir a exsudação devido à diminuição da mobilidade da água por conta da elevada área específica das fibras, um fator que favorece o aparecimento da referida patologia. Por outro lado o uso de fibras de aço possibilita execuções de placas menos espessas, diminuindo a incidência do “crusting” nesse tipo de aplicação.

A recuperação do piso compreende na remoção parcial ou total do concreto na área afetada, sendo ambas as soluções bastante onerosas. Portanto, algumas medidas como atrasar as concretagens para períodos de maior temperatura onde se tem sub-base fria (regiões frias), realizar aspersão de água sobre o concreto para locais de temperatura elevada e baixa umidade, cobrir a placa com lona plástica evitando a

incidência direta de sol e vento, podem contribuir para redução do risco de ocorrência do borrachudo.

### 3.4.4 EMPENAMENTO

Segundo CHODOUNSKI e VIECILI (2007), a aplicação de uma tecnologia e conhecimento adequados na construção de pisos de concreto permite apenas uma redução da ocorrência do empenamento das bordas, visto que praticamente todos os pisos sofrem com essa patologia.

O empenamento nada mais é que a distorção das bordas e cantos da placa para cima, gerado por um gradiente de umidade e/ou temperatura entre as faces superior e inferior da placa.

Este problema é mais perceptível nas juntas construtivas. Lançar o concreto em faixas bastante largas para posterior execução das juntas serradas transversais e longitudinais acarreta em uma redução do problema de empenamento. A figura 3.14 mostra uma placa de concreto empenada.



Fig. 3.14 - Empenamento da placa  
(Fonte: o autor, 20/12/2009 às 7:13 hs)

A ocorrência do empenamento está diretamente relacionada com as características geométricas da placa, com o fenômeno da retração do concreto e as condições de exposição. Placas expostas a ambientes mais secos, com baixa umidade relativa do ar, apresentam maior retração e conseqüentemente maior empenamento (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

A utilização de armaduras para controle de fissuração por retração e para controle de empenamento das bordas e cantos, deve ser posicionada próxima a face superior da placa, a uma distância máxima de 5 cm. A utilização de fibras de aço no lugar dessas armaduras se torna uma alternativa eficiente, visto que o reforço da fibra não é localizado e sim distribuído de forma homogênea, eliminando a possibilidade de, dependendo da rigidez da armadura, esta se deslocar com a passagem dos trabalhadores ou até mesmo no lançamento do concreto.

Além disso, nas indústrias onde serão utilizados veículos guiados por indução magnética, que são baseados em sinais de radiofrequência emitidos por cabos dispostos no piso, as barras ou fios de pequeno diâmetro devem estar posicionadas a mais de 5 cm da superfície da placa, e para o caso de emprego de armaduras com bitola igual ou superior a 16 mm, essa distância mínima deverá ser de 7,5 cm.

Com o afastamento da armadura de combate de retração da superfície, há uma perda na eficiência do controle de fissuração e do empenamento dessa armadura. Não há restrição de uso das fibras de aço em pisos com veículos guiados por indução eletromagnética, uma vez que para as dosagens usuais, não ocorre à interferência nos sinais de comando desses equipamentos.

A substituição da armadura superior por fibras de polipropileno com emprego da armadura única inferior contribui para o aumento de risco de empenamento, visto que esta armadura restringe o encurtamento do concreto tornando maior a retração diferencial entre as faces superior e inferior da placa.

Apenas uma região próxima às bordas perde contato com a base, portanto a deflexão vertical devido ao empenamento não aumenta indefinidamente com o aumento do tamanho da placa (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Para se recuperar as placas afetadas, pode-se fazer estabilização, com injeção sob pressão de calda de cimento ou argamassa, através de furos executados ao longo

das bordas empenadas, com distância média de 50 cm entre os furos. O serviço deve ser completado com realização de polimento para desbaste da superfície caso as ondulações prejudiquem a utilização do piso.

Caso o empenamento seja excessivo, deve-se realizar a demolição de uma faixa, paralela à junta, com largura variando de 1 a 2 metros para cada lado da junta. A faixa deverá ser reforçada com armadura de retração a fim de minimizar a incidência de fissuras. O inconveniente desta solução é a criação de duas novas juntas, além da junta pré-existente.

### **3.4.5 DELAMINAÇÃO**

A delaminação é o deslocamento da camada superficial do concreto devido a um plano frágil criado em consequência do acúmulo da água de exsudação e/ou ar incorporado que ficam aprisionados ao encontrarem uma camada mais densa e menos impermeável em decorrência do selamento prematuro do concreto. Podem aparecer pequenas bolhas na superfície do concreto ou ocorrer o deslocamento propriamente dito da camada superficial durante as operações de espelhamento.

Geralmente ocorrem na fase final do desempenho (espelhamento), com o aumento da pressão exercida pelas pás cada vez mais inclinadas das acabadoras. As bolhas possuem diâmetros não superiores a 5 cm, enquanto que a delaminação pode chegar até mais de um metro quadrado, com espessuras de argamassa de 3 a 9 mm. Na figura 3.15 é mostrada uma placa delaminada.



Fig. 3.15 - Delaminação  
(Fonte: o autor, 20/12/2009 às 10:04 hs)

Existe uma estreita relação entre o fenômeno da delaminação e o borrachudo. As causas, como fatores intrínsecos do concreto, condições climáticas adversas e fatores ligados à execução, são comuns nas duas patologias. As medidas que podem ser tomadas para minimizar a ocorrência de borrachudo também são eficazes para redução do risco do aparecimento da delaminação.

A recuperação do piso pode compreender desde a remoção parcial em pequenas profundidades até a remoção total do concreto na área afetada, sendo ambas as soluções bastante onerosas.

Nos pisos com elevados requisitos de planicidade e nivelamento, a ocorrência dessa patologia é mais susceptível, pois o concreto superficial é trabalhado de forma mais agressiva e por um período de tempo mais longo.

### **3.4.6 ESBORCINAMENTO DE JUNTAS**

Pode ocorrer em pisos antigos ou mesmo em recém-executados. Nada mais é que a quebra das bordas das juntas em decorrência de diferentes fatores. Como é possível executar placas de maiores dimensões com a utilização de fibras de aço, possibilitando o aumento da distância entre as juntas de 30% a 100% em relação a

métodos convencionais (SARZALEJO et al., 2007), existe uma diminuição na quantidade de juntas no piso, conseqüentemente essa patologia ocorrerá com menor intensidade. A figura 3.16 mostra um exemplo dessa patologia.



Fig. 3.16 - Esborcinamento de juntas  
(Fonte: o autor, 20/12/2009 às 6:53 hs)

Uma das causas do esborcinamento é a presença de materiais incompressíveis no interior das juntas que não foram seladas corretamente, onde na movimentação por variação térmica das placas, os mesmos, ao serem comprimidos, danificam as respectivas juntas.

Excesso de vibração ao longo das fôrmas, resultando na subida excessiva de argamassa, ou falta de estanqueidade das mesmas resultam em bicheiras nas juntas. A movimentação das barras de transferência durante a concretagem, que é pratica corrente dos executores, acarretam em folgas, gerando perda de eficiência desses dispositivos, permitindo que ocorra a movimentação relativa entre placas adjacentes, quebrando as bordas das respectivas placas pelo impacto das rodas dos veículos.

Para o tratamento das juntas, os selantes semi-rígidos, como epóxi, devem ser aplicados na profundidade total do corte, nunca se utilizando limitadores de profundidade (ACI 302 R, 2004).

A correção das juntas esborcinadas deve ser feita através da recomposição das bordas com argamassa epoxídica. São realizados dois cortes paralelos englobando os trechos esborcinados e a posterior quebra do concreto entre eles. O reforço é executado com uma largura média de 25 a 30 mm para cada lado da junta e uma profundidade entre 20 a 25 mm (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

A argamassa para reforço deve apresentar uma resistência mínima à compressão de 55 MPa e à tração de 7 MPa.

### 3.4.7 DESGASTE POR ABRASÃO

Uma das mais importantes características para garantia de uma longa vida útil e baixa manutenção dos pisos industriais de concreto é a resistência à abrasão. Como a maior parte dos pisos executados em áreas fabris ou depósitos não recebem nenhum tipo de revestimento, ficam mais sujeitos a esta patologia, mostrada na figura 3.17.



Fig. 3.17 - Desgaste superficial por abrasão  
(Fonte: Tartuce, 2007)

A ação de desgaste por abrasão da superfície do piso pode ser causada pela solicitação das rodas dos veículos, pelo arraste dos garfos das empilhadeiras, pelo

arraste de pallets ou racks metálicos, e pelo impacto de ferramentas duras e pesadas.

Esta patologia pode gerar desde um simples desconforto estético até grandes transtornos na produção. A execução da cura, ainda que tardia, pode minimizar o prejuízo, assim como a redução da relação água-cimento. A intensidade e a qualidade das operações de acabamento influenciam fortemente na resistência à abrasão assim como a própria resistência à compressão do concreto, induzida pela redução da relação água-cimento.

