



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,  
ARQUITETURA E URBANISMO**

# **FIBRAS DE AÇO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A PAVIMENTO**

**Ivo Moscatelli**

**Campinas**

**2011**





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**Autor: Ivo Moscatelli**

**FIBRAS DE AÇO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
APLICADOS A PAVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

Orientadora : Prof.<sup>a</sup> Dra Rita Moura Fortes

Campinas - SP

2011

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

M85f Moscatelli, Ivo  
Fibras de aço em concreto de cimento Portland  
aplicados a pavimento / Ivo Moscatelli. --Campinas, SP:  
[s.n.], 2011.

Orientador: Rita Moura Fortes.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo.

1. Fibras de metal. 2. Pavimentos. 3. Concreto. 4.  
Testes. 5. Resistencia. I. Fortes, Rita Moura. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Portland cement concrete with steel fibers used in pavement

Palavras-chave em Inglês: Steel fibers, Pavements, Concrete, Testes, Resistance

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Cassio Eduardo Lima de Paiva, Carlos Yukio Suzuki

Data da defesa: 30-08-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

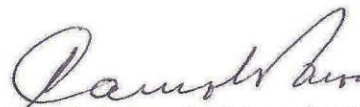
**FIBRAS DE AÇO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
APLICADOS A PAVIMENTO**

**Ivo Moscatelli**

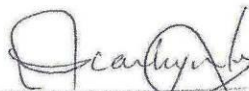
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Profa. Dra Rita Moura Fortes  
Presidente e Orientador(a)/ Unicamp**



**Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva  
Unicamp**



**Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki  
Poli/USP**

**Campinas, 30 de Agosto de 2011**

## **Dedicatória**

À minha querida mãe  
A Andrea  
Aos meus filhos e netos

## **Agradecimentos**

- À minha amiga e orientadora Profa. Dra. Rita Moura Fortes, pela dedicação, paciência e sugestões, durante toda esta pesquisa.
- Ao Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, pelo auxílio no estabelecimento dos parâmetros de construção da pesquisa.
- Ao Prof. Dr. João Virgílio Merighi pelas sugestões e contribuição no aprimoramento deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Eduardo Ioshimoto pelo auxílio na interpretação dos resultados dos ensaios.
- Ao Prof. Ms. Simão Prizskulnik pelas orientações no laboratório de materiais.
- À Profa. Ms. Ana Maria S J de Melo pelo auxílio no tratamento estatístico dos resultados.
- À Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, por me disponibilizar as instalações do laboratório de materiais, em especial aos técnicos José Carlos Sobrinho e José Maria da Silva.
- À LENC Laboratório de Engenharia e Consultoria Ltda pela ajuda na moldagem dos corpos de prova, em especial ao Eng. Álvaro Sérgio Barbosa Jr., ao Eng. Rogério Perini e ao Tecnólogo Carlos Christian da Silva.
- Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) por disponibilizar seu laboratório para a realização do ensaio de desgaste a abrasão.
- À minha mãe por ter me dado a vida.
- A Andrea, minha incansável companheira de todas as horas, por ter me incentivado durante todo este tempo.
- Aos amigos e colegas que compartilharam comigo o curso, em especial a Ana Paula por todo apoio principalmente nas derradeiras horas, a Flaviane, ao Ricardo, a Luciana.
- A todos aqueles que de alguma maneira colaboraram e me ajudaram a chegar até aqui.

## **Resumo**

O objetivo da presente pesquisa trata de uma contribuição ao estudo da dosagem de concreto de cimento Portland com adição de fibras de aço, utilizado na pavimentação. Nesta pesquisa foi estudada a influência da adição de diferentes proporções de fibras de aço buscando otimizar a sua utilização além de orientar quanto aos cuidados durante a mistura e sua aplicação.

O pavimento de concreto de cimento Portland tem marcado presença cada vez maior no cenário brasileiro, sendo recomendado principalmente em locais de tráfego pesado ou quando o subleito possui baixa capacidade de suporte. No entanto, tem sido constante a busca por uma melhor atuação desse material no que se refere à resistência à tração na flexão, diminuição da fissuração devido à retração, redução do nível do ruído, além de apresentar uma textura com melhor aderência pneu-pavimento.

Vários métodos de dosagem desse material têm sido desenvolvidos, mas existe a necessidade de se buscar uma dosagem que dê uma melhor resposta em relação às suas propriedades interessantes à pavimentação. Nesta pesquisa utilizou-se uma metodologia, simples, porém adequada para os materiais em questão, não perdendo de vista as premissas a serem atendidas pelo pavimento. Foram realizados os ensaios para averiguação comparativa do comportamento de diferentes dosagens com fibras de aço incorporadas ao concreto para pavimentação e também orientação quanto aos cuidados durante a mistura e sua aplicação.

## **Abstract**

The objective of this research is to contribute for the Portland cement concrete study with addition of fibers used on pavements. This research studied the results of different dosages using steel fibers in order to optimize their use as well as direct care during mixing and application.

The Portland cement concrete pavement has been acting with an important role on the Brazilian scenario and it is recommended specially in areas of heavy traffic or when the subgrade has a low load capacity. However, constant research has been carried for a better performance on flexural strength, decreasing the cracking due to shrinkage, reducing the noise level, and promoting a better adherence between tire-pavement.

Several methods for the dosage of this material have been developed, but there is a need on seeking a determination that presents a better response in relation to the interested properties of the pavement. This research used a simple methodology, but adequate for the material, bearing in mind the assumptions necessary for the proper performance of the pavement. It was verified the performance of different dosages with steel fibers embedded in the concrete paving and also guidance on care during mixing and application.

# SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP . ii

Dedicatória..... iv

Agradecimentos ..... v

Resumo ..... vi

Abstract..... vii

SUMÁRIO..... viii

Lista de Tabelas ..... xi

Lista de Figuras ..... xiv

Lista de Siglas..... xvii

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO..... 1

1.1 Objetivo ..... 3

1.2 Justificativa..... 4

1.3 Estrutura do trabalho ..... 5

CAPITULO 2 - PAVIMENTOS DE CONCRETO ..... 7

2.1 O concreto..... 7

2.2 Fissuração ..... 10

2.2.1 – Principais causas de fissuras..... 10

2.2.1.1 – Por retração..... 10

2.2.1.2 – Por variação de temperatura ..... 10

2.3 – Dosagem do concreto ..... 11

2.3.1 Dosagem do concreto com fibras ..... 15

2.4 Execução de pavimento de concreto ..... 17

CAPITULO 3 – ADIÇÃO DE FIBRAS NO CONCRETO ..... 21

3.1 Considerações sobre o comportamento das fibras..... 24

3.2 Fibras de celulose ..... 28

3.3 Fibras de polipropileno..... 29

3.4 Fibras de aço..... 31



CAPITULO 4 – CONTROLE TECNOLÓGICO E DE QUALIDADE NO PAVIMENTO DE CONCRETO.....	35
4.1 Etapas de Execução do Concreto e do Controle Tecnológico durante o preparo e Produção.	35
4.1.1 Ensaios de Controle Tecnológico do Cimento .....	35
4.1.2 Ensaio de Controle Tecnológico de Agregados .....	38
4.1.3 Ensaio de Controle Tecnológico de Água de Amassamento do Concreto .....	38
4.1.4 Ensaios de Controle Tecnológico de Aditivos .....	38
4.1.5 Ensaios de Controle Tecnológico de Adições Minerais no Concreto .....	39
4.1.6 Controle Tecnológico da Produção do Concreto.....	39
4.2 Ensaio de Controle de Aceitação.....	42
4.2.1 Ensaio do Concreto Fresco .....	43
4.2.2 Controle Tecnológico do Concreto Endurecido .....	43
4.3 Aceitação ou rejeição do lote de concreto controlado .....	48
4.4 Qualificação de laboratórios de controle tecnológico .....	48
CAPITULO 5 - PARTE EXPERIMENTAL.....	49
5.1 Dosagem preliminar dos materiais, utilizando-se fibras de aço, de celulose e polipropileno.	49
5.1.1 Caracterização dos materiais .....	50
5.1.2 Propriedades do concreto .....	53
5.1.3 Resultados.....	55
5.1.3.1 Resistência à compressão axial.....	55
5.1.3.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	57
5.1.3.3 Resistência à tração na flexão com a carga no meio do vão.....	58
5.1.3.4 Resistência à tração na flexão com a carga nas terças partes do vão .....	59
5.1.3.5 Determinação dos módulos estáticos de elasticidade .....	61
5.1.3.6 Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico (ABNT NBR 8802:1994) .....	62
5.1.3.7 Análise dos Resultados dessa dosagem preliminar .....	63
5.2 Estudo da Adição de Fibras de Aço.....	64
5.2.1 Características dos materiais utilizados.....	65
5.2.2 Propriedades do concreto .....	68
5.2.3 Resultados.....	72

5.2.3.1 Resistência à compressão axial.....	73
5.2.3.2 Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão .....	80
5.2.3.3 Resistência à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão .....	87
5.2.3.4 Resistência à tração por compressão diametral .....	92
5.2.3.5 Determinação do módulo de elasticidade do concreto .....	98
5.2.3.6 Módulo de elasticidade dinâmico .....	109
5.2.3.7 Determinação do desgaste por abrasão.....	116
CAPITULO 6 - CONCLUSÃO.....	119
6.1 Sugestão para novas pesquisas .....	120
Referências Bibliográficas.....	121

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Rodovias de CCP – Fonte: World Road Association Technical Committee on Concrete Roads. “First analysis of the questionnaire – Pavement Design Methods of Cement Concrete Pavements”. Abril, 1998, Florence.....	8
Tabela 2: Tipos de Cimento Portland segundo a ABCP .....	9
Tabela 3: Classes do concreto Fonte: Banduk (2005) .....	13
Tabela 4: Características mecânicas das fibras (BENTUR e MINDESS, 1990).....	26
Tabela 5 valores de t para o nível de confiança de 80%.....	46
Tabela 6 Quantidade de fibra utilizada.....	53
Tabela 7 Massas específicas dos materiais .....	53
Tabela 8 Valores da consistência do concreto fresco .....	54
Tabela 9 Resultados à compressão axial .....	55
Tabela 10 Resistência à tração por compressão diametral (figuras 18 a 20).....	57
Tabela 11 Resistência à tração na flexão com carga no meio do vão (Figuras 23 e 24) .....	58
Tabela 12 Resistência à tração na flexão com carga nas terças partes do vão .....	60
Tabela 13 Módulo estático de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008).....	61
Tabela 14 Módulo de elasticidade dinâmico. ....	62
Tabela 15 Materiais utilizados no estudo da dosagem com fibras de aço .....	64
Tabela 16: Características da areia utilizada .....	65
Tabela 17: Especificação do cimento Portland.....	66
Tabela 18 Características da brita 1 .....	67
Tabela 19 características de moldagem .....	68
Tabela 20 Traço Unitário.....	68
Tabela 21 consumo de material para 1m <sup>3</sup> de concreto (materiais secos). ....	69
Tabela 22 Resultados obtidos nos ensaios do concreto fresco .....	69
Tabela 23 Traço D1 : concreto sem fibras – Resistência à compressão axial .....	73
Tabela 24 Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial ....	75
Tabela 25 Traço D 3 : concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial ....	77
Tabela 26 Traço D 4 : concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial ....	78

Tabela 27: Resumo dos Resultados da Compressão Axial .....	80
Tabela 28 - Traço D 1 : concreto sem fibras – Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão .....	81
Tabela 29 - Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão .....	82
Tabela 30 - Traço D 3 : concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão .....	83
Tabela 31 - Traço D 4 : concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão .....	85
Tabela 32: Resumo da Resistência à Tração na Flexão .....	86
Tabela 33: Traço D 1 : concreto sem fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão .....	87
Tabela 34: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão .....	88
Tabela 35: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão .....	89
Tabela 36: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão .....	90
Tabela 37: Resumo da Tração por Flexão no Meio do Vão.....	90
Tabela 38: Traço D 1 : concreto sem fibras - à tração por compressão diametral .....	92
Tabela 39: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras- à tração por compressão diametral	94
Tabela 40: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras- à tração por compressão diametral	95
Tabela 41: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras- à tração por compressão diametral	96
Tabela 42: Resumo da Tração por Compressão Diametral .....	97
Tabela 43: Traço D1 : concreto sem fibras - módulo de elasticidade .....	98
Tabela 44: Traço D1 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade .....	99
Tabela 45: Traço D1 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade .....	99
Tabela 46: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade.....	100
Tabela 47: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade.....	101
Tabela 48: Traço D 2: concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade.....	102
Tabela 49: Traço D 3: concreto com 30 kg de fibras- módulo de elasticidade .....	103

Tabela 50: Traço D 3: concreto com 30 kg de fibras- módulo de elasticidade .....	103
Tabela 51: Traço D 3: concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade.....	104
Tabela 52: Traço D 4: concreto com 40 kgf/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade .....	106
Tabela 53: Traço D4 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade .....	106
Tabela 54: Traço D4: concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade.....	107
Tabela 55: Resumo do Módulo de Elasticidade (GPa).....	108
Tabela 56: Traço D 1 : concreto sem fibras - Módulo de elasticidade dinâmico .....	109
Tabela 57: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m <sup>3</sup> de fibras- Módulo de elasticidade dinâmico	110
Tabela 58: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m <sup>3</sup> de fibras - Módulo de elasticidade dinâmico	111
Tabela 59: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m <sup>3</sup> de fibras- Módulo de elasticidade dinâmico	112
Tabela 60: Resumo do Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	113
Tabela 61: Resumo dos resultados .....	115
Tabela 62: Resultados do ensaio desgaste por abrasão .....	117