Para pisos com desgaste acentuado, como tratamento pode-se fazer aplicação de endurecedores químicos de superfície. Outra medida para a melhoria da superfície é a realização de polimento da argamassa superficial, para desgastá-la, de modo a expor uma camada mais resistente, rica em agregados graúdos.

## 4 ELEMENTOS DE PROJETO

### 4.1 CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Além da verificação das propriedades mecânicas do material a ser utilizado, existem recomendações a serem seguidas para o correto dimensionamento da mistura a ser utilizada nos pisos industriais.

#### 4.1.1 RESISTÊNCIA MÍNIMA À COMPRESSÃO

Uma elevada resistência à compressão, por si só, não garante uma elevada durabilidade do piso. Mas, a durabilidade advém também de uma boa resistência do concreto (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

Para os pisos, a capacidade estrutural da placa é definida pela sua resistência à tração na flexão, que deve ser definida no projeto. Na obra, o controle tecnológico deve ser realizado em cima deste parâmetro, a menos que existam, para os materiais empregados, correlações confiáveis com outros parâmetros, como por exemplo, a resistência à compressão, cujo controle e ensaio são mais simples e menos onerosos.

O ACI 302 R (2004) define algumas resistências mínimas para o concreto conforme o uso e o nível de solicitação do piso, mostradas no quadro 4.1.

USO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
Pisos de edifícios comerciais e industriais (área de produção, depósitos, etc.)	> 28 MPa
Pisos industriais sujeitos ao tráfego pesado	> 31 MPa

Quadro 4.1 - Resistências mínimas à compressão do concreto para pisos comerciais e industriais  
(Fonte: Chodounski, 2007)

### **4.1.2 CONSUMO MÍNIMO DE CIMENTO**

O traço de um concreto para pisos industriais não deve ser baseado apenas na avaliação da resistência à compressão. Uma quantidade mínima de finos, representados pelo cimento, deve ser especificada para minimizar a ocorrência de exsudação e segregação, bem como proporcionar condições adequadas para o acabamento mecânico.

CHODOUNSKI e VIECILI (2007) sugerem para pisos em geral, um consumo mínimo de 325 kg de cimento por metro cúbico de concreto, com relação água/cimento máxima de 0,55.

É recomendada a utilização de cimentos Tipo CP II, em comparação aos do Tipo CP I e CP III, já que estes últimos normalmente aumentam o consumo de água na mistura.

### **4.1.3 AGREGADO GRAÚDO**

O emprego de agregados maiores resulta em redução da retração do concreto porque demandará menor quantidade de água, mas a resistência à tração na flexão é prejudicada. Quando se requer elevada resistência à tração na flexão, agregados menores devem ser utilizados. No entanto, a utilização de agregados menores pode prejudicar a resistência à abrasão do piso industrial.

Nos pisos reforçados com fibras de aço, o agregado graúdo deve ter diâmetro máximo igual à metade do comprimento da fibra utilizada. Normalmente se utilizam agregados britados maiores que 19 mm (SARZALEJO et al., 2007).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), agregados maiores que 19 mm não são recomendados para o uso em concreto com fibras de aço, pois são prejudiciais à trabalhabilidade. Durante os estágios iniciais de desenvolvimento desse material, pesquisadores recomendavam que fosse aconselhável não usar mais que 25 %, em peso, de agregado graúdo de 9 mm de dimensão máxima.

#### **4.1.4 ABATIMENTO**

A adição de fibras de aço ao concreto aumenta a coesão, diminuindo o abatimento. Como as fibras têm uma elevada área específica, é necessária uma maior quantidade de água de amassamento para conseguir trabalhabilidade. Como o aumento da quantidade de água normalmente é prejudicial ao concreto, é possível utilizar aditivos para essa finalidade.

A redução do consumo de água de amassamento é sempre benéfica sendo, portanto, vantajoso o uso de concretos com abatimento bastante reduzido. Com relação à trabalhabilidade, o oposto pode ser verdadeiro. O lançamento e o espalhamento do concreto com abatimento inferior a 70 mm são bastante difíceis e desgastantes. Por outro lado, abatimentos superiores a 120 mm ou 140 mm podem contribuir para a ocorrência da exsudação excessiva e segregação.

Sugere-se trabalhar com abatimentos entre 80 mm e 120 mm. Para concretos reforçados com fibras de aço com dosagens elevadas ( $> 35 \text{ kg/m}^3$ ), um abatimento maior pode ser necessário para minimizar a incidência de fibras na superfície (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007). Em alguns casos, a incorporação de aditivo superplastificante pode ser empregada com grande vantagem do ponto de vista técnico.

#### **4.1.5 TEOR DE ARGAMASSA**

Segundo FIGUEIREDO (2005), a dosagem do concreto com fibras deve começar com a determinação de um teor de argamassa adequado. O teor é invariavelmente superior ao de um concreto simples, pelo fato de a fibra ficar embutida na argamassa do concreto. Assim, quanto maior for o consumo de fibras, maior será o teor de argamassa necessário para envolvê-las de maneira adequada e garantir a aplicabilidade do material.

Segundo QUINTA (2007), o teor de argamassa adequado varia de 52 a 55 %.

## 4.2 TRABALHABILIDADE E MISTURA

A adição de fibras altera as condições de consistência do concreto fresco, e conseqüentemente a sua trabalhabilidade. Essa alteração independe do material que compõem a fibra, pois o que afeta o comportamento do material no estado fresco é, principalmente, a geometria da mesma (FIGUEIREDO, 2005). Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), independentemente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional a quantidade de fibras no concreto.

A trabalhabilidade pode ser verificada através do ensaio de abatimento do tronco de cone para teores de fibras inferiores a 60 kg/m<sup>3</sup>. Outro caminho para a verificação da trabalhabilidade no concreto com fibras é a utilização do Vebe (FIGUEIREDO, 2005). Um comparativo envolvendo teor de fibras x fator de forma x tempo de Vebe é apresentado na figura 4.1.

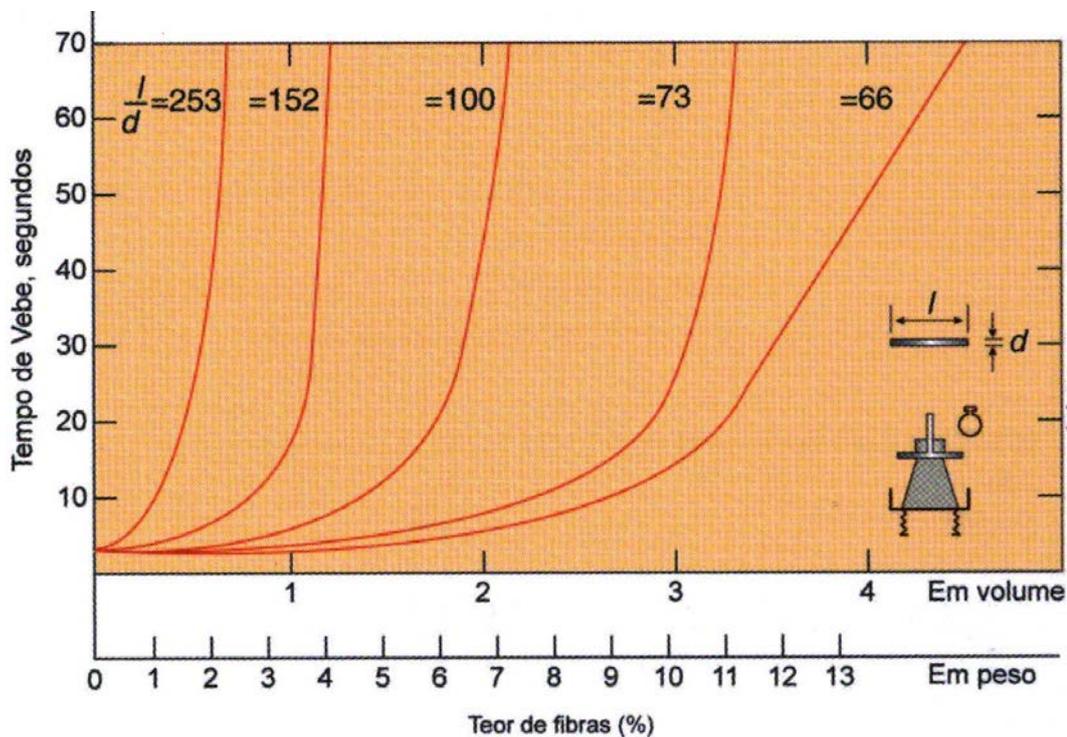


Fig. 4.1 – Teor de fibras x tempo de Vebe  
(Fonte: Mehta e Monteiro, 2008)

Já é comprovado que a adição de baixos teores de fibras altera pouco às condições de trabalhabilidade. Fibras de maior área superficial demandarão maior quantidade de água de molhagem, produzindo aumento de coesão e perda de mobilidade do compósito no estado fresco. Fibras mais longas reduzem a mobilidade do material por dificultar a movimentação dos agregados. Segundo FIGUEIREDO (2005), ao adicionar 50 kg de fibras de aço com ancoragem em gancho e fator de forma de 60, com comprimento igual a 30 mm, obtém-se uma área excedente de molhagem de aproximadamente 50 m<sup>2</sup>.

O aparecimento dos chamados ouriços, mostrado na figura 4.2, é um problema que está associado à aplicação dos concretos com fibras. São bolas formadas por fibras aglomeradas que produzem uma redução do teor de fibras homogeneamente distribuídas, como também se constituem em pontos fracos, pois são muito porosos.



Fig. 4.2 - Ouriço – Piso Industrial no Estaleiro de Suape/PE  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:29 hs)

As causas estão associadas à mistura inadequada do material. Recomenda-se lançar as fibras em taxas controladas junto com os agregados, homogeneizando a mistura antes do lançamento do cimento, ou utilizar fibras coladas em pentes, que quando misturadas ao concreto, têm suas colas dissolvidas, permitindo uma homogeneização facilitada para o compósito. Com relação ao fator de forma das fibras, quanto maior, maior será o risco de embolamentos.

## 4.3 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

### 4.3.1 TENACIDADE

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008):

*“O concreto convencional se rompe repentinamente, assim que a deflexão correspondente à resistência à flexão última é superada. Por outro lado, o concreto reforçado com fibras continua a suportar cargas consideráveis até mesmo com deformações consideravelmente maiores do que a deflexão na fratura do concreto convencional”.*

SHA (1984) apud MEHTA e MONTEIRO (2008) afirmou que quando a matriz é fissurada, fica sem condições de absorver carregamentos e os “transfere” para as fibras. Com o aumento da carga, as fibras “tentarão” transferir essa tensão adicional para a matriz através de tensões de aderência. Enquanto a aderência fibra-matriz for maior que a carga aplicada o compósito certamente suportará cargas maiores após a primeira fissuração.

A tenacidade é a energia total absorvida na ruptura à flexão. É o aumento da fratura, e é representada pela área abaixo da curva carga-deflexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo FIGUEIREDO (2005), a tenacidade é o trabalho dissipado no material até certo nível de deflexão, e é utilizada para avaliar os compósitos. Os dois métodos mais utilizados para aferir a tenacidade são o americano, proposto pela American Society for Testing and Materials (ASTM C1018 – 1994) e o japonês, proposto pela Japan Society of Civil Engineers (JSCE-SF4, 1984). Os dois métodos são muito dependentes das dimensões dos corpos-de-prova e do sistema de aplicação dos esforços.

A diferença básica entre os dois métodos na prática, é que o americano utiliza chapas de aço rígidas para diminuir o pós-pico, que é a instabilidade instalada no pequeno espaço de tempo onde ocorre a transferência das tensões da matriz para as fibras, e que pode interferir no resultado dos procedimentos. Na figura 4.3, é

possível fazer um comparativo da tenacidade entre os concretos simples e os reforçados com fibras de aço.

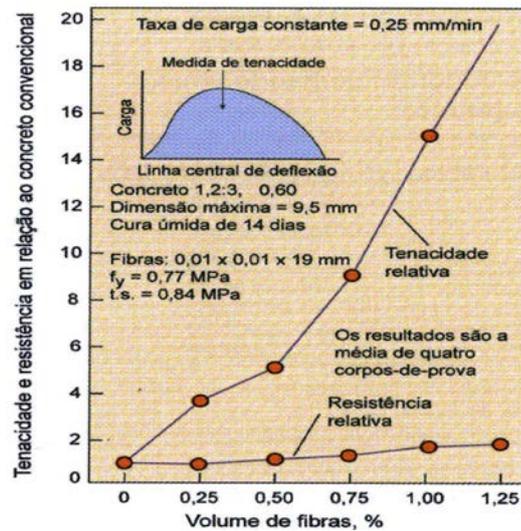


Fig. 4.3 – Concreto simples x concreto com fibras de aço  
(Fonte: Mehta e Monteiro, 2008)

### 4.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Segundo SARZALEJO et al. (2007), a resistência à compressão do concreto não é substancialmente modificada pela adição de fibras. É observado um modesto incremento para porcentagens elevadas de fibras de aço (não menores que 1,5% em relação ao volume do concreto – 117 kg/m<sup>3</sup>). O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson praticamente não variam para porcentagens de fibras menores que 2% em volume.

Segundo FIGUEIREDO (2000), a resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de aço pode até piorar em virtude de uma má execução. Se o concreto não é bem vibrado, por exemplo, é possível que ele apresente um maior número de vazios, conseqüentemente terá prejudicada a referida resistência. É verdade que isto também ocorre no concreto simples, mas no caso do reforço com fibras, quanto

maior o fator de forma das mesmas, menor a mobilidade da massa do concreto, portanto são necessárias condições mais esmeradas na execução desse material.

Melhoras significativas na resistência à compressão só são possíveis para concretos reforçados com elevados teores de fibras. Por outro lado, teores muito elevados podem piorar a trabalhabilidade do compósito (GROSSI, 2006).

A adição de fibras ao concreto teve como origem a intenção de se melhorar às propriedades mecânicas desse material. Portanto, o incremento ou a alteração na resistência à compressão não foi o “único alvo” dessa inovação tecnológica.

### **4.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA**

SARZALEJO et al. (2007) descreve que somente utilizando elevadas dosagens (> 1,5%) podem ser obtidos incrementos relevantes. MILLER (2008) afirma que os acréscimos da resistência à tração direta apresentam valores intermediários.

Segundo SIMPLÍCIO (2008), o ganho de resistência é considerável:

*“Há relatos de aumento de 30% a 40% para adições de até 1,5% de fibras. Apesar desse acréscimo, a principal contribuição das fibras está na região pós-pico do diagrama tensão de tração-deformação observados, em virtude da resistência residual e do aumento em energia de deformação”.*

Por outro lado, um aumento na resistência à tração nos CRFA se faz sentir somente nos casos em que as fibras estão alinhadas na direção da tensão de tração, o que na prática se torna inviável (BENTUR e MINDESS, 1990).

Segundo GROSSI (2006), a resistência à tração direta do concreto sofre pequena influência da adição das fibras, exceto quando se criam condições favoráveis, como volumes de fibras acima de 2%, fibras de elevado fator de forma e módulo de elasticidade, matrizes com maior aderência às fibras e, de preferência, fibras alinhadas na direção das tensões de tração.

#### **4.3.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

A resistência à tração na flexão dos concretos fibro-reforçados apresenta ganhos superiores em comparação com aqueles obtidos na compressão e na tração direta (GROSSI, 2006).

Em trabalhos realizados por MEHTA e MONTEIRO (2008), foi possível comprovar que a intensidade da tração na flexão aos 14 dias do concreto reforçado com fibras de aço, foi aproximadamente 20 % superior a do concreto convencional.

Segundo MILLER (2008), a resistência à tração na flexão pode ser muito maior do que a obtida para a matriz. Esta propriedade é diretamente influenciada pelo volume de fibras e pelo fator de forma da mesma.

FERRARI (2007) fala que a adição de fibras de aço influencia na resistência à tração na flexão de um concreto devido ao comportamento das fibras em restringir a abertura e conseqüentemente a propagação de fissuras, tornando o compósito mais tenaz, aumentando a sua capacidade de absorção e dissipação de energia durante esse processo.

VILLARES (2001) relata que a real vantagem do CRFA é mais aparente após a fissuração. O aumento da resistência à flexão não se faz sentir somente pelo aumento no teor de fibras, mas também pelo aumento no fator de forma das fibras.

#### **4.3.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

Segundo SIMPLÍCIO (2008), o caráter aleatório da distribuição e orientação das fibras proporciona um reforço tridimensional e de pequeno espaçamento, o que seria impossível de alcançar com armadura convencional. As fibras “costuram” as fissuras em todas as direções, aumentando o efeito do engrenamento dos agregados nas superfícies fraturadas, melhorando o desempenho do concreto. As deformações devidas ao cisalhamento são reduzidas com a utilização das fibras.

De acordo com GROSSI (2006), a adição de fibras de aço ao concreto leva a importantes melhoras no comportamento de elementos estruturais submetidos a esforços de cisalhamento. O autor ressalta a vantagem das fibras em relação aos estribos convencionais proporcionada por um menor espaçamento entre as fibras do que aquele entre as barras de estribos, conduzindo a um ganho nessa resistência.

HOLANDA (2002) afirma que as fibras de aço podem favorecer a redução da concentração de tensões nas extremidades das fissuras de flexão e de cisalhamento, controlando sua propagação em todas as direções, uma vez que são distribuídas de forma aleatória. A inclusão dessas fibras no concreto pode, em taxas mais elevadas, aumentar a sua resistência à primeira fissura e diminuir a abertura das fissuras em geral.

Segundo FERRARI (2007), assim que se forma uma fissura diagonal, as fibras tornam-se mais efetivas devido ao efeito de ponte que costura a fissura. Esse efeito, associado à redistribuição de tensões através das fissuras, e conseqüentemente da formação de outras fissuras diagonais, evita a ruína frágil por cisalhamento.