## Lista de Figuras

Figura 1 Representação esquemática do traço do concreto .....	11
Figura 2 Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland.....	14
Figura 3: Formação de ouriços no concreto após a adição de fibras de celulose Fonte: Acervo Próprio (2007). .....	16
Figura 4: Fibras de celulose (arquivo pessoal) .....	29
Figura 5: Fibromac 12 – (Fonte : arquivo pessoal) .....	30
Figura 6: Fibromac 12 (Fonte : arquivo pessoal) .....	31
Figura 7: Fibras de aço (Fonte : Maccaferri).....	32
Figura 8 Fibra de aço com ancoragem (Bilodeau et al., 2011).....	33
Figura 9 Fibras de aço Wirand FF3 – (Fonte : arquivo pessoal) .....	34
Figura 10 Diagrama de serviços de controle tecnológico em centrais e materiais Componentes do concreto (ABRATEC, 2005) .....	36
Figura 11 Fibras de aço .....	51
Figura 12 Fibras de polipropileno .....	51
Figura 13 Fibras de celulose.....	52
Figura 14 Aditivo hiperplastificante para concreto .....	52
Figura 15 Determinação da consistência do concreto fresco (slump test) .....	54
Figura 16 Resultados à compressão axial.....	56
Figura 17 Rompimento dos corpos de prova.....	56
Figura 18 Resistência à tração por compressão diametral.....	57
Figura 19 Ensaio à tração por compressão diametral .....	57
Figura 20 Corpo de prova rompido .....	58
Figura 21 Resistência à tração na flexão com carga no meio do vão .....	59
Figura 22 Ensaio com carga aplicada no meio do vão .....	59
Figura 23 Resistência à tração na flexão com carga nas terças partes do vão.....	60
Figura 24. Ensaio com carga nos terços do vão. ....	60
Figura 25 Gráfico do Módulo estático de elasticidade (GPa) (ABNT NBR 8522:2008).....	61
Figura 26. Ensaio do Módulo estático de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008) .....	62

Figura 27 Gráfico dos resultados do Ensaio para determinação do Módulo (GPa) de elasticidade dinâmico .....	63
Figura 28 Ensaio para determinação do Módulo de elasticidade dinâmico .....	63
Figura 29: CP com fibra de aço sendo ensaiado à compressão axial .....	69
Figura 30: CP com fibra de aço rompido à compressão axial .....	70
Figura 31: Prisma com fibra de aço sendo ensaiado com carga no meio do vão .....	70
Figura 32: Prisma com fibra de aço ensaiado com carga no meio do vão .....	71
Figura 33: CP com fibra de aço sendo ensaiado à compressão diametral .....	71
Figura 34: CP com fibra de aço rompido à compressão diametral .....	72
Figura 35: Ensaio para determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação .....	72
Figura 36 - Gráfico do Ensaio à Compressão Axial .....	74
Figura 37 - Gráfico do Ensaio de Compressão Axial (descartando o CP 5) .....	75
Figura 38- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (considerando o resultado dos 15 CPs) ...	76
Figura 39- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (descartando os CPs 34 e 39) .....	76
Figura 40- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial .....	78
Figura 41 - Gráfico do Ensaio à Compressão Axial .....	79
Figura 42- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (descartando o CP 88) .....	79
Figura 43: Valores médios obtidos da Resistência à Compressão Axial .....	80
Figura 44- Gráfico do Traço D1 - Tração na Flexão .....	82
Figura 45 - Gráfico do Traço D2 - Tração por Flexão .....	83
Figura 46- Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão .....	84
Figura 47- Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão .....	84
Figura 48 - Gráfico do Traço D4 - Tração por Flexão .....	85
Figura 49- Gráfico do Traço D4 - Tração por Flexão (descartando o prisma 40) .....	86
Figura 50: Valores médios da resistência à tração na flexão .....	87
Figura 51: Gráfico do Traço D1 - Tração por Flexão no Meio do Vão .....	88
Figura 52: Gráfico do Traço D2 - Tração por Flexão no Meio do Vão .....	89
Figura 53: Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão no Meio do Vão .....	89
Figura 54: Gráfico do Traço D4 - Tração por Flexão no Meio do Vão .....	90
Figura 55 Valor médio da resistência à tração na flexão com a carga no centro do vão .....	91

Figura 56: Comparação entre as resistências obtidas na tração na flexão com a carga aplicada nos terços dos vãos e no centro.....	91
Figura 57: Gráfico do Traço D1 - Tração por Compressão Diametral.....	93
Figura 58: Gráfico do Traço D2 - Tração por Compressão Diametral.....	94
Figura 59: Gráfico do Traço D3 - Tração por Compressão Diametral.....	95
Figura 60: Gráfico do Traço D4 - Tração por Compressão Diametral.....	96
Figura 61: Valor médio da resistência à tração por compressão diametral .....	97
Figura 62: Gráfico do Traço D1 - Módulo de Elasticidade.....	100
Figura 63: Gráfico do Traço D2 - Módulo de Elasticidade.....	102
Figura 64: Gráfico do Traço D3 - Módulo de Elasticidade.....	104
Figura 65: Gráfico do Traço D3 – Módulo de Elasticidade .....	105
Figura 66: Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade.....	108
Figura 67: Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade.....	108
Figura 68: Valores médios do Módulo de elasticidade .....	108
Figura 69: Gráfico do Traço D1 - Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	109
Figura 70: Gráfico do Traço D2 - Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	110
Figura 71: Gráfico do Traço D3 - Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	111
Figura 72 :Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	112
Figura 73: Valor médio do Módulo de Elasticidade Dinâmico para cada traço.....	113
Figura 74 Valores médios do módulo de elasticidade e dinâmico .....	114
Figura 75: Corpos de prova a serem ensaiados .....	116
Figura 76: Equipamento para desgaste AMS-01 CETAC-LCSC .....	117
Figura 77 Determinação do desgaste da amostra .....	117



## **Lista de Siglas**

a/c- Relação água/cimento

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CCP – Concreto de Cimento Portland

CNT Confederação Nacional do Transporte

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Cimento Portland

CRFA – Concreto Reforçado com Fibras de Aço

CV – Coeficiente de Variação da Amostra

D<sub>máx.</sub> – Diâmetro Máximo

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DPp – Desvio padrão

ESALQ – USP – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz

f<sub>ct,f</sub> - Resistência característica à tração na flexão

GEE - gases de efeito estufa

H – Relação água/ materiais secos

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

INT – Instituto Nacional de Tecnologia

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

ITERS - Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul

m – Proporções de agregado graúdo e miúdo

PCA – Portland cement association

PCCP – Pavimento de Concreto de Cimento Portland

RBC – Rede Brasileira de Calibração

RBLE – Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio

VCP – Votorantim celulose e papel

## **CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO**

Em pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte - CNT, no ano de 2009, sobre as condições reais das rodovias brasileiras, abrangendo toda a malha federal pavimentada e os principais trechos sob jurisdição estadual e concessionada, que envolveu uma extensão de 89.552 km, dos quais 60.784 km eram de rodovias federais, o cenário que se apresentou foi o seguinte: 69,1% da extensão pesquisada (61.839 km) apresentavam problemas de pavimento, sinalização e/ou geometria viária (CNT: 2009).

Segundo esse relatório, as condições atuais das rodovias do país geram efeitos negativos sobre o setor produtivo, a população, e, mais diretamente, sobre o setor transportador, tais como o aumento da poluição, do consumo de combustível, dos custos operacionais e da incidência de acidentes.

Além disso, a velocidade de fluxo livre de tráfego está diretamente relacionada à qualidade de uma rodovia, e quanto melhor, menor será a demora na entrega de cargas e passageiros. Ela também depende da relação entre a oferta de rodovias e a demanda de seu uso e sua qualidade, requerendo um estudo para cada rodovia em separado.

Na Pesquisa de Fluidez, publicada pela CNT em 2002, rodovias “com buracos” reduzem a velocidade em 8,5 km/h, enquanto que rodovias com pavimento totalmente destruído provocam queda de velocidade de 31,8 km/h, sempre em relação a trechos com pavimento em bom estado.

No relatório da CNT de 2009, devido às condições do pavimento das rodovias brasileiras, estimava-se que o custo de operação dos veículos de carga era 28% maior do que seria se todas as rodovias apresentassem um pavimento de ótima qualidade.

Em uma pesquisa desenvolvida pela ESALQ-USP, o tráfego de um caminhão em uma rodovia com uma excelente condição de pavimento pode implicar em uma economia de até 5% no consumo de combustível de um caminhão (REIS, 2006).

Apesar de o transporte rodoviário desempenhar relevante papel no desenvolvimento econômico do país, traz consigo o estigma de ser um grande emissor de poluentes por fontes móveis.

No que se refere à questão ambiental, no que diz respeito à qualidade do ar, às emissões dos gases de efeito estufa (GEEs) e ao uso racional de energia, o estado precário da infraestrutura rodoviária do país contribue expressivamente para o aumento do consumo de combustíveis e o consequente aumento das emissões atmosféricas advindas do transporte (CNT, 2009).

Considerando-se que o pavimento de concreto de cimento Portland, também denominado de pavimento rígido, tem se destacado cada vez mais no cenário nacional, aumentando a sua presença nas rodovias, é premente o aprimoramento dessa técnica, seja na sua dosagem ou na sua execução, de maneira a atender a demanda exigida, respeitando-se o desenvolvimento social, econômico e o meio ambiente.

Por essa razão uma pesquisa para a melhoria da técnica de execução do pavimento de concreto de cimento Portland (CCP), considerando-se que este tipo de pavimento tem apresentado alguns insucessos devido à falta de mão de obra devidamente qualificada no meio técnico somado à susceptibilidade do aglomerante, o cimento Portland, à fissuração, que se agrava no caso da pavimentação devido à grande superfície exposta à secagem.

Para controlar e inibir o aparecimento de fissuras por retração do compósito no CCP convencional tem-se estudado a incorporação de fibras.

Atualmente, as fibras mais utilizadas na construção civil são as fibras de nylon, poliéster, polietileno, polipropileno, celulose e aço. O uso destas fibras associadas ao concreto (material utilizado em larga escala por sua facilidade de produção) vem sendo objeto de estudo de diversos pesquisadores em busca de maior resistência para aplicação em pavimentos de concreto. (FIGUEIREDO, 2000). A adição de fibras de aço aumenta a resistência à tração na flexão do concreto de cimento Portland.

As fibras de celulose possuem um papel semelhante, uma vez que também são consideradas fibras de baixo módulo. No entanto, no Brasil, ainda não existe uma norma técnica na área para sua utilização em pavimentação, dessa maneira é necessário que se desenvolvam pesquisas para estudar a sua utilização, contribuindo para a otimização do desempenho desse material.

Após a fissuração da matriz a presença de fibras proporciona em geral um aumento da ductilidade e percebe-se em alguns casos, ganho de resistência à tração. Entretanto, este aumento dependerá de uma série de fatores, tais como: volume de fibras, arranjo e método de mistura nos demais componentes do concreto de Cimento Portland.

Ao adicionar qualquer tipo de fibra ao concreto simples, ocorre uma alteração nas condições de consistência do concreto e, conseqüentemente, uma redução na sua trabalhabilidade. Segundo Carneiro (1997), isto se deve principalmente ao fato de, ao se adicionar fibras ao concreto, estar se adicionando uma grande área superficial que demanda mais água e, além disso, a presença das fibras aumenta a resistência mecânica nos processos de mistura dos materiais e vibração do concreto, que depende da geometria e da rigidez das fibras. Quanto maior for a dimensão máxima e o volume do agregado graúdo, mais difícil é obter uma boa trabalhabilidade.

Mehta, Monteiro (1994); Figueiredo (2000) pesquisaram a influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração e concluíram que os concretos reforçados com fibras de polipropileno têm sido empregados principalmente para pavimentos industriais, pois tem sido imputada a essas fibras a capacidade de diminuição de fissuração por retração. Afirmaram que tem sido empregado o teor de fibras de 0,1% de fibras fibriladas (900g/m<sup>3</sup>) em volume, determinado empiricamente, sem que tenha havido uma relação entre desempenho do componente e volume de fibras empregadas.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo da presente pesquisa é de contribuir para o estudo da dosagem de concreto de cimento Portland com adição de fibras de aço para sua utilização na pavimentação. Serão ajustadas as propriedades do concreto fresco de maneira a atender o recomendado para pavimentos, verificando a diferença de comportamento de cada dosagem quanto às resistências à tração na

flexão, à compressão, à tração por compressão diametral, módulos de elasticidade estático e dinâmico, buscando otimizar a sua utilização, além de orientar quanto aos cuidados durante a mistura e sua aplicação.

## **1.2 Justificativa**

Os pavimentos de concreto de cimento Portland têm contribuído para a redução do consumo de energia. Estudos têm provado que caminhões consomem menos combustível sobre pavimentos de CCP que sobre pavimentos de concreto asfáltico, com um profundo impacto no custo da vida útil da rodovia (Zaniewski, 1998). Estudos também têm demonstrado que devido à elevada reflexão da luz no pavimento de CCP, é possível diminuir o consumo de energia (Pace; Becker, 1998).

O pavimento de concreto de cimento Portland é muito utilizado em locais onde o tráfego é pesado, canalizado, em corredores de ônibus, em paradas, onde a capacidade de suporte do subleito é baixa. No entanto, a execução deste tipo de pavimento tem apresentado alguns insucessos devido à escassez de mão de obra disponível no meio técnico somado principalmente à susceptibilidade do aglomerante de cimento Portland à fissuração, que se agrava nesse tipo de obra devido à grande superfície exposta.