#### **4.3.6 RESISTÊNCIA À TORÇÃO**

Existe uma grande dificuldade em entender o fenômeno da resistência à torção, assim como ocorre para o concreto armado convencional. Em geral, segundo SARZALEJO et al. (2007), as fibras de aço incrementam a resistência à torção do concreto.

#### **4.3.7 RESISTÊNCIA AO FOGO**

Em estruturas confinadas, caso não exista nenhum tipo de proteção anti-fogo, na ocorrência de um incêndio as chamas entram em contato direto com o concreto da estrutura, alcançando-se temperaturas muito elevadas que causam a sua rápida deterioração.

A exposição dos elementos construtivos a altas temperaturas traz como consequência a alteração das características físicas e mecânicas dos mesmos, reduzindo sua funcionalidade estrutural.

O mecanismo dos danos causados ao concreto pela ação do fogo é dividido em duas categorias. A primeira é uma gradual queda da face externa do concreto, resultando em uma não violenta desagregação do material. Geralmente isto ocorre em incêndios que tenham uma taxa de elevação de temperatura lenta. Com isso, a umidade presente no concreto tem tempo de sair da parte mais quente, fazendo com que o aumento da pressão seja mínimo (TATNALL, 2002).

A segunda categoria compreende um efeito violento. É quando partes da superfície do concreto são “explodidas” ou “jogadas” violentamente devido ao aumento da pressão do vapor de água do concreto, causado pelo aumento repentino do calor (TATNALL, 2002). O concreto deslocado pode obstruir a passagem dos bombeiros, dificultando a extinção do fogo, causando riscos a vidas humanas e podendo ter elevados valores de manutenção da estrutura.

Para proteger o concreto do fogo, é interessante a utilização de fibras de polipropileno, consideradas fibras de baixo módulo. Essas fibras se fundem com o aumento da temperatura, e aos 165°C já produzem caminhos livres para a saída do vapor de água, de acordo com a figura 4.4. Este comportamento pode evitar a ruptura do revestimento pela pressão do vapor (FIGUEIREDO, 2005).

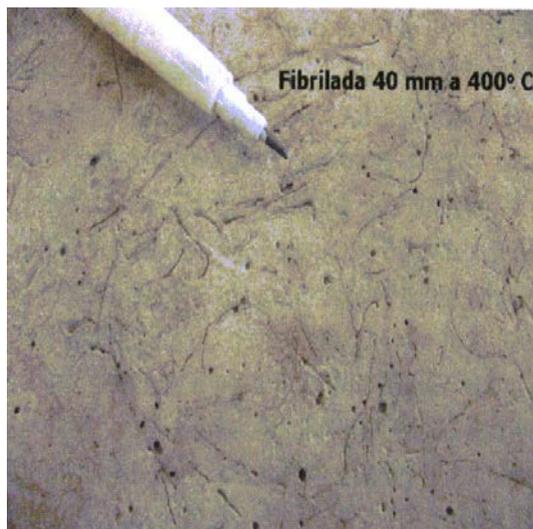


Fig. 4.4 - Canais deixados pelas fibras de polipropileno fibriladas após a exposição do concreto a temperaturas de 400°C  
(Fonte: Figueiredo, 2005)

As fibras de aço têm características térmicas compatíveis com a matriz de concreto e só derretem numa temperatura bem acima da temperatura de conversão da água para vapor de água, assim não colaboram na proteção do concreto ao fogo (TATNALL, 2002). De qualquer maneira essa proteção não é necessária nos pisos industriais, visto que eles não estão em locais confinados. A utilização de fibras de polipropileno nessas estruturas tem como finalidade o controle da fissuração por retração plástica.

#### **4.3.8 RESISTÊNCIA À ABRASÃO**

Segundo SARZALEJO et al. (2007), o benefício conferido pelas fibras na melhora do comportamento das superfícies submetidas ao tráfego de veículos sobre rodas não é de fácil demonstração.

Segundo BENTUR E MINDESS (1990), a adição de fibras de aço ao concreto torna o material mais resistente à abrasão, erosão e cavitação.

FIGUEIREDO (2000) relatou que a adição de fibras de aço no concreto para pisos e pavimentos pode até prejudicar a resistência à abrasão desses pisos pelo fato de se

reduzir a quantidade total de agregados graúdos, os quais são os principais responsáveis pelo desempenho com relação à abrasão.

Com a adição de fibras de aço o abatimento do concreto é reduzido pelo aumento da coesão. Caso não se deseje tal comportamento, sem comprometer a resistência, ou se utiliza aditivo plastificante ou se aumenta a quantidade percentual de pasta, resultando em redução da quantidade de agregado.

#### **4.3.9 RESISTÊNCIA À CORROSÃO**

Segundo SARZALEJO et al. (2007), é preciso distinguir os concretos íntegros dos concretos pré-fissurados. No primeiro caso, a corrosão é limitada às fibras presentes na superfície, apresentando somente conseqüências estéticas. Como as fibras são descontínuas e de pequenas dimensões, estão menos sujeitas a sofrerem o processo de corrosão e, mesmo que isso venha a ocorrer, não apresentam risco de provocar lascamentos no concreto, pois o volume expandido do material oxidado não é suficiente para rompê-lo (RODRIGUES, 2004).

No segundo caso, ensaios realizados em corpos de prova fissurados, comprovaram que a redução da resistência à corrosão é moderada e depende da amplitude e da profundidade da fissura: para aberturas de fissuras maiores que 0,1 mm, mas limitadas em profundidade, não se tem conseqüências com relação à eficácia estrutural (ACI 544.1R, 1996).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), com uma boa compactação e cura, os concretos reforçados com fibras de aço tendem a apresentar uma maior resistência à corrosão, isso se as fibras ficarem protegidas pela pasta de cimento. Geralmente esses concretos apresentam elevado consumo de cimento e baixa relação água-cimento, minimizando a incidência da corrosão. Normalmente, a formação de ferrugem superficial é inevitável, mas as fibras inseridas na matriz geralmente não sofrem esse processo.

## **4.4 TIPOS DE CARGAS EM PISOS INDUSTRIAIS**

Da mesma forma de um projeto convencional de fundações, o pavimento industrial irá também transmitir esforços ao solo, com a diferença de que é, na grande maioria das vezes, fundação direta e denominamos ao terreno de fundação preparado para receber o pavimento industrial de subleito (RODRIGUES, 2006).

É interessante ressaltar que quando comparamos o pavimento industrial com fundação direta, detectamos a diferença de que no segundo, inexitem as cargas móveis. Quando comparamos com os pavimentos rodoviários, a diferença é que nos rodoviários não há praticamente a ocorrência de cargas estáticas.

### **4.4.1 CARGAS ESTÁTICAS**

#### **4.4.1.1 CARGAS DISTRIBUÍDAS**

É o modo mais simples de estocagem de materiais. A carga sobre o piso é determinada pela altura da pilha de estocagem que, pela necessidade de estabilidade, atinge dificilmente 9 metros de altura, ficando na maioria das vezes bastante abaixo disso. Podemos ter cargas distribuídas da ordem de 10 ou 20 tf/m<sup>2</sup>, mas nas situações usuais, essas cargas não ultrapassam 3 ou 4 tf/m<sup>2</sup>.

Uma carga distribuída é um carregamento plano apoiado sobre o piso por meio de uma área de contato que coincide com a projeção do carregamento, sem que haja a existência de cargas pontuais ou lineares (RODRIGUES, 2006), conforme a figura 4.5.



Fig. 4.5 – Carregamento distribuído  
(Fonte: [www.aguiasistemas.com.br](http://www.aguiasistemas.com.br))

Um carregamento distribuído sobre toda a superfície do piso não gera, na verdade, esforços de tração na flexão na placa de concreto, mas é raro e pouco provável a esta situação na prática (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007). As cargas distribuídas geram um momento negativo nos corredores que superam os momentos positivos que ocorrem sob a placa e que são inferiores aos produzidos por cargas móveis ou pontuais.

As empilhadeiras, por exemplo, quando passam pelos corredores, apresentam um efeito atenuante dos esforços gerados pela carga distribuída, sendo usualmente desconsideradas para fins de dimensionamento do piso para este tipo de carregamento.

Normalmente, dimensiona-se o piso para carga distribuída, considerando a distribuição do carregamento que conduza à condição mais desfavorável, pois neste tipo de disposição de carga há uma facilidade muito grande de mudança de lay-out.

Na presença de solos compressíveis (argilas moles), a carga distribuída, quando elevada, pode acarretar em recalque por adensamento que podem comprometer a utilização do edifício. É altamente recomendável o envolvimento na elaboração do projeto do piso, nesta situação, de empresa de consultoria em geotecnia para uma

correta avaliação dos riscos de recalques e da viabilidade técnica da solução de piso apoiado diretamente sobre o solo (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

#### **4.4.1.2 CARGAS LINEARES**

Alvenarias construídas diretamente sobre o piso, bobinas ou estoque de barras de aço apoiadas em trilhos ou estrados de madeira, são alguns exemplos destes carregamentos, que não deixam de ser, de certa forma, cargas concentradas, em razão da pequena largura da área de contato. Mas pela grande relação comprimento/largura da área carregada, constitui um caso particular de carregamento.