É consenso que esse tipo de pavimento se executado adequadamente, possui durabilidade mais elevada que o asfáltico, sendo menos suscetível à formação da trilha de rodas e por quase não necessitar de intervenções, resulta em menor custo de manutenção. Com a adição de fibras consegue-se uma melhor distribuição dos esforços, melhorando o desempenho do concreto de cimento Portland quanto ao carregamento.

Segundo Holanda et al. (2001) elas possuem um papel essencial no aumento da resistência à fadiga. Para esses autores, quanto maior o teor de fibras/m<sup>3</sup> de concreto, maior a tenacidade, ou seja, maior a capacidade de absorver energia mecânica, o que confere melhor distribuição das tensões recebidas e consequentemente muito menos fissuras no pavimento, possibilitando maior espaçamento entre as juntas de dilatação.

Carneiro (1997) afirmou que o concreto com fibras seria o revestimento do futuro no Brasil, pois a tendência nacional era a privatização das rodovias e as concessionárias buscariam a sua utilização para conterem gastos.

Achilleos et al. (2011) afirmaram que o concreto de cimento portland possui baixa resistência à tração, no entanto suas características estruturais melhoram com a adição de fibras de aço, passando a ser denominado de Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA), permitindo uma redução da espessura do pavimento. Essa redução depende das características e dosagem das fibras e resultam em uma diminuição do custo, uma vez que requerem espessuras menores, gerando menos custos de manutenção e aumentando a vida útil dos mesmos. Para os autores, o período de vida desse pavimento é duas vezes maior que o de concreto asfáltico. Eles salientam que a mais importante contribuição está em retardar e controlar o aparecimento de fissuras, além de altamente recomendado para pavimentos aeroportuários uma vez que a presença das fibras de aço aumenta significativamente a resistência do concreto ao impacto da carga.

Tudo isto posto, ressalta-se a importância do estudo da influência da adição de cada tipo de fibra no Concreto de Cimento Portland, bem como na busca do teor ideal de aplicação da mesma.

Embora existam vários métodos de dosagem do CCP aplicados às obras civis, há a considerar algumas peculiaridades quando da sua utilização em pavimentos. Dessa maneira, nessa pesquisa, foi escolhida uma metodologia que fosse simples e adequada para os materiais em questão, não perdendo de vista as premissas necessárias ao bom desempenho de um pavimento.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, a presente pesquisa será desenvolvida estudando-se a literatura específica disponível sobre o assunto, complementada pela realização de ensaios para verificar o desempenho de diferentes dosagens do concreto com adição de fibras, em particular, as fibras de aço, e será composta pelos seguintes capítulos.

- Capítulo 2 – Pavimentos de concreto
- Capítulo 3 – Adição de fibras no concreto.

- Capítulo 4 – Controles tecnológicos e de qualidade usualmente realizados para avaliação do CCP na pavimentação
- Capítulo 5 - Parte experimental incluindo a escolha dos materiais, dosagem, moldagem e ensaios de desempenho.
- Capítulo 6 - Conclusão



## **CAPITULO 2 - PAVIMENTOS DE CONCRETO**

Os avanços ocorridos na tecnologia do concreto têm contribuído para o desenvolvimento do pavimento de concreto no Brasil, sejam nos aditivos, normas de controle de qualidade, métodos de projeto e desenhos, entre outros (AZEVEDO; DAL MOLIN; CERATTI; MATTOS, 2007).

### **2.1 O concreto**

O concreto é uma mistura formada por um aglomerante (cimento Portland), agregados graúdos (britas), agregado miúdo (areia), água e aditivos. No seu estado fresco, tem consistência plástica e pode ser facilmente moldado em formas no formato e dimensões desejadas.

No estado endurecido, tem elevada resistência à compressão, mas baixa resistência à tração. Historicamente no Brasil, o concreto em pavimentos foi utilizado pela primeira vez em 1925, em ruas de Pelotas (RS). A seguir veio a pavimentação do caminho do Mar em 1926, a estrada Itaipava/Teresópolis (RJ) em 1928, os aeroportos Santos Dumont e Congonhas, assim como as rodovias Anchieta e Anhanguera em 1940. Mais recentemente em 1970 a interligação Anchieta-Imigrantes, a própria rodovia dos Imigrantes e a pista do aeroporto do Galeão, foram pavimentadas com concreto de cimento Portland.

A utilização de concreto em pavimentos rodoviários tem tido atualmente um grande impulso. Na tabela 1 estão apresentadas as porcentagens de rodovias de concreto de cimento Portland construídas a partir de 1995 e da rede viária principal, em vários países. Apesar da preferência por pavimentos flexíveis, por apresentar menor custo inicial, pesquisas vêm demonstrando que os pavimentos em concreto, oferecem maior segurança ao usuário, melhoram a visibilidade noturna, reduz o consumo de combustível em veículos pesados e são menos deformáveis.

Tabela 1: Rodovias de CCP – Fonte: World Road Association Technical Committee on Concrete Roads. “First analysis of the questionnaire – Pavement Design Methods of Cement Concrete Pavements”. Abril, 1998, Florence.

País	% de rodovias em CCP construídas a partir de 1995	% da rede viária principal em CCP
França	4,0	8,0
Bélgica	20,0	41,0
Alemanha	40,0	28,0
Grã-Bretanha	20,0	6,0
Japão	5,0	5,0
Malásia	30,0	Sem dados
Romênia	12,0	13,5
EUA	15,0	34,0
Brasil	5,0	Sem dados

Os pavimentos de concreto podem ser classificados basicamente em quatro tipos:

- Pavimento de concreto simples com juntas serradas
- Pavimento de concreto com juntas serradas e armado
- Pavimento de concreto continuamente armado
- Pavimento de concreto protendido
- Pavimentos de blocos de concreto pré-moldados
- Restauração de pavimentos asfálticos pelo processo whitetopping

O concreto de cimento Portland, CCP, se compõe de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, aditivos e água de amassamento.

A Norma DNIT 054/2004 define a sistemática a ser adotada para a realização de estudos de traços de concreto e de ensaios de caracterização de materiais destinados à execução de concreto de cimento Portland para pavimentos rígidos de estradas de rodagem.

O mercado nacional dispõe de 8 opções de cimento que atendem aos mais variados tipos de obras, conforme apresentado na tabela 2 .

Tabela 2: Tipos de Cimento Portland segundo a ABCP

Fonte: Adaptado da ABCP (2010)

Descrição		Sigla
Cimento Portland Comum (NBR 5732)	Cimento Portland Comum	CP I
	Cimento Portland Comum com adição	CP I - S
Cimento Portland Composto (NBR 11578)	Cimento Portland com adição de material pozolânico	CP II - Z
	Cimento Portland Composto com adição de escória granulada de alto-forno	CP II - E
	Cimento Portland Composto com adição de material carbonático - fíler	CP II - F
Cimento Portland de Alto Forno com escória (NBR 5735)		CP III
Cimento Portland com Pozolana (NBR 5736)		CP IV - 32
Cimento Portland com Alta Resistência Inicial (NBR 5733)		CP V - ARI
Cimento Portland Resistente a Sulfatos (NBR 5737)		CP (RS)
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) (NBR 13116)		---
Cimento Portland Branco (NBR 12989)		CPB

Na presente pesquisa foi utilizado o cimento tipo CP II–E (com adição de escoria de alto-forno) que é uma composição intermediária entre o cimento comum e o cimento com adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento combina com bons resultados, o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do cimento Portland comum. Recomendado para estruturas que exigem um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacados por sulfatos.

## **2.2 Fissuração**

Um dos principais problemas patológicos do concreto é o aparecimento de fissuras. Elas podem aparecer tanto no concreto fresco como após a cura do concreto.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2007, as fissuras não devem ultrapassar:

- 0,1 mm para peças não protegidas, em meio agressivo;
- 0,2 mm para peças não protegidas em meio não agressivo;
- 0,3 mm para peças protegidas (revestidas).

### **2.2.1 – Principais causas de fissuras**

São duas as principais causas.

#### **2.2.1.1 – Por retração**

Durante o processo de cura, há uma “perda” de água em função da hidratação do cimento e pela secagem superficial do concreto, devido à evaporação, provocando uma diminuição do volume contribuindo para o aparecimento de fissuras.

Outros fatores que podem contribuir com o aparecimento de fissuras, são: concreto muito rico em cimento, relação água/cimento muito alta.

#### **2.2.1.2 – Por variação de temperatura**

Quando uma peça de concreto está sujeita a variações de temperatura, sofre variações nas suas dimensões. Quando a temperatura aumenta, a tendência é se expandir e quando a temperatura diminui a tendência é encurtar.

Outros locais que sofrem este tipo de variação são as lajes de cobertura ou pavimentos de concreto como pátios, expostos permanentemente ao tempo. Nesses casos, há uma grande variação de temperatura entre a face superior e a face inferior, que pode gerar fissuras.

## 2.3 – Dosagem do concreto

Também conhecido por traço do concreto, o estudo de dosagem do concreto de cimento Portland é o procedimento necessário à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto. Tal proporção entre os materiais essenciais do concreto pode ser expressa em massa ou em volume, sendo que a proporção expressa em massa seca de materiais é preferível e sempre mais rigorosa (HELENE, 2005).

Segundo o mesmo autor os materiais que compõem os concretos que são utilizados num estudo de dosagem são: os diversos tipos de cimentos, agregados miúdos, agregados graúdos, a água, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras. Um estudo de dosagem sempre é realizado a fim de obter a mistura ideal e mais econômica para atender uma série de condições. Dependendo da complexidade do trabalho a ser realizado e do grau técnico e prático do usuário que executou o estudo, essa série será maior ou menor.

Traço é a proporção dos materiais construtivos do concreto, que estão definidos pela norma do DNIT 054/2004, podendo ser expressa em massa ou volume, e está representado pela Figura 1.

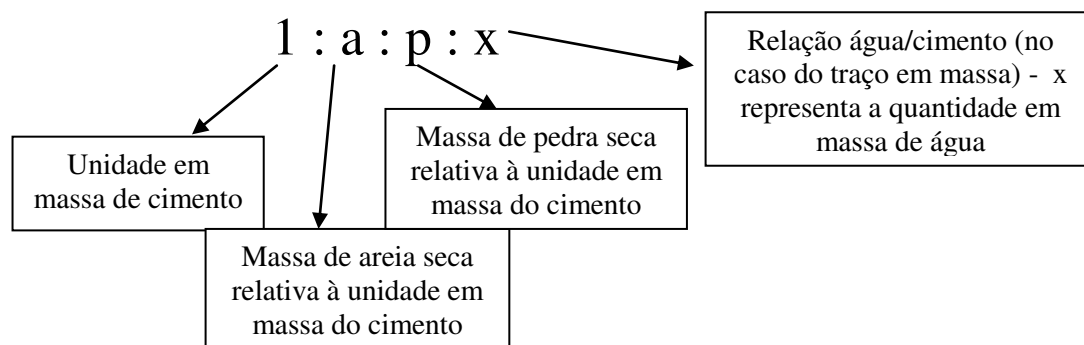


Figura 1 Representação esquemática do traço do concreto

Segundo Banduk (2005), a pasta de cimento Portland tem a função de envolver os agregados, promovendo a união entre eles, envolver as barras de aço e promover o acabamento das superfícies concretadas. Tanto os agregados graúdos quanto miúdos são utilizados a fim de

reduzir o custo final do concreto além de diminuir as variações de volume provocadas pela reação da pasta de cimento.

Ainda de acordo com esse autor, o concreto fresco apresenta as seguintes propriedades principais:

a) Segregação: ocorre quando há separação dos componentes de uma mistura heterogênea (perda de coesão). A exsudação é um tipo de segregação na qual parte da água da mistura tende a elevar-se até a superfície de um concreto recém-lançado, pois os componentes sólidos da mistura não possuem capacidade de retenção da água.

b) Consistência: será mais seca quanto menos consistente for o concreto, e mais fluída quanto mais consistente for o concreto. O principal fator que afeta a consistência do concreto é o teor água/mistura seca que vem a ser o acréscimo gradual de água que torna a mistura mais plástica, isto é, a quantidade de água não pode ultrapassar certo limite, pois a pasta se tornará tão fluída que irá se separar da mistura. Outro fator é a granulometria, utilizando-se as mesmas quantidades de cimento e água de uma mistura e variando apenas a proporção dos agregados, é possível perceber que o concreto fica mais plástico com o aumento na quantidade de brita. A forma do grão também influencia, as formas esféricas e cúbicas são escolhidas, pois exigem menos água para uma mesma consistência.

c) Trabalhabilidade: está diretamente ligada à consistência do concreto, pois há um empenho para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima de sua homogeneidade.

Existem dois tipos de dosagem: dosagem empírica e dosagem racional e experimental. A dosagem empírica do concreto é feita baseando-se em uma experiência anterior, portanto não leva a resultados confiáveis. Segundo a ABNT NBR 12655:2006, este método só pode ser empregado para o concreto da classe C10 (Tabela 3) com consumo mínimo de 300 kg de cimento por metro cúbico de concreto. A dosagem para concreto de classe C15 (Tabela 3) ou superior deve ser definida em racional e experimental. Para esta dosagem é necessário conhecer o local de execução da obra, tanto o canteiro quanto os materiais disponíveis, o projeto completo e os equipamentos que serão utilizados durante a produção do concreto.

A dosagem racional e experimental da mistura pode ser obtida a partir da determinação da resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de idade, adotada pelo projetista da obra. A classe do concreto é caracterizada de acordo com a resistência característica do concreto, conforme apontado na Tabela 3.

Tabela 3: Classes do concreto Fonte: Banduk (2005)

<b>Classe</b>	<b>C10</b>	<b>C15</b>	<b>C20</b>	<b>C25</b>	<b>C30</b>	<b>C35</b>	<b>C40</b>	<b>C45</b>	<b>C50</b>	<b>C55</b>	<b>C60</b>	<b>C70</b>	<b>C80</b>
<b>fck (Mpa)</b>	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80

Condições de preparo do concreto, de acordo com a norma da ABNT NBR 12655:2006:

- a) Condição A: aplicável para as classes C10 até C80. O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume e corrigida de acordo com a umidade dos agregados.
- b) Condição B: aplicável para as classes C10 até C20. O cimento é medido em massa, a água é medida em volume, bem como os agregados. A umidade do agregado miúdo é corrigida pelo menos três vezes durante a mesma concretagem e o volume é corrigido através da curva de inchamento.
- c) Condição C: aplicável somente aos concretos de classe C10 e C15. O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume e a água de amassamento também. A quantidade de água é corrigida em função da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto. Para esta condição é exigido o consumo mínimo de cimento de 350 kg por metro cúbico de concreto.

Após a determinação dos traços deve ser feito o diagrama de dosagem específico correspondente ao traço determinado, conforme exibido na figura 2. Com o diagrama feito, entra-se com a resistência do concreto desejada ou outra propriedade e obtém-se o traço otimizado.

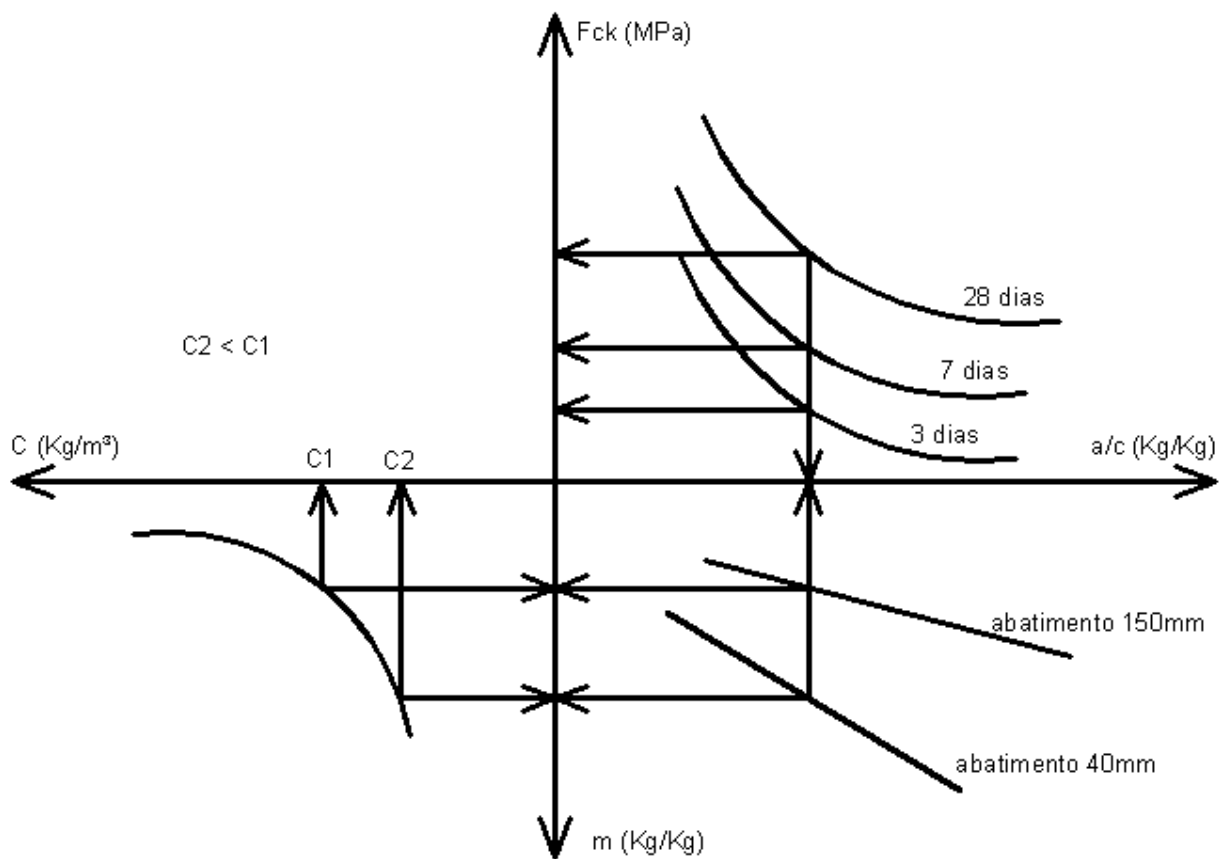


Figura 2 Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland

Fonte: Adaptado de ISAIA (2005)

onde:

$a$  = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

$a/c$  = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

$C$  = consumo de cimento por  $m^3$  de concreto compactado, em kg/m³;

$m = a + p$  : relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

De acordo com Helene (2005) a resistência mecânica do concreto é o parâmetro mais comumente especificado. A resistência à tração por flexão é muito comum em projetos de pavimentos de concreto, mas a resistência à compressão é a mais utilizada. Esta é utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle de qualidade do concreto, isto ocorre devido à relativa simplicidade do procedimento de moldagem de corpos-de-prova, do ensaio de compressão e o



fato da resistência à compressão ser um parâmetro compassivo às alterações de composição da mistura – o que permite modificações em outras propriedades do concreto.

A trabalhabilidade do concreto é uma variável que depende de fatores intrínsecos e extrínsecos do material, esta deve ser adequada a cada situação sendo um fator importante na determinação na dosagem do concreto. Os itens vêm definidos pelos projetos arquitetônicos e estruturais, pelas condições ambientais, pelos equipamentos a serem utilizados e pelas necessidades de acabamento. Os concretos devem ser coesos e viscosos, ou seja, para cada caso devem permitir serem transportados adequadamente até a sua posição final sem que haja segregação, variações de cor, exsudação, entre outros (HELENE, 2005).

### **2.3.1 Dosagem do concreto com fibras**

Segundo Figueiredo (2005) a dosagem do concreto com fibras deve iniciar-se com a determinação de um teor de argamassa adequado. Este teor deve ser significativamente superior ao do concreto simples, pois a fibra fica impregnada na argamassa do concreto. Quanto maior o consumo de fibras, maior será o teor de argamassa necessário para envolvê-las de maneira adequada. O aumento da área de molhagem exigirá um maior consumo de água para se obter o mesmo nível de abatimento de tronco de cone. Se não for utilizada esta alternativa, deve-se utilizar um aditivo plastificante, ou ainda aumentar o seu teor, caso já tenha sido utilizado o aditivo.

De acordo com o mesmo autor o requisito para definir a trabalhabilidade é a homogeneidade da distribuição das fibras no concreto. Ele só é trabalhável quando permite a perfeita dispersão das fibras em seu interior. Também é importante tomar cuidado durante o procedimento de mistura, a fibra deve ser adicionada de forma progressiva, para facilitar a sua dispersão. Na dosagem a fibra é adicionada de forma lenta quando a matriz do concreto já está homogeneizada e com boa fluidez, a fim de evitar que apareçam ouriços (Figura 3).



Figura 3: Formação de ouriços no concreto após a adição de fibras de celulose Fonte: Acervo Próprio (2007).

É importante ressaltar que nem tudo é vantagem no uso de fibras. Apesar de toda a tecnologia, o concreto reforçado com fibras possui limitações e até desvantagens. Por um lado a fibra diminui o quadro de fissuração do pavimento, mas por outro lado isto contribui para o aumento do risco de empenamento do pavimento por retração diferencial, para tanto, deve-se ter cuidados relativos à cura.

No caso de adição de fibras de aço, mesmo após a realização do acabamento superficial do pavimento, algumas fibras acabam ficando na superfície do pavimento, estando susceptíveis à corrosão, provocando o aparecimento de pontos de ferrugem, prejudicando a estética do pavimento. Além disso, se houver a necessidade da demolição do pavimento, haverá uma exigência de energia muito superior o que implica em um consumo de tempo maior.

Uma preocupação que existe quanto aos pavimentos de concreto reforçado com fibras de aço é o fato de algumas fibras aparecerem na superfície produzindo pequenos pontos de ferrugem. Adota-se um critério estético para evitar essa ocorrência, uma vez que as fibras oxidadas não são capazes de produzir a perfuração dos pneus. No entanto, são adotados abatimentos de tronco de cone relativamente elevados, ou seja, da ordem de 100 mm ou traços com teor de argamassa superior a 50% (CHODOUNSKY, 2009). Isto pode gerar um outro risco para o concreto que é o da segregação da fibra (CECCATO, 1998), cuja massa específica é cerca de três vezes maior que a do concreto. Com isto a fibra se afasta da superfície reduzindo o reforço nesta região e, conseqüentemente, pode facilitar o aparecimento de fissuras (FIGUEIREDO, 2000).

## **2.4 Execução de pavimento de concreto**

O processo de execução do pavimento de concreto com adição de fibras de aço é simplificado, devido a não ser necessário o posicionamento da armadura, pois as fibras não requerem o uso de espaçadores; tirando-se isso, o processo é igual ao de um pavimento comum.

O DNIT apresenta três especificações de serviço para sua execução: com equipamento de: pequeno porte, fôrma-trilho e fôrma-deslizante (DNIT 047/2004- ES; DNIT 048/2004- ES e DNIT 049/2009- ES, respectivamente).

Todas essas especificações salientam que o processo deve começar com a execução da fundação, ou seja, com o preparo do subleito e sub-base, com a finalidade de garantir a capacidade estrutural de projeto e, notadamente, a homogeneidade. Após o preparo do subleito, o mesmo deverá ser testado por meio de prova de carga para a determinação do coeficiente de recalque (k), conforme norma DNIT 055/2004 – ME. Esse controle também poderá ser feito através do ensaio da determinação da capacidade de suporte, usando-se curvas de correlação apropriadas (DNER-ME 049/94).

No preparo da sub-base, o material deve ser lançado e espalhado com equipamentos adequados, a fim de assegurar a sua homogeneidade.

Pode-se realizar o isolamento entre a placa e a sub-base, com a finalidade principal de reduzir-se o coeficiente de atrito entre ambas, com a utilização de um filme plástico (espessura mínima de 0,15 mm), (lonas pretas); nas regiões das emendas, deve-se promover uma superposição de pelo menos 20 cm.

As formas devem proporcionar linearidade que atenda ao projeto, sendo rígidas o suficiente para suportar as pressões laterais produzidas pelo concreto. Devem ser estruturadas para suportar os equipamentos de adensamento do tipo réguas vibratórias quando estas são empregadas. Caso não sejam deslizantes, a fixação das formas deve ser efetuada de maneira adequada.

As barras de transferência devem trabalhar com uma extremidade não aderida (metade deve estar engraxada), para permitir que nos movimentos contrativos da placa ela deslize no concreto, sem gerar tensões prejudiciais a este.

Os conjuntos de barras devem estar paralelos entre si, tanto no plano horizontal como no vertical, e concomitantemente ao eixo da placa. Nas juntas serradas, as barras de transferência deverão ser posicionadas exclusivamente com o auxílio de espaçadores, que deverão possuir dispositivos de fixação que garantam esse paralelismo.

O concreto deverá ser produzido em centrais do tipo gravimétrico, excetuando-se no caso de execução com equipamento de pequeno porte, quando é permitida também a utilização de betoneira estacionária.

As etapas de lançamento, adensamento e acabamento deverão ser realizadas normalmente, devendo-se sempre contratar empresas que possuam equipamentos adequados para a sua execução. Ressalta-se também um maior controle nas especificações de lançamento do concreto e na fase de acabamento final da superfície.

A cura do pavimento pode ser do tipo química ou úmida. No caso de cura química, deve ser aplicada imediatamente após ao acabamento podendo ser à base de PVA, acrílico ou

qualquer outro composto capaz de produzir um filme impermeável e que atenda a norma ASTM C 309:2011.

É necessário que o filme formado seja estável para garantir a cura adequada do concreto por pelo menos 7 dias. Caso isso não seja possível, deverá ser empregada complementarmente cura com água, com o auxílio de tecidos de cura ou filmes plásticos.

No caso da cura úmida deverão ser empregados tecidos de algodão (não tingidos) ou sintéticos, que deverão ser mantidos permanentemente úmidos pelo menos até que o concreto tenha alcançado 75% da sua resistência final.

Os filmes plásticos, transparentes ou opacos, popularmente conhecidos por lona preta, podem ser empregados como elementos de cura, mas que exigem maior cuidado com a superfície, visto que podem danificá-la na sua colocação. Além disso, por não ficarem firmemente aderidos ao concreto, formam uma câmara de vapor, que condensando pode provocar manchas no concreto.

Todo processo começa na central de concreto. As fibras são adicionadas diretamente na esteira junto com os agregados graúdos e areia, como se fossem um agregado metálico. Nesse caso, nunca se devem adicionar as fibras como primeiro componente. As fibras colocadas na esteira não devem ultrapassar a quantidade de 0,66 kg/s (40 kg/min), evitando-se assim a formação de ouriços no concreto.

No caso de adição no canteiro, as fibras também podem ser adicionadas diretamente dentro do caminhão-betoneira, devendo-se, porém aumentar o intervalo de lançamento das fibras para 1 kg/s (60 kg/min). A mistura no caminhão-betoneira segue as recomendações de um concreto convencional.

No caso de um elevado volume diário de lançamento de concreto, mais de 200 m<sup>3</sup> por ciclo de execução, opta-se pela utilização de um dosador automático, que além de aumentar a produtividade irá permitir a dosagem fracionada (ex.: 27 kg de fibras de aço/m<sup>3</sup> de concreto).