Além da intensidade da carga, a largura da linha de contato carga-piso, as características da placa de concreto e a condição de suporte da fundação integram as variáveis envolvidas no dimensionamento.

Para a carga posicionada no centro da placa, a tensão máxima de tração ocorre diretamente sob a linha de aplicação da força por unidade de comprimento, na face inferior da placa. Quando a carga é posicionada perto de uma das bordas, gera uma tensão máxima na face superior da placa, a uma distância próxima ao raio de rigidez (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

#### **4.4.1.3 CARGAS CONCENTRADAS**

Nos centros logísticos mais modernos, o armazenamento das mercadorias é realizado em sistema de prateleiras ou racks, com altura de estocagem acima de 10 metros. Grandes alturas podem acarretar cargas concentradas, em pequenos apoios, extremamente elevadas. A figura 4.6 mostra um carregamento concentrado, podendo ser observados os pés de apoio dos sistemas de armazenagem.



Fig. 4.6 – Carregamento concentrado  
(Fonte: [www.aguiasistemas.com.br](http://www.aguiasistemas.com.br))

Para alturas entre 8 e 10 m, pode-se chegar a 5.000 kg por apoio da estrutura de porta-pallets, considerando pallets com peso médio de aproximadamente 1.000 kg. Para alturas entre 10 e 14 m, obtém-se entre 6.000 e 10.000 kg por apoio. Nos sistemas de estruturas auto-portantes, os pallets podem ser elevados até mais de 25 metros de altura. Em poucos casos a carga concentrada nos apoios pode atingir 20 tf ou mais (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

As cargas concentradas produzem esforços mais críticos na face inferior da placa (momento positivo). O pavimento pode ser dimensionado com o concreto resistindo aos esforços provenientes do carregamento (concreto simples), ou considerando a seção fissurada utilizando armaduras como reforço (barras de aço, telas soldadas ou fibras de aço).

Nas áreas de depósitos, as cargas concentradas dos porta-pallets são determinantes no dimensionamento da espessura e armação do piso. Alguns projetistas especificam a colocação de uma chapa metálica com rigidez suficiente para distribuir o carregamento sob os apoios dos montantes, com o objetivo de reduzir o efeito das cargas concentradas (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

#### 4.4.2 CARGAS MÓVEIS

O tipo mais comum de veículo a trafegar em um piso industrial é a empilhadeira. Pela sua frequência de solicitação e cargas de eixo, termina superando as solicitações de um eventual trânsito de caminhões.

Nas áreas de depósitos, as cargas concentradas dos pota-pallets são determinantes no dimensionamento da espessura e armação do piso. Alguns projetistas especificam a colocação de uma chapa metálica com rigidez suficiente para distribuir o carregamento sob os apoios dos montantes, com o objetivo de reduzir o efeito das cargas concentradas (CHODOUNSKI e VIECILI, 2007).

É um veículo dotado de dois eixos, podendo ter rodagem dupla ou não, sendo o eixo traseiro considerado, para efeitos de dimensionamento, apenas como direcional, uma vez que no momento de solicitação máxima de carga, a mesma vai se concentrar no eixo dianteiro (RODRIGUES, 2006).

Segundo RODRIGUES (2006), o dimensionamento do piso requer o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- Carga do eixo mais carregado, formada pela carga útil somada ao peso próprio do veículo, em newtons (N);
- frequência das cargas;
- tipo de rodagem, simples ou dupla;
- distância entre rodas;
- carga no eixo mais carregado;
- pressão de enchimento dos pneus;
- resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) do concreto;
- coeficiente de recalque da fundação (k); e
- coeficiente de segurança.

CHODOUNSKI e VIECILI (2007) ressaltam que a identificação do tipo de rodagem, além de importante no dimensionamento, é fundamental para a orientação do projeto geométrico. As empilhadeiras com rodagem maciças são extremamente agressivas às juntas, que devem ser corretamente posicionadas e tratadas com material adequado.

A carga no eixo crítico da empilhadeira varia dentro de limites amplos, conforme a utilização do equipamento, e pode ser de menos de 4.000 kg, ou até mais de 30.000 kg. Nas empilhadeiras de contêineres, a carga pode chegar a 120.000 kg no eixo dianteiro.

#### **4.5 DIMENSIONAMENTO DE PISO DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

Os pisos industriais são submetidos a cargas permanentes, acidentais e ações indiretas. O peso próprio da estrutura é considerado uma carga permanente e é de grande importância para a realização do cálculo dos esforços devido ao atrito da placa com a base. Materiais armazenados e rodas de veículos são exemplos de cargas acidentais. A retração e os efeitos da variação de temperatura ao longo da vida útil do piso são considerados ações indiretas.

Será mostrado um exemplo de dimensionamento de um piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço sujeito a ação de cargas distribuídas, móveis e concentradas. Os cálculos estão de acordo com o ACI 360 R (2006).

Dados gerais:

- Carga uniformemente distribuída:  $g = 90 \text{ KN/m}^2$
- Carga total da roda da empilhadeira:  $P_0 = 5 \text{ Tf/m}^2$      $P_0 = 50 \text{ KN}$
- Carga concentrada por apoio:  $P_{or} = 80 \text{ KN}$
- Concreto: (  $f_{ck} = 25 \text{ MPa} / f_{ct,f} = 3,67 \text{ MPa} / E_c = 30500 \text{ MPa}$  )

- Módulo de reação do solo:  $k = 0,09 \text{ N/mm}^3$
- Espessura adotada:  $h = 15 \text{ cm}$
- Pressão de enchimento dos pneus:  $p = 0,70 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de Poisson:  $\nu = 0,2$
- Área de apoio da carga concentrada (10 x 15 cm):  $A_{ap} = 15.000 \text{ mm}^2$
- Espaçamento entre juntas:  $e = 8 \text{ m}$
- Espessura da sub-base granular:  $h_{sb} = 10 \text{ cm}$

#### 4.5.1 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DEVIDO A CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA

$$M = -0,168 \cdot \frac{g}{\lambda^2}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot E_c \cdot I}}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

O módulo de elasticidade do concreto para cargas de longa duração deve ser considerado:  $E_c = \frac{E_c}{2}$

Para cálculo do momento de inércia (I), considerar a largura (b) unitária.

Portanto:

$$I = \frac{150^3}{12} = 281250 \text{ mm}^4$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{0,09}{4 \cdot \left(\frac{35000}{2}\right) \cdot 281250}} = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$$

$$M = -0,168 \cdot \frac{90000 \cdot 10^{-6}}{(1,51 \cdot 10^{-3})^2} = 6631 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{mm}$$

#### 4.5.2 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE CARGAS MÓVEIS

As expressões a seguir são baseadas nos trabalhos realizados por MEYERHOF (1962) e LOSBERG (1961) apud RODRIGUES et al. (2006), que chamam atenção pela simplicidade na utilização, apresentando boa precisão. Elas permitem a determinação da somatória dos momentos positivos ( $M_p$ ) e negativos ( $M_v$ ) para situações típicas de posicionamento das cargas, ou seja, no interior e na borda da placa.

##### 4.5.2.1 MOMENTO DA CARGA NO INTERIOR DA PLACA

$$M_0 = (M_p + M_n) = \frac{P_0}{6 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a}{l}\right)\right]}$$

onde:

$l \rightarrow$  raio de rigidez relativo

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}}$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{30500 \cdot (150)^3}{12 \cdot (0,96) \cdot 0,09}} = 561 \text{ mm}$$

$\varphi \rightarrow$  fator dinâmico = 1,4

$a \rightarrow$  raio da área de contato da carga

$$a = \sqrt{\frac{\varphi \cdot P_0}{\pi \cdot p}}$$

$$a = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 50000}{3,14 \cdot 0,70}} = 178 \text{ mm}$$

Portanto:

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{50000}{6 \cdot [1 + (\frac{2 \cdot 178}{561})]}$$

$$M_o = 5097 \text{ N} \cdot \text{mm/mm}$$

#### 4.5.2.2 MOMENTO DA CARGA NA BORDA DA PLACA

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{P_0}{3,5 \cdot [1 + (\frac{3 \cdot a}{l})]}$$

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{50000}{3,5 \cdot [1 + (\frac{3.178}{561})]}$$

$$M_o = 7320 \text{ N.mm/mm}$$

### 4.5.3 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE CARGAS CONCENTRADAS

O cálculo desse momento é feito de maneira semelhante ao do momento fletor de cargas móveis, com exceção de que o contato entre a carga e a placa não será mais a roda da empilhadeira, e sim a área de apoio da carga concentrada.