Figueiredo (2000) coloca as seguintes vantagens tecnológicas do uso de fibras de aço em pavimentos de concreto quando comparado ao uso das telas de aço soldadas:

- a) Como não há necessidade de colocação, como no caso das telas, economiza-se no tempo total de execução da obra e é necessário um menor número de operários para a execução dessa tecnologia;
- b) Como não há a necessidade de estocar a armadura, existe uma economia de espaço na obra;
- c) Não requer o uso de espaçadores como no caso das telas metálicas e, no caso de um concreto com consistência adequada e sem excesso de vibração, pode se garantir o reforço de toda a espessura de concreto do pavimento, o que não se consegue na utilização de telas metálicas, que muitas vezes são deslocadas com a passagem de carrinhos de mão, deixando a parte superior da placa sem reforço;
- d) As fibras também permitem o corte das juntas de dilatação, dispensando a colocação de barras de transferência. Além disso, como reforçam as bordas das juntas, minimizam a tendência ao lascamento nessas regiões;
- e) Não impedem o livre trânsito de pessoas e equipamentos, facilitando o acesso ao local da concretagem, podendo-se, em alguns casos, atingir o local de lançamento do concreto com o próprio caminhão betoneira;
- f) Não apresentam restrição quanto à mecanização da execução do pavimento.

Sabe-se que selecionar os materiais adequados, dosá-los utilizando-se de uma dosagem racional, com o acompanhamento de ensaios de laboratório, são meio caminho andado no sentido da qualidade, mas é imprescindível o acompanhamento de qualquer obra com um controle tecnológico e de qualidade eficiente e atuante. Os ensaios devem ser realizados por laboratórios idôneos e interpretados pelo responsável técnico da obra.

No capítulo 3 serão apresentados os tipos de fibras.

## **CAPITULO 3 – ADIÇÃO DE FIBRAS NO CONCRETO**

Conforme definido na NBR 7207: 1982, “o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.”.

A utilização de concreto de cimento Portland tem sido uma das alternativas para atender esses quesitos, cuja utilização tem crescido na área de pavimentação. No entanto, tem sido constante a busca por um melhor desempenho buscando, sobretudo a redução de ruído e também uma melhor aderência pneu-pavimento.

Em 2005, Vizzoni apresentou um trabalho em que ressaltava que depois de décadas, as estradas brasileiras voltavam a ser pavimentadas com o concreto de cimento Portland. Segundo esse autor, este material possui uma série de características que lhe garantem o posto de material estrutural mais usado no mundo. Apesar disso, tem uma série de limitações, por exemplo, a propensão ao surgimento de fissuras, principalmente quando utilizado em pavimentos. Uma das alternativas técnicas para contornar esse problema seria a adição de fibras (FIGUEIREDO, 2000; BOLPETTI, FORTES, 2007).

A idéia de se criar um material acrescentando-lhe algo que o torne mais resistente quando submetido à tração, evitando a formação de fissuras, não é nova. Há registros sobre essa técnica que remontam à antiguidade, onde os hebreus, no antigo Egito (3.200 A.C.) já utilizavam palha como reforço para o fabrico de tijolos (TANESI, 1999).

Mesmo na natureza, temos o exemplo do pássaro joão-de-barro, que é um pássaro pequeno, nativo da Argentina, Brasil, Chile, Bolívia e outros países sul-americanos. Ele se empenha

cuidadosamente na construção de ninhos de barro, reforçado com palha no topo das árvores. (METHA; MONTEIRO, 1994).

Segundo MANO (2001), os compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes, com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. Já o termo fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, de reduzida seção transversal e elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100), podendo ou não ser polimérico.

Do ponto de vista geral e simplificado, os compósitos são constituídos de três fases: a matriz cimentícia, as fibras de reforço e as zonas de transição fibras–matriz.

Desde o início do século XX e até há muito pouco tempo atrás, foi muito utilizada a mistura denominada cimento-amianto, formada por pasta de cimento Portland e fibras de amianto crisotila, para a fabricação de chapas, telhas e caixas d'água (SAVASTANO JÚNIOR et al., 1994). No entanto, por ser considerado cancerígeno este material é atualmente proibido em muitos países, inclusive no Brasil (lei 9.055/95). Em face desta proibição, as indústrias se viram obrigadas a buscar então novos componentes e tecnologia substitutivos para os produtos de fibrocimento.

Outros exemplos de compósitos muito difundidos são os plásticos reforçados com fibras de vidro para fabricação de telhas, gesso com reforço de fibras de sisal, barro com casca de coco, fibras de bambu, etc.

Vários tipos de fibras são hoje utilizados para a fabricação de tubos para drenagem, em concreto projetado para revestimento de túneis, aplicações em pisos industriais, painéis pré-fabricados para fachadas e mesmo em outras áreas como, por exemplo, a área farmacêutica e de alimentos.

De acordo com artigo publicado no jornal Vale Paraibano de 21/01/2004, a VCP (Votorantim Celulose e Papel), está dando um destino mais nobre para o resíduo de celulose, que antes era jogado fora. As fibras de celulose, antes enviadas em aterros industriais, estão sendo aproveitadas na produção de tijolos da Cerâmica Jacareí. Por dia, a Cerâmica Jacareí produz 100 toneladas de



massa, suficiente para produzir 20.000 tijolos. O material descartado pela VCP corresponde a 20% da matéria-prima empregada nos tijolos. Por um lado, a VCP deixou de desembolsar o valor do depósito nos aterros e por outro, a Cerâmica Jacareí deixou de extrair a argila correspondente e com a vantagem de produzir um tijolo mais resistente.

Datam da década de 1950 os primeiros estudos científicos sobre o comportamento das fibras de vidro e aço e as primeiras tentativas com fibras poliméricas foram realizadas em 1965 por Goldfein (BENTUR; MINDESS, 2002).

Ao introduzir estas fibras na matriz de concreto, elas funcionam como barreiras ao desenvolvimento das microfissuras. As fibras interceptam as fissuras, atuando como uma ponte de transferência de tensões. A ruptura do material ocorre por alongamento elástico ou plástico delas, por degradação da matriz de concreto na zona de transição fibra matriz, por deslizamento da fibra ou por ruptura (FIGUEIREDO, 2000).

Adicionar fibras à argamassa ou ao concreto é uma maneira de melhorar o seu desempenho quanto à resistência à flexão, ao impacto e à fadiga. Por ser um material de baixo custo, as fibras de asbesto ou amianto, como é mais conhecido, foram as primeiras a serem empregadas com a tecnologia do fibrocimento, principalmente para a construção civil.

A adição de fibras ao concreto é uma operação extremamente fácil e pode ser efetuada na própria obra ou em usinas. Atualmente existe uma vasta gama de fibras destinadas ao reforço do concreto, cuja classificação varia de acordo com a matéria prima com a qual são produzidas. Podem se classificar segundo sua natureza:

Metálicas: aço carbono, suas ligas e alumínio

Naturais: amianto, celulose e carbono

Sintéticas: nylon, polipropileno e outras

Quanto à sua geometria, podem ser curtas, longas, retas, onduladas, com gancho nas pontas, coladas em feixes, etc.

### **3.1 Considerações sobre o comportamento das fibras**

O concreto é constituído de cimento, agregado, aditivo e água. O procedimento para estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais estão na Norma DNIT 054/2004 - PRO. A resistência considerada na pavimentação é a da tração na flexão que apresenta valores bem menores que a resistência à compressão.

Em concretos armados com fibras, a ruptura pode ocorrer de vários modos, dependendo dos valores relativos das deformações da matriz e da fibra, da forma da fibra e da resistência de aderência desenvolvida na interface fibra-matriz.

Nos concretos reforçados com fibras, a ruptura se dá quase sempre por falência da aderência matriz x fibra. A primeira trinca ocorre quando a deformação excede a capacidade de deformação da matriz. Prosseguindo o carregamento, as fibras agem como elementos impeditivos do desenvolvimento das fissuras. (NORONHA – 1981)

De acordo com Figueiredo (1997), as fibras de aço quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade e porque as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material, mesmo quando utilizada em baixos teores.

De acordo com este autor (2005) os concretos com fibras são chamados de compósitos, ou seja, materiais constituídos de duas fases distintas principais. O concreto endurecido sem a presença de fibras já é considerado um compósito com apenas uma fase principal que é a pasta, os poros e os agregados.

O concreto com adição de fibras tem como fases principais o próprio concreto, chamado de matriz, e as fibras, que podem ser produzidas a partir de materiais diferentes, como aço, vidro, polipropileno, entre outras. As fibras são elementos descontínuos, onde o seu comprimento é bem maior que a maior dimensão de sua seção transversal.

As duas propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço em que a fibra pode proporcionar ao concreto é o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. Fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao concreto endurecido, são chamadas de fibras de baixo módulo, como as de polipropileno e náilon. Já as fibras de alto módulo são aquelas em que as fibras possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto.

O concreto apresenta baixa resistência à tração, com valores na ordem de 7% e 11% da resistência à compressão. Esse comportamento está associado às fissuras que se desenvolvem ou já estão presentes no concreto, que o prejudicam muito mais quando solicitado mais à tração do que à compressão.

Devido à sua reduzida capacidade de resistência à tração, o concreto apresenta maior dificuldade para interromper a propagação das fissuras quando é submetido a este tipo de tensão. Isto acontece devido à direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal de tensão. Portanto, logo que se principia o desenvolvimento de cada nova fissura, a área disponível para suportar a carga é reduzida causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras. Dessa maneira, a ruptura à tração é causada por algumas fissuras que se unem e não por numerosas fissuras, como ocorre quando o concreto é solicitado a esforços de compressão (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Associando-se este conceito à teoria de GRIFFITH (1920; apud FIGUEIREDO, 2000) que liga a ruptura do material a uma energia de superfície que deve ser formada, Figueiredo (2000) concluiu que, “por apresentar uma superfície total de ruptura menor, o gasto energético associado à ruptura por tração no concreto é também reduzido. Logo o trabalho de ponte de transferência de tensão que a fibra realiza através das fissuras no concreto é um mecanismo muito interessante de aumento da energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação de fissuras...”.

Na Tabela 4 são apresentados valores de diâmetro, densidade, módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação na ruptura de diversos tipos de fibras que podem ser adicionadas no concreto.

Tabela 4: Características mecânicas das fibras (BENTUR e MINDESS, 1990)

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	5-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	–	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	–	1,2	10	0,3-0,5	–
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	–	0,95	0,3	0,7x10 <sup>-3</sup>	10
Fibra de madeira	–	1,5	71	0,9	–
Sisal	10-50	1-50	–	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	–	2,50	10-45	3,7x10 <sup>-3</sup>	0,02

De acordo com esse quadro conclui-se que fibras de baixa resistência e baixo módulo de elasticidade só são eficientes quando a resistência e o módulo de elasticidade do concreto também são baixos, ou seja, no estado fresco e no início do processo de endurecimento.

É o que ocorre com as fibras de polipropileno e nylon que são utilizadas para o controle de fissuração plástica em pavimentos. Apesar de atuarem no sentido de minimizar o risco de fissuração plástica, essas fibras não dispensam a necessidade de realização de boa cura. No caso das fibras de aço, pelo fato de possuírem alta resistência e alto módulo de elasticidade atuam como um reforço do concreto já endurecido, em alguns casos substituindo a armadura convencional.

A fibra serve como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, desde que sejam adicionadas fibras de resistência e módulo adequado ao concreto em um teor apropriado, onde este deixará de possuir um comportamento frágil. As fibras se distribuem aleatoriamente no material, acabando por reforçar a peça de forma íntegra, e não só num determinado ponto (FIGUEIREDO, 2005).

A utilização de fibras também melhora a trabalhabilidade do concreto, pois altera sua consistência, esta não depende do material que compõe a fibra, pois o que afeta o comportamento do material no estado fresco é a geometria da fibra. Isto acontece porque ao se adicionar fibras, está se adicionando uma grande área superficial que drena a água de molhagem. Fibras de maior área superficial acarretarão uma maior quantidade de água o que produzirá um aumento de coesão e perda de mobilidade do compósito no estado fresco. Já, quanto menor o diâmetro da fibra maior será a sua influência na perda de fluidez da mistura.

O objetivo da adição de fibras ao concreto não altera especificamente a sua resistência à compressão, mas como as fibras funcionam como uma ponte de transferência de tensões pelas fissuras – sejam elas produzidas por esforços de tração ou cisalhamento como nos ensaios de compressão – o concreto também apresentará um ganho na resistência à compressão, da mesma forma haverá um aumento na resistência medida no ensaio de tração na flexão.

A fadiga é a ruptura de um material por esforço periódico, ocorrendo em um nível de tensão inferior ao determinado durante o ensaio estático. As fissuras tendem a se propagar a cada ciclo de carregamento trazendo uma diminuição da área útil para transferência de tensão, de modo que quanto mais próxima a carga estiver da resistência do material, menor será o número de ciclos necessários para atingir a ruptura do concreto. As fibras de elevada resistência acabam por reduzir a propagação de fissuras, aumentando a sua vida útil.

A adição de fibras não afeta a retração e a fluência. Como estes fenômenos estão associados ao movimento de fluídos dentro do concreto, a fibra representa pouca restrição quando não há fissuração no concreto. No entanto quando a retração é restringida, as fibras proporcionam um benefício no controle de fissuração. Independente do tipo de fibra utilizada no concreto, estas irão restringir a propagação de fissuras e reduzir a exsudação. Consequentemente tem-se um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos com aumento da durabilidade da estrutura. Assim, é natural que a estrutura apresente um desempenho superior com relação à durabilidade com a utilização de fibras em vez de armadura convencional.