#### 4.5.3.1 MOMENTO DA CARGA NO INTERIOR DA PLACA

a → raio do círculo com área equivalente a base do carregamento concentrado

$$a = \sqrt{\frac{A_{ap}}{\pi}} \quad a = \sqrt{\frac{15.000}{3,14}}$$

$$a = 69 \text{ mm}$$

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{P_{or}}{6 \cdot [1 + (\frac{2 \cdot a}{l})]}$$

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{80000}{6 \cdot [1 + (\frac{2 \cdot 69}{561})]}$$

$$M_o = 10695 \text{ N.mm/mm}$$

### 4.5.3.2 MOMENTO DA CARGA NA BORDA DA PLACA

Para o cálculo do momento da carga na borda da placa, segundo o ACI 360 R (2006), 20% da carga é transferida pelas barras de transferência para a placa adjacente, portanto:

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{(P_o') \cdot (0,80)}{3,5 \cdot [1 + (\frac{3 \cdot a}{l})]}$$

$$M_o = (M_p + M_n) = \frac{(80000) \cdot (0,80)}{3,5 \cdot [1 + (\frac{3 \cdot 69}{561})]}$$

$$M_o = 13361 \text{ N} \cdot \text{mm/mm}$$

### 4.5.4 CÁLCULO DO EFEITO DE RETRAÇÃO

#### 4.5.4.1 MOMENTO EQUIVALENTE NO CENTRO DA PLACA

$$\sigma_{r \text{ centro}} = \frac{\Psi \cdot E_c \cdot \epsilon_r}{1 + \phi}$$

onde:

$\Psi$  → fator de restrição em função do atrito, espaçamento entre juntas e espessura da placa, mostrado no quadro 4.2.

$\mu$  → coeficiente de atrito entre a placa e a sub-base, conforme quadro 4.3.

$\phi$  → fator de relaxação = 5 (concreto novo)

$\epsilon_r$  → deformação por retração do concreto = 0,4‰ (valor médio)

$\Psi$					
$\mu$	$e/h$				
	10	20	30	<b>40</b>	> 100
< 0,50	0,05	0,15	0,25	0,5	1
1	0,1	0,3	0,5	1	1
<b>2</b>	0,2	0,6	1	<b>(1)</b>	1

Quadro 4.2 – Fator de restrição em função do coeficiente de atrito

<b>M</b>	
sub-base granular	<b>1,3</b>
sub-base argilosa	1,7

Quadro 4.3 – Coeficiente de atrito x tipo de sub-base

Portanto:

$$\sigma_{r \text{ centro}} = \frac{(1) \cdot (30500) \cdot (0,0004)}{1 + 5}$$

$$\sigma_{r \text{ centro}} = 2,03 \text{ MPa}$$

$$M_{r \text{ centro}} = \frac{\sigma_{r \text{ centro}} \cdot h^2}{6}$$

$$M_{r \text{ centro}} = \frac{2,03 \cdot (150)^2}{6}$$

$$M_{r \text{ centro}} = 7612 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{mm}$$

#### 4.5.4.2 MOMENTO EQUIVALENTE NA BORDA DA PLACA

$$\sigma_{r \text{ borda}} = \frac{\sigma_{r \text{ centro}}}{2}$$

$$\sigma_{r \text{ borda}} = \frac{2,03}{2}$$

$$\sigma_{r \text{ borda}} = 1,02 \text{ MPa}$$

$$M_{r \text{ borda}} = \frac{M_{r \text{ centro}}}{2}$$

$$M_{r \text{ borda}} = \frac{7612}{2}$$

$$M_{r \text{ borda}} = 3806 \text{ N.mm/mm}$$

#### 4.5.5 CÁLCULO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

##### 4.5.5.1 MOMENTO EQUIVALENTE NO CENTRO E NA BORDA DA PLACA

$$\sigma_{t \text{ centro}} = \sigma_{t \text{ borda}} = \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \Delta}{1 + \phi}$$

onde:

$\alpha$  → coeficiente de dilatação térmica:  $\alpha = 10^{-5}$

$\Delta$  → diferença de temperatura entre as partes superior e inferior da placa de concreto:  $\Delta = 5^\circ\text{C}$

$\phi$  → fator de relaxação = 2 (concreto velho)

Portanto:

$$\sigma_{t \text{ centro}} = \sigma_{t \text{ borda}} = \frac{30500 \cdot 10^{-5} \cdot 5}{1 + 2}$$

$$\sigma_{t \text{ centro}} = \sigma_{t \text{ borda}} = 0,51 \text{ MPa}$$

$$M_{t \text{ centro}} = M_{t \text{ borda}} = \frac{\sigma_{t \text{ centro}} \cdot h^2}{6}$$

$$M_{t \text{ centro}} = M_{t \text{ borda}} = \frac{0,51 \cdot (150)^2}{6}$$

$$M_{t \text{ centro}} = M_{t \text{ borda}} = 1912 \text{ N.mm/mm}$$

#### 4.5.6 CÁLCULO DO TEOR DE FIBRAS DE AÇO

De acordo com os momentos calculados, o carregamento que mais solicita o piso de concreto é a carga concentrada na borda da placa:

$$M_o = 13361 \text{ N.mm/mm}$$

O momento de cálculo para o dimensionamento ( $M_1$ ) será o momento da carga concentrada na borda, somado ao momento devido à retração no centro da placa e ao momento devido à variação de temperatura:

$$M_1 = M_o + M_r + M_t$$

Portanto:

$$M_1 = (22885 + 7612 + 1912) \text{ N.mm/mm}$$

$$M_1 = 22885 \text{ N.mm/mm}$$

Cálculo do Fator de Tenacidade:

$$M_1 = \left[ 1 + \left( \frac{R_e}{100} \right) \right] \cdot \left[ \frac{f_{ct,f} \cdot b \cdot h^2}{6} \right]$$

$$R_e = \frac{M_1}{\frac{f_{ct,f} \cdot (b \cdot h^2)}{6}} - 1$$

$$R_e = 66 \%$$

O ACI 360 R (2006) indica, para a tenacidade encontrada, um volume de fibras de aço variando de **36** a **74** kg/m<sup>3</sup> de concreto, conforme o quadro 4.4. A definição do volume vai depender das características das fibras que serão utilizadas.

VOLUME DE FIBRAS (kg/m <sup>3</sup> )	FATOR DE TENACIDADE (%)	TIPO DE USO
< 20	20 A 40	comércio e indústrias - tráfego leve e inconstante
20 a 30	30 A 50	veículos industriais com pneus de borracha
24 a 36	40 A 60	veículos industriais com pneus maciços
36 a 74	> 60	indústrias - tráfego pesado e constante

Quadro 4.4 – Relação volume de fibras x fator de tenacidade  
(Fonte: ACI 360 R, 2006)

Na figura 4.7 é mostrada a relação entre o volume de fibras de aço x fator de tenacidade indicados por um fabricante de fibras. Essas fibras apresentam fator de forma igual a 50, com comprimento de 50 mm e diâmetro de 1 mm. Os valores são baseados em testes realizados pelo fabricante. Com esses dados o volume de fibras necessário para o dimensionamento efetuado é de aproximadamente **30 kg/m<sup>3</sup>** para o tipo de fibra especificado.

Residual Strength Factor Re3 (%)								
Fiber Code	Typical Predominant Aggregates	Dosage Rate						
		20 kg/m <sup>3</sup> (34 lb/y <sup>3</sup> )	25 kg/m <sup>3</sup> (42 lb/y <sup>3</sup> )	30 kg/m <sup>3</sup> (50 lb/y <sup>3</sup> )	35 kg/m <sup>3</sup> (60 lb/y <sup>3</sup> )	40 kg/m <sup>3</sup> (67 lb/y <sup>3</sup> )	45 kg/m <sup>3</sup> (75 lb/y <sup>3</sup> )	50 kg/m <sup>3</sup> (85 lb/y <sup>3</sup> )
Wirand <sup>®</sup> FF1	1"	48	57	64	71	77	83	89

Fig. 4.7 - Relação volume de fibras x fator de tenacidade  
(Fonte: Maccaferri, 2008)

Se fosse especificada uma placa de 20 cm de espessura para as mesmas condições de carregamento descritas no exemplo citado, o fator de tenacidade obtido seria de 27%. Com isso, pelas recomendações do ACI 360 R (2006), conforme o quadro 4.4, e do fabricante de fibras, conforme a figura 4.7, o volume de fibras para essa situação seria de 20 kg/m<sup>3</sup> de concreto, já que não é aconselhável pelo EHE (2008) a utilização de fibras de aço abaixo desse valor.

Com relação a custos, a placa de 20 cm de espessura custaria 12 % a mais que a de 15 cm, baseado no banco de dados SINAPI (sistema nacional de pesquisa de custo e índice da construção civil), localidade Recife, mês de novembro de 2009. Apesar de custar mais, a segunda opção resultaria em melhores condições de trabalhabilidade e mistura, sendo necessária uma breve análise por parte dos engenheiros envolvidos para se chegar a uma conclusão a respeito de qual seria a melhor decisão a se tomar.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

- A utilização mais comum das fibras de aço como adição de concreto destinado a execução de pisos industriais é no controle de propagação de fissuras de retração e aumento da tenacidade, mas as mesmas fibras podem até aumentar a capacidade portante da estrutura mesmo após a fissuração da matriz, dependendo do volume empregado;
- As fibras começam a “trabalhar” após a ocorrência da primeira fissura na matriz de concreto;
- O comprimento da fibra influencia na tenacidade do compósito apenas para deslocamentos verticais maiores, pois para deslocamentos menores o aumento da tenacidade é consequência do número de fibras distribuídas na matriz;
- Quanto maior for o fator de forma da fibra, maior será a tenacidade do compósito, porém, maior será também o risco da ocorrência de embolamentos, dependendo das condições de mistura;
- É observado um modesto incremento na resistência à compressão do concreto para adições de fibras de aço acima de 1,5 % em volume;
- Para que a resistência à tração direta do concreto obtenha ganhos consideráveis, da ordem de 30% a 40%, é preciso utilizar volumes de fibras acima de 2% e conseguir alinhá-las na direção das tensões de tração;
- O aumento da resistência à tração na flexão não depende unicamente do aumento do fator de forma das fibras, mas também do aumento do teor de fibras utilizado, bem como da interação fibra x matriz;
- Importantes melhoras no combate a esforços de cisalhamento são obtidas com a adição de fibras de aço ao concreto, devido ao pequeno espaçamento entre elas e ao efeito de costura obtido com a adição das mesmas, que controlam a

propagação das fissuras em todas as direções, uma vez que são distribuídas de forma aleatória;

- As fibras de aço não são eficazes no combate ao fogo, pois a temperatura de fusão das mesmas é considerada muito alta, tendo já neste momento o concreto já se deteriorado. As fibras de polipropileno são realmente eficazes nestes casos, pois se fundem a 165°C, abrindo caminho para a saída do vapor de água “instalado” no interior do concreto;

- A oxidação das fibras de aço não compromete o funcionamento e a estrutura do piso, pois como o diâmetro é muito pequeno, o produto gerado não tem tensão suficiente para deteriorar o concreto, ocasionando prejuízos estéticos;

- A utilização de concreto reforçado com fibras de aço em pisos industriais traz vantagens como praticidade e rapidez na execução, redução da mão-de-obra empregada, diminuição da espessura da placa e redução do número de juntas. Por outro lado, o acréscimo das fibras traz prejuízos com relação à trabalhabilidade e mistura do material, que é proporcional ao aumento do fator de forma das fibras e ao volume empregado.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Atualmente se aplica no Brasil pisos industriais de concreto reforçados unicamente com fibras de aço, mesmo sem um real embasamento técnico. Muitos trabalhos acadêmicos, livros, entre outros, expõem a contribuição das fibras de aço em conjunto com as armaduras. Deixo como sugestão o estudo da real possibilidade de substituição de placas estruturalmente armadas por placas reforçadas unicamente por fibras de aço, uma vez que estas aplicações recentes não têm um total respaldo técnico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, José Vanderlei de. **Microcimento**: nova tecnologia na manutenção e reparo de pisos. Revista Pisos Industriais, Revista Pisos Industriais, Ano 5, Nº 8, São Paulo, SP, 2007.

ACI, Committee 302 1R-04, “**Guide for concrete floor and slab construction**”. American Concrete Institute, March, 2004.

ACI, “**Concrete flatwork technician and finisher**”. American Concrete Institute, 1998.

ACI, Committee 544.1R – 96, “**State-of-the-art report on fiber reinforced concrete**”. American Concrete Institute, November, 1996.

ACI, “**Do steel fibers mix with wire guides?**”. ACI Journal, American Concrete Institute, December, 1991.

ACI, Committee 360.R – 06, “**Design of slabs-on-ground**”, American Concrete Institute, 2006.

ALMEIDA, I. R. **Concreto de alto desempenho**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol. 2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. P 1159 – 1194;

ARAÚZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçado com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Material bibliográfico do curso ministrado pela ABCP no CREA/PE sobre pavimentos**. Recife, Outubro de 2007.

BALAGURU, P. N. e SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**. USA. McGraw-Hill. 1992.

BENTUR, A. e MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. New York: Elsevier Applied Science, 1990.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. Rio e Janeiro: LTC Editora, 2000.

CARNIO, M. A. **Análise em regime plástico de placas de concreto reforçadas com fibras de aço sobre base elástica**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CHODOUNSKI, M. A. e VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e executivos**. 1ª Ed. São Paulo: Reggenza editorial, 2007.

CHODOUNSKI, M. A. **Fibras metálicas para reforço de concreto**. Revista Pisos Industriais, Ano 5, Nº 7, São Paulo, SP, 2008.

DOMENICHINI, DI MASCI, GIANNATASIO, CALIENDO, FESTA, MARCHIONNA, FIRMI, MOLINARO, PAOLONI. **Catalogo delle pavimentazioni stradali: Modello di catalogo delle pavimentazioni stradali**. Roma: CNR, 1995.

EHE – 08. **“Instrucción de hormigón estructural”**. Anejo 14. 2ª Ed. Madrid: Ministério de Fomento, 2008.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS **Dosobox SC 99** – Maccaferri, 2007.

FERNANDES, A. **Utilização de fibras de aço para reforço de concreto em anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túneis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. São Carlos: 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. São Paulo: 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de aço: Boletim Técnico PCC 260 USP**. São Paulo: 2000. 69p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol. 2. Ed. G. C Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. P 1195 – 1224;

GROSSI B. F. **Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço**. Belo Horizonte: 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

HOLANDA. K. M. A. **Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto**. São Carlos: 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1ª Ed. São Paulo. IBRACON, 2008. 674p.

MILLER, K. P. **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MINDESS, S. **Torsion tests of steel fiber reinforced concrete**, Int. Journal Cement Composites and Lightweight Concrete, V2, p. 85-89, 1980.

NETO, F. L. e PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais - Ciência e tecnologia**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

NETO, A. D. F. N. **FUNDAÇÕES: teoria e prática**. 2ª Ed. São Paulo. PINI, 1998.

Norma da ABNT\_\_\_\_\_.

**NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2007.

**NBR 8890**: Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2003.

NUNES, N. L. **Potencialidades para aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em estruturas metroviárias**. Revista Técnica IPEP, São Paulo, SP, jan./dez. 2005. v. 5, p. 71-80.

NUNES, N. L. e AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**: Boletim Técnico PCC 225 USP. São Paulo: 1998. 18p.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. São Paulo: 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

QUINTA, M. T. **Pisos de concreto com fibras de aço**. Revista Técnica. Ed. 107. São Paulo, SP, 2007.

RAMOS, M. F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RIPPER T. e de SOUZA V. C. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª Ed. São Paulo: Ed. Pini, 1998.

RODRIGUES, P. P. F. **Pavimentos industriais de concreto armado - projetos e critérios executivos**. 2ª Ed. São Paulo: IBTS, 2006.

RODRIGUES, P. P. F., BOTACINI, S. M. e GASPARETO, W. E. **Manual Gerdau de Pisos Industriais**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 2006.

RODRIGUES, P. P. F. **Pisos industriais: conceitos e execução**. Revista Concreto e Construções IBRACON, São Paulo, SP, jan. fev. mar. 2007. p. 24 - 31.

RODRIGUES, P. P. F. **Tipos de pisos industriais**. Revista Pisos Industriais, Ano I, Nº 2, São Paulo, SP, 2004.

ROSA, A. L. **Simulação numérica de processos de fratura em vigas de concreto armado e reforçado com fibras de aço, utilizando a curva tensão-abertura de fissura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SARZALEJO, A. G., ROSSI, B., PERRI, G., WINTERBERG, R. e ARISTEGUIETA, R. E. P. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto** – Maccaferri do Brasil Ltda. São Paulo: IBRACON, 2007.

SHAH, S. P. Fiber reinforced concrete. In: Handbook of structural concrete. Ed. McGraw-Hill. New York, 1984.

SIMMONS, H. L. **Olin's construction: principles, materials, and methods**. 8th ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication: 2007.

SIMPLÍCIO, M. A. S. **Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras**. Recife: 2008. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

TARTUCE, R. **Patologias de Pisos** - Casos Reais. In: 1º SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PISOS INDUSTRIAIS PARA A LOGÍSTICA MODERNA. São Paulo: 2007.

TATNALL, P. C. **Fibre reinforced sprayed concrete: the effect on anti-spalling behavior during fires**. In Fourth International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Davos, Switzerland, 22 – 26 September 2002.

THOMAZ, E. C. S. **Concreto com fibras incorporadas**: Notas de aula. IME – Instituto Militar de Engenharia, 2008.

VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

## **APÊNDICE I**

## **APÊNDICE I - VISITA A UMA OBRA DE EXECUÇÃO DE PISO INDUSTRIAL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

Como informado no presente trabalho, à execução de pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço ainda não é costume no Estado de Pernambuco. Portanto, dificuldades foram encontradas para localizar uma obra de piso industrial que estivesse utilizando o referido material.

O complexo industrial portuário do município de Suape/PE está em fase de implantação, apesar de muitas indústrias já estarem instaladas e em plena atividade. Com isso, a probabilidade de “alcançar” o objetivo era maior do que na cidade do Recife, capital de Pernambuco.