Com a finalidade de minimizar as deficiências de concretos convencionais, cada vez mais, há o aumento da utilização dos concretos especiais, seja devido a este fato ou devido à incorporação de propriedades não essenciais a esse tipo de material. Os locais e as condições com que são empregados estes concretos especiais proporcionaram resultados satisfatórios, visto que a utilização do concreto usual nesses casos é insatisfatória (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

Afirmam ainda estes autores que vem crescendo o número de fibras poliméricas, em especial para combater a fissuração por retração do compósito. Apesar de o seu uso estar aumentando gradativamente, ainda não se possui uma visão técnica na área, o que reforça a necessidade de um desenvolvimento tecnológico e melhor estudo do material, o comportamento de um compósito depende do teor de fibras, do módulo de elasticidade, do comprimento e da aderência matriz-fibra. Quando o teor de fibras é baixo, a influência destas com relação à resistência à compressão e à tração do compósito é pouco verificada.

### **3.2 Fibras de celulose**

A celulose é um polímero de “cadeia longa” que é composto por um único monômero, carboidratado, classificado como polissacarídeo. É o componente estrutural primário das plantas e não é digerível pelo homem. Alguns animais podem digerir celulose com a ajuda de micro-organismos. É um material comum nas paredes celulares de plantas e é encontrado em combinação da lignina com qualquer hemicelulose. (MANO 2001)

A principal fonte de celulose é a madeira, que é constituída de uma estrutura com enchimento de lignina. A lignina é uma substância química que confere rigidez à parede da célula e, nas partes da madeira, age como um agente permanente de ligação entre as células, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e dobra.

No Brasil, a matéria prima utilizada para a produção da celulose provém principalmente de varias espécies arbóreas de eucaliptos e pinus.

Na primeira etapa dessa pesquisa foram utilizadas as fibras de celulose Arbocel ZZ8 – 1, cedidas pela empresa alemã Rettenmaier (Figura 4).



Figura 4: Fibras de celulose (arquivo pessoal)

### 3.3 Fibras de polipropileno

O polipropileno origina-se de uma resina termoplástica, produzida a partir do gás propileno que é um subproduto da refinação do petróleo. As fibras de polipropileno são compostas por macromoléculas lineares que possuem na sua cadeia entre 50 a 80% em peso de acrilonitrilo.

De acordo com Tanesi et al. (1997) as fibras de polipropileno têm a vantagem de ser quimicamente inertes em ambientes alcalinos, é compatível com misturas a base de cimento, apresentam superfície hidrófuga, não absorvendo a água de amassamento e são fabricadas em diversas geometrias (monofilamentos, feixes e filmes fibrilados).

Em comparação com as fibras de aço, sua massa específica é 8 vezes menor. O polipropileno tem elevada relação resistência/peso, boa resistência ao fissuramento, resiste a altas temperaturas, não apresentam problema de corrosão, tem a menor densidade entre os termoplásticos comuns, não absorve água, são mais flexíveis e tem baixo custo de produção e fácil processabilidade.

Na pesquisa, foram utilizadas as fibras de polipropileno Fibromac 12, cedidas pela Maccaferri (Figuras 5 e 6).



Figura 5: Fibromac 12 – (Fonte : arquivo pessoal)



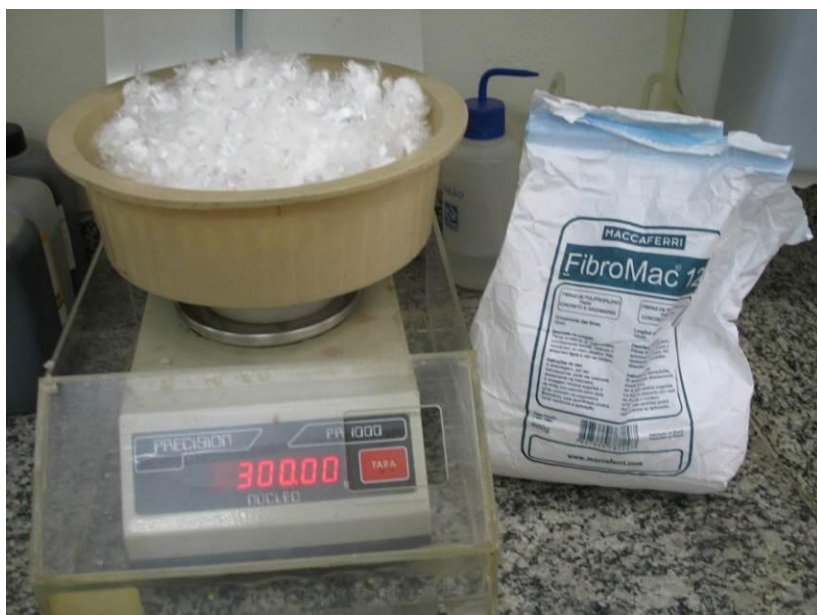


Figura 6: Fibromac 12 (Fonte : arquivo pessoal)

### 3.4 Fibras de aço

As fibras de aço são elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e mesmo de tipos de aço, dependendo do processo de fabricação. É um produto caracterizado geometricamente por uma das dimensões (comprimento) que prevalece sobre as outras (diâmetro, ancoragem), podendo apresentar superfície lisa ou corrugada, formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades. Têm comprimento que varia entre 30 e 60 mm. Fibras de seção transversal circular são produzidas a partir do corte de fios trefilados, enquanto as de seção retangular, a partir do corte de chapas de aço. Podem receber adicionalmente um revestimento superficial de zinco, a fim de garantir sua durabilidade no caso de aplicações em ambientes agressivos.

As fibras de aço são caracterizadas pelo fator de forma, por sua geometria e pela resistência à tração.

O fator de forma define a esbeltez da fibra. É a relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro equivalente:  $\lambda = L / D$ . Quanto maior for o  $\lambda$ , mais leve será a fibra, consequentemente

ter-se-á um maior número de fibras por unidade de massa. A resistência à tração, expressa em N/mm<sup>2</sup> ou MPa, é calculada dividindo o esforço necessário para a ruptura, pela área da seção da fibra.

A geometria da fibra influencia de forma significativa a ductilidade dos compósitos e na a resistência ao arrancamento. Estudos realizados comprovam que as fibras com ancoragens em ganchos nas extremidades, proporcionam aos compósitos, maiores níveis de ductilidade à flexão, aumentando a tenacidade do compósito. A ductilidade de uma fibra é avaliada através de ensaios de dobramento alternado. Este parâmetro pode ser utilizado no dimensionamento, permitindo quantificar a contribuição das fibras de aço no comportamento pós fissuração dos concretos (Reis, 2003; Nunes, 2006).

Segundo ainda esses autores, as fibras de aço são mais eficientes do que outros tipos de fibras, graças à sua alta resistência à tração, maior modulo de elasticidade e grande capacidade de aderência à matriz que a envolve.

Na Figura 7 a seguir estão apresentados vários tipos de formatos.

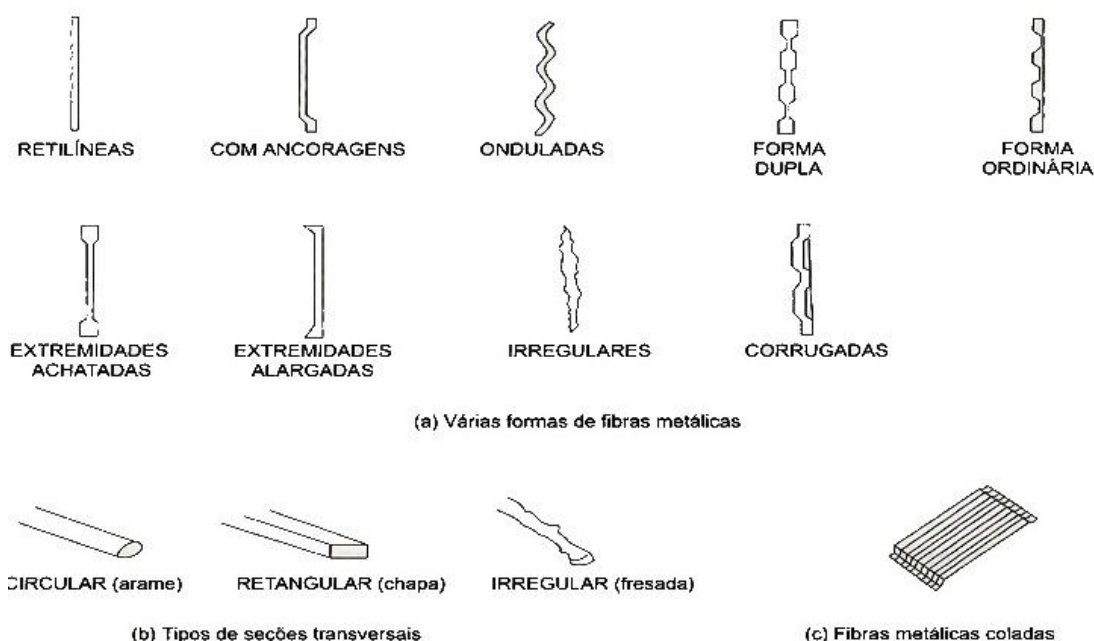


Figura 7: Fibras de aço (Fonte : Maccaferri)

Bilodeau et al. (2011) relataram uma pesquisa em que utilizaram dois diferentes teores de fibras de aço:  $20 \text{ kg/m}^3$  e  $30 \text{ kg/m}^3$  de concreto. A fibra escolhida possuía comprimento igual a 6 cm e 0,75 mm de diâmetro, da marca Dramix 80/60 BN (Figura 8), sendo que essas fibras foram adicionadas no final do processo de mistura e não foram consideradas na dosagem.



Figura 8 Fibra de aço com ancoragem (Bilodeau et al., 2011)

O concreto reforçado com fibras de aço já vem sendo empregado há muitos anos no Brasil. A utilização de fibras de aço em concreto para pisos, pavimentos e radiers, tem crescido muito ultimamente, em virtude da facilidade de sua aplicação na mistura, que pode ser processada tanto em usina como na própria obra, com o uso de betoneiras.

No Brasil são comercializados alguns tipos de fibras de aço. A fibra de aço corrugada (vide Figura 7) é recomendada quando se quer melhorar a aderência da fibra com a matriz. Tem como vantagens principais o baixo custo e a pouca ou nenhuma interferência na consistência do concreto.

Existem também as fibras com seção quadrada e ancoragem, conforme ilustrada nas Figuras 8 e 9, que possui um importante papel no reforço do concreto. Finalmente são oferecidas no mercado as fibras de forma circular, que são produzidas a partir de fios trefilados progressivamente até se chegar ao diâmetro desejado. Com isto, acabam por apresentar uma maior resistência mecânica (dado o seu encruamento), a qual pode ser ainda maior quando da utilização de aços com maior teor de carbono (FIGUEIREDO, 2000).

Pelo exposto anteriormente, nessa pesquisa adotou-se a utilização das fibras com ancoragens, conforme ilustrado na Figura 9

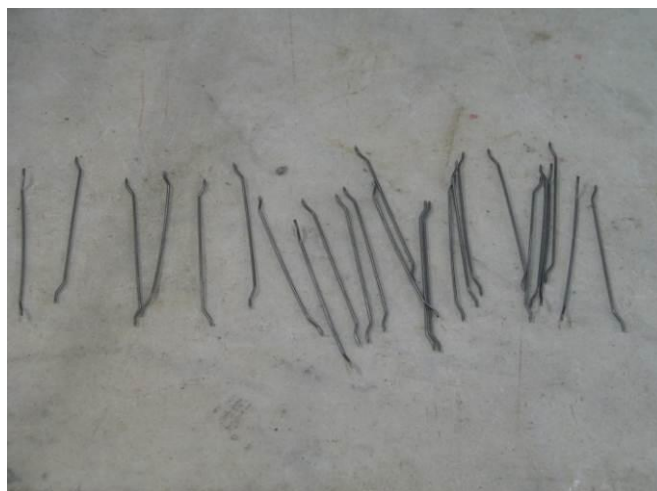


Figura 9 Fibras de aço Wirand FF3 – (Fonte : arquivo pessoal)

Com o objetivo principal de desenvolver, ensaiar e validar o pavimento de concreto reforçado com adição de fibras de aço, utilizando a técnica do concreto compactado com rolo (CCR), priorizando a sustentabilidade, com o uso de materiais recicláveis para redução dos custos de construção em 10 a 20%, tempo de construção em 15% e o consumo de energia em mais de 40% foi criado o EcoLanes (Economical and sustainable pavement infrastructure for surface transport). Este projeto de três anos foi financiado pelo Programa da União Europeia e teve início em outubro de 2006 e terminou em 2009. O consórcio do projeto composto por onze parceiros europeus de seis países foi coordenado pela Universidade de Sheffield. (PILAKOUTAS, 2010).

Park; Jung and Choi (2011) apresentaram um estudo para verificar o desempenho do concreto com adição de micro e macro fibras e concluíram que o CRFA com macro fibra apresentou um aumento significativo de sua resistência à tração, o mesmo ocorrendo com o aumento do teor de fibras.

No capítulo 4 será apresentado o controle tecnológico e de qualidade do pavimento de concreto.

## **CAPITULO 4 – CONTROLE TECNOLÓGICO E DE QUALIDADE NO PAVIMENTO DE CONCRETO**

O controle tecnológico e de qualidade do pavimento de concreto é a chave para o sucesso dessa tecnologia, assim como de todas as outras.

A ABRATEC (2005) apresenta o diagrama de serviços de controle tecnológico em centrais e materiais para os componentes do concreto e para os ensaios da obra (Figura 10).

O controle tecnológico de concreto abrange três etapas:

- Controle dos materiais constituintes e da produção;
- Controle do concreto fresco;
- Controle do concreto endurecido.

### **4.1 Etapas de Execução do Concreto e do Controle Tecnológico durante o preparo e Produção.**

Caracterização dos Materiais Componentes do Concreto – Controle dos Materiais: Os ensaios para recebimento, controle tecnológico e caracterização do cimento, agregados, água de amassamento, adições e aditivos devem ser executados atendendo-se a norma ABNT NBR 12654:1992 Versão Corrigida:2000.

#### **4.1.1 Ensaios de Controle Tecnológico do Cimento**

O controle tecnológico para recebimento do cimento Portland pode ser executado através de ensaios físicos e químicos, exigidos para cada tipo e devem atender os requisitos da respectiva norma conforme o tipo de cimento. No caso da presente pesquisa, foi utilizada a norma ABNT NBR 11578:1991 para os cimentos resistentes aos sulfatos, identificados pela sigla RS em sua embalagem e para os cimentos compostos CP II-E, CP II-Z e CP II-F.

Na Figura 10 é apresentado o diagrama de serviços de controle tecnológico em centrais e materiais componentes do concreto.

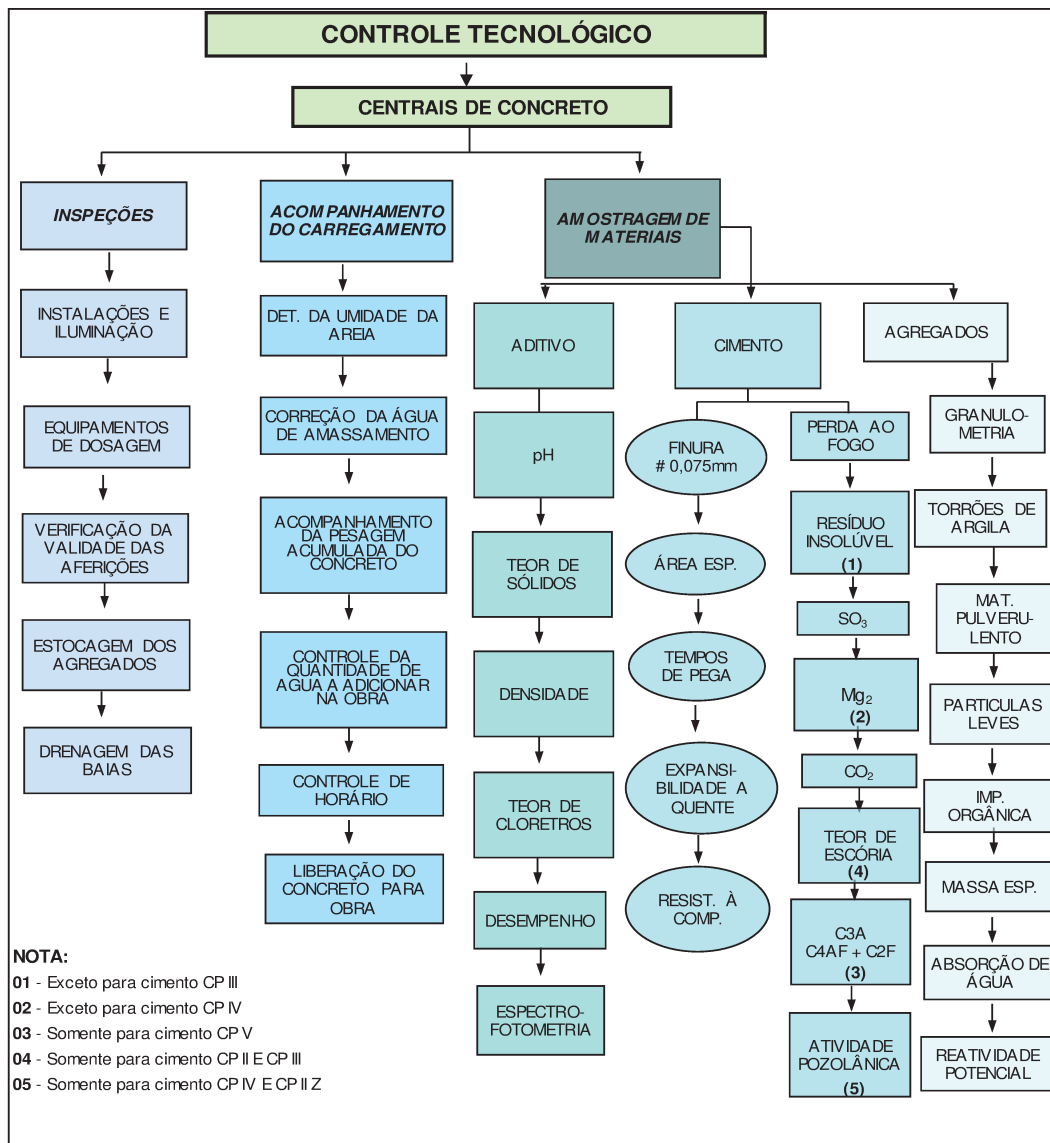


Figura 10 Diagrama de serviços de controle tecnológico em centrais e materiais Componentes do concreto (ABRATEC, 2005)



#### **4.1.2 Ensaio de Controle Tecnológico de Agregados**

A ABNT NBR 12654:1992 Versão Corrigida:2000 define em seus procedimentos o controle tecnológico dos agregados em ensaios de qualificação cujos parâmetros a serem atendidos são definidos pela ABNT NBR 7211/2009 e, em ensaios de recebimento.

#### **4.1.3 Ensaio de Controle Tecnológico de Água de Amassamento do Concreto**

Os requisitos estão estipulados na ABNT NBR 15900-1:2009 Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos, a periodicidade pode ser a cada 6 meses ou sempre que houver suspeitas sobre a qualidade da água fornecida.

#### **4.1.4 Ensaios de Controle Tecnológico de Aditivos**

Durante o estudo de dosagem, fase em que se define o tipo de dosagem de aditivos para melhorar o desempenho do concreto fresco e do concreto endurecido recomenda-se a execução de ensaios para controle de qualidade e de recebimento dos produtos conforme preconizado na ABNT NBR 10908:2008. Variações destes parâmetros (pH, teor de sólidos e massa específica) podem perturbar as características do traço de concreto nas primeiras idades (tempo de pega, endurecimento e resistência inicial).

Outros ensaios para avaliar a qualidade dos aditivos podem ser exigidos para atendimento da ABNT NBR 11768:2011 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos e ABNT NBR 12317:1992 Verificação de desempenho de aditivos para concreto - Procedimento. Normalmente, estes dois processos são recomendados para qualificar produtos e em testes comparativos de desempenho.

Outra informação importante é evitar que a parte sólida do aditivo seja descartada para regiões inferiores do reservatório ou da própria embalagem, para tanto, antes do uso, o produto deve ser agitado, conforme orientações do fabricante, o ensaio de densidade facilita este controle.



#### **4.1.5 Ensaios de Controle Tecnológico de Adições Minerais no Concreto**

Consideram-se adições minerais os materiais de natureza hidráulica latente tais como a sílica ativa, a escória granulada de alto forno, metacaulin, pozolanas naturais e artificiais, e os produtos inertes tais como os pigmentos destinados a colorir o concreto.

Para os materiais de natureza hidráulica latente, o desempenho pode ser avaliado através de ensaios para determinar o índice de atividade pozolânica com o cimento Portland, conforme ABNT NBR 5752:1992 Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.

Ensaios comparativos entre traço de referência sem adição e outros com adições, para verificação das propriedades do concreto fresco e endurecido, bem como a compatibilidade, também podem ser recomendados.

#### **4.1.6 Controle Tecnológico da Produção do Concreto**

Este procedimento é muito bem definido na ABNT NBR 12655:2006.

Existem duas modalidades de preparo do concreto:

- Concreto preparado pelo executante da obra ;
- Concreto preparado por empresa de serviços de concretagem. Segundo a ABNT NBR 7212:1984 Execução de concreto dosado em central, a mesma assume a responsabilidade pelo serviço e deve cumprir as prescrições relativas às etapas de execução que compreendem desde a caracterização dos materiais componentes do concreto até o local de entrega, conforme contrato de fornecimento.

##### **a) Controle Tecnológico do Concreto Preparado Pelo Executante da Obra**

A aceitação do concreto fresco se faz pelo ensaio de consistência através da medida do abatimento quando:

- Na primeira amassada do dia;
- Quando ocorrer alterações na umidade dos agregados;
- Na moldagem dos corpos de prova;

- Na troca da equipe de operadores no preparo do concreto;
- Paralisação e reinício da concretagem por período de pelo menos duas horas.

Rotineiramente, este tipo de controle tecnológico é exercido por um auxiliar de laboratorista experiente que, também acompanha a medida dos materiais componentes do traço de concreto.

#### b) Controle Tecnológico do concreto Preparado por Empresa de Serviços de Concretagem

O Controle na central é executado por um laboratorista experiente e mediante procedimentos básicos:

- Tomada de conhecimento do traço de concreto a ser fornecido, verificando as características do concreto (abatimento, fck ou outra especificação de resistência mecânica, consumo dos materiais componentes da dosagem para 1 m<sup>3</sup>, nome e endereço do local de entrega), normalmente, estas informações são fornecidas previamente à data da concretagem, inclusive de qual central será efetuado o fornecimento;
- Acompanhamento ou solicitação da determinação do teor de umidade dos agregados miúdos para correção da água de amassamento da mistura e medida do abatimento nos primeiros carregamentos;
- Vistoria e inspeção dos caminhões betoneiras para avaliação da limpeza e desgaste dos misturadores de betoneiras (facas) que devem estar em boas condições, caso contrário a mistura pode ficar heterogênea, dificultando o lançamento do concreto fresco;
- Verificação da data de aferição/calibração e validade com relação aos equipamentos de pesagem e medição de materiais componentes do concreto;
- Verificação das condições de estocagem dos agregados visualmente é constatada se não há contaminações entre os agregados e drenagem das baias de armazenamento;
- Acompanhamento da pesagem do carregamento do traço do concreto, conferindo e registrando horários de início de mistura, da saída da central, volume de carregamento da água adicionada na central e da água retida para adição em obra, se no caso o abatimento estiver fora da faixa especificada para o lançamento, respeitando as diretrizes da ABNT NBR 7212:1984 Execução de concreto dosado em central.

O acompanhamento na central controla a produção e o fornecimento do concreto, no verso do documento de entrega está carimbado um protocolo informando todas as características do carregamento.

Quando este tipo de serviço de controle tecnológico é contratado, no ato do recebimento do concreto é verificado o protocolo no verso do documento de entrega, que permite saber a quantidade de água que foi adicionada à mistura e os horários, facilitando estimar com segurança o tempo de descarga.

Este serviço é recomendado para acompanhar concretagens especiais e de grande volume ou quando há suspeitas entre o volume entregue com relação ao volume comprado, e nas características do traço. Um relatório de acompanhamento é emitido no término do serviço.

### **Estudo de Dosagem do Concreto**

Para classe de resistência C15 ou superior, a composição a ser utilizada na obra deve ser definida, em dosagem racional ou experimental, com a devida antecedência à execução das concretagens.

Para classe de resistência C10, o consumo mínimo para traço definido empiricamente, é de 300 kg/m<sup>3</sup> (6 sacos de 50 kg).

### **Cálculo de Resistência da Dosagem**

É dado pela equação

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times s_d \quad (1)$$

Onde:

- $f_{cj}$  = resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de “j” dias em MPa;
- $f_{ck}$  = resistência característica à compressão, em MPa;
- $s_d$  = desvio padrão da dosagem, em MPa;

## **Condições de Preparo do Concreto**

O cálculo da resistência de dosagem depende da condição de preparo do concreto:

- **Condição A** Para concretos de classe C10 até C80. O cimento e agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados;
- **Condição B** Para concretos de classe C10 até C25. O cimento é medido em massa, a água é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume (padiolas);  
  
Para concretos de classe C10 até C20. O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume com dispositivo dosador e os agregados medidos em volume, a umidade da areia é determinada pelo menos 3 (três) vezes durante o serviço do mesmo turno e seu volume é corrigido pela curva de inchamento.
- **Condição C** Aplicáveis apenas a concretos de classe C10 e C15. O cimento é medido em massa, os agregados em volume, a água de amassamento é medida em volume estimando a umidade da areia pela determinação do abatimento do concreto.

Desvio Padrão (sd) para cada condição de preparo:

- **Condição A** = 4,0 MPa;
- **Condição B** = 5,5 MPa;
- **Condição C** = 7,0 MPa

Nota: Em nenhuma condição, mesmo para concreto com desvio padrão conhecido, o valor do desvio padrão (sd) adotado pode ser menor que 2,0 MPa.

## **4.2 Ensaio de Controle de Aceitação**

São serviços para proceder à aceitação na obra do concreto fresco, independente da modalidade de preparo.

No ato do recebimento, após verificar e conferir no documento de entrega do concreto, as características solicitadas e contratadas deve ser realizada para cada tipo de concretagem a execução dos seguintes ensaios de recebimento:

#### **4.2.1 Ensaio do Concreto Fresco**

- Amostragem do concreto fresco conforme ABNT NBR NM 33:1998;
- Medida da consistência do concreto fresco pelo ensaio de abatimento – “slump test” conforme ABNT NBR NM 67:1998;
- *Para concreto preparado na obra:*
  - Na primeira massada do dia;
  - Sempre que houver alteração na umidade da areia;
  - Intervalo entre concretagens superior a duas horas;
  - Na troca de operadores no preparo do concreto;
  - Quando forem moldados corpos de prova.
- *Para concreto fornecido por empresas prestadoras de serviços de concretagens:*
  - Em todas as betoneiras.
- Moldagem dos corpos de prova conforme ABNT NBR 5738:2003 e atendendo os procedimentos da ABNT NBR 7212:1984 para amostragem do concreto para moldagem dos corpos de prova.