Um galpão destinado a atividades de decapagem de peças metálicas estava em execução e o piso estava sendo construído com reforço de fibras de aço. A obra estava inserida no Estaleiro Atlântico Sul e as peças que ali serão “trabalhadas” serão destinadas a montagem dos navios, podendo ter tamanhos e pesos consideráveis. Na figura I.1, é mostrado o referido galpão em processo de execução.



Fig. I.1 – Galpão industrial destinado a decapagem de peças metálicas  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:34 hs)

O piso tinha uma área aproximada de 15.000 m<sup>2</sup>. Foram especificadas fibras com comprimento de 60 mm e diâmetro de 0,80 mm, resultando em um fator de forma de 75. O total de fibras a ser consumida girava em torno de 90 toneladas.

Essa obra apresentava uma particularidade: primeiramente era construído um piso com 18 cm de espessura, e volume de fibras de 25 kg/m<sup>3</sup>. Em seguida, sobre esse piso, era construído outro, dessa vez com espessura de 10 cm e volume de fibras de 30 kg/m<sup>3</sup>, conforme a figura I.2. O concreto utilizado era de 40 MPa e as fibras eram adicionadas na usina. O caminhão betoneira chegava à obra com o material pronto para aplicação.



Fig. I.2 – Piso de concreto de 10 cm sobre um piso de 18 cm  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:24 hs)

A execução de uma placa reforçada com fibras de aço sobre outra não é comum, mas essa especificação do projeto tinha uma explicação. O Estaleiro ainda não havia definido o local por onde iria passar algumas tubulações, assim a placa superior sofreria cortes num futuro próximo, necessitando de uma maior resistência ao cisalhamento. Conseqüentemente foi especificado um maior volume de fibras.

A execução foi realizada com a utilização de equipamentos modernos, fazendo com que alguns “inconvenientes”, como afloramento excessivo de fibras, fosse praticamente eliminado, conforme mostrado na figura I.3.



Fig. I.3 – Piso executado sem ocorrência de afloramento excessivo de fibras  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:06 hs)

O caminhão entrava no local e lançava o concreto sem a necessidade de bombeamento, pois a “plataforma” não apresentava malhas de aço, o que tornaria tal fato impossível. Após o lançamento, alguns operários “puxavam” o excesso de concreto com enxadas, e uma niveladora a laser com régua de 2 metros fazia o seu papel de deixar o piso no nível requerido, conforme a figura I.4.



Fig. I.4 – Nivelamento do concreto com equipamento de última geração  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:19 hs)

Após as primeiras horas de aplicação da placa inferior, era realizado o vassouramento do piso com o objetivo de deixar a superfície mais rugosa para que fosse obtida uma maior aderência na aplicação da placa superior, de acordo com a figura I.5.



Fig. I.5 – Vassouramento do piso  
(Fonte: o autor, 07/12/2009 às 12:28 hs)

Segundo o engenheiro responsável pela execução da obra, o intervalo de execução entre as duas placas era de aproximadamente 7 dias. Durante esse período, a placa inferior ficava “submersa” em água para realização de cura.

A conclusão obtida com essa visita é que com condições adequadas, como equipamentos apropriados, é possível construir placas de concreto reforçado com fibras de aço praticamente evitando o afloramento de fibras à superfície.

O afloramento é um problema que faz com que esse processo construtivo muitas vezes não seja especificado, mesmo sabendo que as conseqüências são unicamente prejuízos de ordem estética, e não de ordem estrutural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, José Vanderlei de. **Microcimento**: nova tecnologia na manutenção e reparo de pisos. Revista Pisos Industriais, Revista Pisos Industriais, Ano 5, Nº 8, São Paulo, SP, 2007.

ACI, Committee 302 1R-04, “**Guide for concrete floor and slab construction**”. American Concrete Institute, March, 2004.

ACI, “**Concrete flatwork technician and finisher**”. American Concrete Institute, 1998.

ACI, Committee 544.1R – 96, “**State-of-the-art report on fiber reinforced concrete**”. American Concrete Institute, November, 1996.

ACI, “**Do steel fibers mix with wire guides?**”. ACI Journal, American Concrete Institute, December, 1991.

ACI, Committee 360.R – 06, “**Design of slabs-on-ground**”, American Concrete Institute, 2006.

ALMEIDA, I. R. **Concreto de alto desempenho**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol. 2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. P 1159 – 1194;

ARAÚZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforçado com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Fibras de aço para concreto – especificação**, NBR 15530, Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 8890. **Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2003.

BALAGURU, P. N. e SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**. USA. McGraw-Hill. 1992.

BENTUR, A. e MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. New York: Elsevier Applied Science, 1990.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. Rio e Janeiro: LTC Editora, 2000.

CARNIO, M. A. **Análise em regime plástico de placas de concreto reforçadas com fibras de aço sobre base elástica**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CHODOUNSKI, M. A. e VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e executivos**. 1ª Ed. São Paulo: Reggenza editorial, 2007.

CHODOUNSKI, M. A. **Fibras metálicas para reforço de concreto**. Revista Pisos Industriais, Ano 5, Nº 7, São Paulo, SP, 2008.

DOMENICHINI, DI MASCIO, GIANNATASIO, CALIENDO, FESTA, MARCHIONNA, FIRMI, MOLINARO, PAOLONI. **Catalogo delle pavimentazioni stradali: Modello di catalogo delle pavimentazioni stradali**. Roma: CNR, 1995.

EHE – 08. **“Instrucción de hormigón estructural”**. Anejo 14. 2ª Ed. Madrid: Ministério de Fomento, 2008.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS **Dosobox SC 99** – Maccaferri, 2007.

FARIAS, M. L. R., TOLEDO, R., FAIRBAIRN, E. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras**. Revista Engenharia – Estudo e Pesquisa, v.3, n.1, p. 87-98, Juiz de Fora, MG, Jan/Jun, 2000.

FERNANDES, A. **Utilização de fibras de aço para reforço de concreto em anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túneis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. São Carlos: 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. São Paulo: 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de aço**: Boletim Técnico PCC 260 USP. São Paulo: 2000. 69p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol. 2. Ed. G. C Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. P 1195 – 1224;

GROSSI B. F. **Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço**. Belo Horizonte: 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

HOLANDA. K. M. A. **Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto**. São Carlos: 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2002.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 1ª Ed. São Paulo. IBRACON, 2008. 674p.

MILLER, K. P. **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MINDESS, S. **Torsion tests of steel fiber reinforced concrete**, Int. Journal Cement Composites and Lightweight Concrete, V2, p. 85-89, 1980.

NETO, F. L. e PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais** - Ciência e tecnologia. 1ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

NETO, A. D. F. N. **FUNDAÇÕES**: teoria e prática. 2ª Ed. São Paulo. PINI, 1998.

NUNES, N. L. **Potencialidades para aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em estruturas metroviárias**. Revista Técnica IPEP, São Paulo, SP, jan./dez. 2005. v. 5, p. 71-80.

NUNES, N. L. e AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**: Boletim Técnico PCC 225 USP. São Paulo: 1998. 18p.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. São Paulo: 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

QUINTA, M. T. **Pisos de concreto com fibras de aço**. Revista Técnica. Ed. 107. São Paulo, SP, 2007.

RAMOS, M. F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RIPPER T. e de SOUZA V. C. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª Ed. São Paulo: Ed. Pini, 1998.

RODRIGUES, P. P. F. **Pavimentos industriais de concreto armado - projetos e critérios executivos**. 2ª Ed. São Paulo: IBTS, 2006.

RODRIGUES, P. P. F., BOTACINI, S. M. e GASPARETO, W. E. **Manual Gerdau de Pisos Industriais**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 2006.

RODRIGUES, P. P. F. **Pisos industriais: conceitos e execução**. Revista Concreto e Construções IBRACON, São Paulo, SP, jan. fev. mar. 2007. p. 24 - 31.

RODRIGUES, P. P. F. **Tipos de pisos industriais**. Revista Pisos Industriais, Ano I, Nº 2, São Paulo, SP, 2004.

ROSA, A. L. **Simulação numérica de processos de fratura em vigas de concreto armado e reforçado com fibras de aço, utilizando a curva tensão-abertura de fissura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SARZALEJO, A. G., ROSSI, B., PERRI, G., WINTERBERG, R. e ARISTEGUIETA, R. E. P. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto** – Maccaferri do Brasil Ltda. São Paulo: IBRACON, 2007.

SHAH, S. P. Fiber reinforced concrete. In: Handbook of structural concrete. Ed. McGraw-Hill. New York, 1984.

SIMMONS, H. L. **Olin's construction: principles, materials, and methods**. 8th ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication: 2007.

SIMPLÍCIO, M. A. S. **Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras**. Recife: 2008. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

TARTUCE, R. **Patologias de Pisos** - Casos Reais. In: 1º SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PISOS INDUSTRIAIS PARA A LOGÍSTICA MODERNA. São Paulo: 2007.

TATNALL, P. C. **Fibre reinforced sprayed concrete: the effect on anti-spalling behavior during fires**. In Fourth International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Davos, Switzerland, 22 – 26 September 2002.

THOMAZ, E. C. S. **Concreto com fibras incorporadas**: Notas de aula. IME – Instituto Militar de Engenharia, 2008.

VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.