Os ensaios para determinação do tempo de pega do concreto e do índice de exsudação podem ser executados em obra, quando o objetivo for comparar os resultados entre os obtidos na obra com os do laboratório.

Para concreto auto adensável, a consistência da mistura fresca pode ser executada pelo espalhamento na mesa de Graff, - NBR NM 68:1998.

#### **4.2.2 Controle Tecnológico do Concreto Endurecido**

São ensaios realizados em corpos de prova moldados durante a concretagem onde os resultados obtidos servem para definir a aceitação ou rejeição do lote de concreto controlado.

A determinação da resistência à compressão simples pela ABNT NBR 5739:2007, em corpos de prova de concreto moldados durante a concretagem, atestando o  $f_{ck}$  (resistência característica do concreto à compressão) com o  $f_{ck}$  especificado. É o ensaio mais usual no serviço de controle tecnológico.

### Resistência do concreto

A inspeção do concreto é feita, normalmente, pela verificação da sua resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos, confeccionados e curados conforme a ABNT NBR 5738:2003, e ensaiados conforme a ABNT NBR 12142:2010.

Nos casos em que a especificação da obra assim o determine, ou quando tenha sido estabelecida através de ensaios, para o concreto em questão, uma correlação confiável, a critério da fiscalização, entre as resistências à tração na flexão e a compressão simples, a inspeção pode ser feita através da medida desta última característica do concreto.

Os lotes onde se dará a inspeção do concreto não devem ter mais de 500 m<sup>3</sup>, nem corresponder à área pavimentada com mais de 2500 m<sup>2</sup>.

A cada lote de concreto corresponde uma amostra com 32 exemplares, retirados de maneira que a amostra seja representativa do lote todo e que cada exemplar por sua vez, represente um número inteiro de placas do pavimento, sendo cada exemplar composto por dois corpos de prova da mesma amassada e moldados no mesmo ato, tomando como resistência do exemplar o maior dos dois valores de resistência obtidos no ensaio.

O valor estimado da resistência característica do concreto é dado por uma das seguintes expressões, dependendo do caso:

$$f_{ctM,est} = \bar{f}_{ctM,j} - 0,84 s \quad (2)$$

$$f_{ck,est} = \bar{f}_{ck,j} - 0,84 s \quad (3)$$

Onde:

- $f_{ctM,est}$  = resistência característica estimada do concreto à tração na flexão;
- $f_{ctM, j}$  = resistência média do concreto da amostra à tração na flexão, na idade de j dias;
- $f_{ck,est}$  = resistência característica estimada do concreto à compressão;
- $f_{cj}$  = resistência média do concreto da amostra à compressão, na idade de j dias;
- $s$  = desvio padrão da resistência média da amostra, à tração na flexão ou à compressão (conforme o caso).

Calculam-se:

$$f_{ctM,j} \text{ ou } \overline{f_{cj}} = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{n-1} + f_n}{n} \quad .(4)$$

$$s = \left[ \frac{\sum (f_{cj} - \overline{f})^2}{n - 1} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Onde:

- $f, f_1, f_2 \dots f_{n-1}, f_n$  = resistência de um determinado exemplar;
- $n$  = número de exemplares igual a 32.

Nos casos em que não forem obedecidos os critérios para a aceitação do lote quanto à resistência, a fiscalização faz extrair, às expensas do construtor, uma amostra de, no mínimo, seis testemunhos prismáticos ou cilíndricos (conforme o caso), que correspondem a um máximo de 100 m<sup>3</sup> de concreto ou a um máximo de 500 m<sup>2</sup> de área pavimentada, sendo a sua extração, preparo e ensaio efetuados conforme a ABNT NBR 7680:2007, onde aplicável a

pavimentos, no caso de testemunhos cilíndricos, e conforme a ASTM C 42:2010 até a publicação de norma brasileira a respeito da matéria, no caso de testemunhos prismáticos.

A resistência característica estimada de cada amostra obtida conforme o parágrafo acima é dada pela expressão correspondente ao caso:

$$fctM_{est} = fctM_j - ts \quad (6)$$

$$fck_{est} = fc_j - ts \quad (7)$$

Onde os símbolos têm os mesmos significados já descritos, e  $t$  é um parâmetro estatístico que permite, para um número de testemunhos menor do que 32 e os respectivos graus de liberdade, manter o mesmo nível de confiança de 80% adotados, e tem os valores da Tabela 5.

O valor estimado da resistência característica calculado na seção anterior deve ser aumentado de 10% ou 15%, conforme o número de corpos de prova seja respectivamente, de até 17 ou de pelo menos 18, em virtude de se tratar da resistência do concreto na própria estrutura.

Tabela 5 valores de  $t$  para o nível de confiança de 80%

$\eta$	$v$	$t_{0,80}$
30	29	0,854
25	24	0,857
20	19	0,861
18	17	0,863
15	14	0,868
12	11	0,876
10	9	0,883
9	8	0,889
8	7	0,896
7	6	0,906
6	5	0,920



## Espessura

Deve ser verificada por medição direta da altura de testemunhos cilíndricos extraídos das placas de concreto ou por meio de medidas topográficas altimétricas.

O lote onde se faz a verificação de espessura das placas de concreto não deve ser maior do que 500 m<sup>3</sup> de concreto, nem corresponder a mais de 2500 m<sup>2</sup> de área pavimentada.

Cada lote é composto por uma amostra de, no mínimo, seis testemunhos cilíndricos, extraídos do pavimento conforme a ABNT NBR 7680:2007, de pontos estabelecidos pela fiscalização, ou seis medidas topográficas altimétricas de pontos contidos no lote e determinados pela fiscalização.

A espessura média das placas de concreto do lote inspecionado será calculada por:

$$h_m = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n}{n} \quad (8)$$

Onde:

- $h_m$  = espessura média das placas de concreto do lote inspecionado;
- $h_1, h_2, \dots$ , = espessuras dos testemunhos números 1, 2 ...;
- $n$  = número de testemunhos, igual ou maior do que seis.

## *Não Conformidade*

Caso seja constatada a continuidade da existência da não conformidade para a estrutura ou parte dela, adotar as seguintes alternativas:

- a) Determinar as restrições de uso da estrutura do pavimento;
- b) Demolir a estrutura do pavimento.

### **4.3 Aceitação ou rejeição do lote de concreto controlado**

O procedimento para aceitar ou rejeitar um lote de concreto deve ser o que está proposto nas normas ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 12655:2006, entretanto, outros requisitos específicos podem ser exigidos, tais como:

- Massa específica no estado fresco e no endurecido, para concreto leve ou pesado;
- Teor de ar incorporado para concreto preparado com aditivo incorporador de ar;
- Parâmetros de durabilidade para concreto em contato com meios agressivos;
- Índice de tenacidade para concreto reforçado com fibras;
- Outras exigências;

A aceitação é automática quando todos os requisitos especificados são atendidos, comprovadamente por ensaios em laboratório ou em campo.

Aceitação não automática ocorre pela existência de não conformidades, nesta situação, ações corretivas serão adotadas para solucionar a anomalia. A ABNT NBR 6118:2007 estabelece os procedimentos para implantar as ações corretivas.

### **4.4 Qualificação de laboratórios de controle tecnológico**

Os laboratórios devem ter a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 Versão Corrigida 2:2006 implementada e serem acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO e terem seus equipamentos calibrados/aferidos por empresas que façam parte da Rede Brasileira de Calibração - RBC.

Outros detalhes a serem considerados são: a qualificação da equipe para executar os serviços contratados, as instalações apropriadas, equipamentos especificados pelas normas para os ensaios solicitados, atestados emitidos por empresas idôneas acervados, referente a empreendimentos e serviços semelhantes aos que devem ser contratados (FORTES et al., 2003).

No capítulo 5 está descrita a parte experimental.

## **CAPITULO 5 - PARTE EXPERIMENTAL**

Neste capítulo será detalhada a parte experimental realizada para este trabalho no laboratório. A presente pesquisa foi realizada em duas etapas. Na primeira efetuou-se um estudo do comportamento do concreto de cimento Portland com adição de três diferentes tipos de fibras: aço, celulose e polipropileno.

Pelo fato da utilização de fibras de aço terem apresentado melhor comportamento quanto à resistência à tração na flexão, na segunda etapa estudou-se a influência de diferentes dosagens de fibras de aço no concreto.

Em ambas as etapas foi avaliado o comportamento do CCP com adição de fibras quanto às propriedades do concreto fresco e quanto às resistências: à compressão (ABNT NBR 5739:2007); à tração na flexão (ABNT NBR 12142:1991 e ASTM C1018:1994); à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:1994). Também foram determinados os módulos estáticos de elasticidade e de deformação – curva de tensão-deformação (ABNT NBR 8522:2008) e determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT NBR 8802:1994).

### **5.1 Dosagem preliminar dos materiais, utilizando-se fibras de aço, de celulose e polipropileno**

O estudo de dosagem experimental foi desenvolvido atendendo-se a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 12821:2009 – Preparação de concreto em laboratório - Procedimento.

Inicialmente foi realizado um estudo com adição de três tipos de fibras: de aço, de celulose e de polipropileno. Para cada tipo de fibra foram realizadas moldagens com duas porcentagens. Essa pesquisa preliminar serviu para verificar o desempenho de cada tipo de fibra e escolher a que apresentasse o melhor desempenho para a pavimentação. As fibras foram incorporadas no final da mistura e não foram consideradas para efeito de dosagem.

Foram executados 7 traços de acordo com a seguinte programação:

- 1 traço piloto sem nenhuma fibra
- 1 traço com  $35 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço
- 1 traço com  $45 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço
- 1 traço com  $2 \text{ kg/m}^3$  de fibras de celulose
- 1 traço com  $4 \text{ kg/m}^3$  de fibras de celulose
- 1 traço com  $2 \text{ kg/m}^3$  de fibras de polipropileno
- 1 traço com  $4 \text{ kg/m}^3$  de fibras de polipropileno

Todos os traços usados foram estabelecidos com os mesmos percentuais de cimento, areia, pedra britada e água, alterando somente o tipo e a quantidade de fibras. O traço escolhido foi 1: 2,060 : 2,940 : 0,48, (cimento : areia : brita : água) em peso e 0,5 % sobre o peso do cimento, de aditivo, por ser um traço piloto, com resistência a tração na flexão prevista maior que 4,5 MPa, que é a resistência mínima recomendada pelo ET 97 (PITTA, 1998).

### **5.1.1 Caracterização dos materiais**

Para a realização desses ensaios foram selecionados os seguintes materiais: cimento Votoran CPII E32, pedra britada de base calcária e areia lavada da região de Jacareí/SP. Foram escolhidos três tipos de fibras: de aço (Wirand FF3, da Maccaferri), de polipropileno (Fibromac 12, da Maccaferri) e de celulose (Arbocel ZZ8-1, da Rettenmaier). O aditivo usado foi o Hiperplastificante para concreto, Adiment Premium da Vedacit.

A escolha do tipo de fibra a ser utilizado, seguiu a recomendação do fabricante.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

A fibra de aço escolhida consiste de uma fibra inorgânica, no formato de fio, de aço de baixo teor de carbono, trefilada a frio (Figura 12). Apresenta as seguintes características geométricas: 50 mm de comprimento, 0,75 mm de diâmetro, fator de forma de 67 (L/d) e 5.710 fibras por quilo. Segundo o fabricante, a resistência à tração é de 1.200 MPa. (Figura 11).



Figura 11 Fibras de aço

As fibras de polipropileno utilizadas nos ensaios caracterizam-se como fibras inorgânicas, produzidas a partir do multifilamento de polipropileno virgem, com comprimento de 12 mm, diâmetro de 0,02 mm e com 180.000.000 de fibras por m<sup>3</sup>. Segundo o fabricante, a resistência à tração é de 320 a 400 Mpa (Figura 12).



Figura 12 Fibras de polipropileno

A fibra de celulose escolhida caracteriza-se como uma fibra orgânica de origem vegetal, com comprimento médio de 1100  $\mu$ m e massa específica de 30 quilos por m<sup>3</sup> (Figura 13).



Figura 13 Fibras de celulose

Em todos os ensaios, usou-se o mesmo aditivo hiperplastificante para concreto, com o objetivo de reduzir a relação água/cimento na mistura (Figura 14).



Figura 14 Aditivo hiperplastificante para concreto

Uma vez selecionados todos os materiais necessários aos ensaios, foi estabelecido um traço piloto, a partir do qual se variou somente o tipo e quantidade de fibras conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 Quantidade de fibra utilizada

Traços	Tipo de Fibra	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (L)
A	Nenhuma	0	0
B	Aço	35	4,4
C	Aço	45	5,7
D	Polipropileno	2	2,2
G	Polipropileno	4	4,4
E	Celulose	2	66,6
F	Celulose	4	133,3

O traço piloto, escolhido em função da literatura sobre o assunto, foi o seguinte: 1:2,060:2,940 :0,48 (cimento: areia: brita: água) em peso e 0,5% de aditivo plastificante sobre o peso do cimento. O consumo de cimento foi de 381 kg/m<sup>3</sup>.

As massas específicas dos materiais estão na Tabela 7:

Tabela 7 Massas específicas dos materiais

Material	Massa específica
Cimento	3,077 kg/L
Areia de Jacareí	2.618 kg/m <sup>3</sup>
Brita calcária	2.857 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo	1.090 kg/m <sup>3</sup>
Fibra de Aço	7.850 kg/m <sup>3</sup>
Fibra de Polipropileno	900 kg/m <sup>3</sup>
Fibra de Celulose	30 kg/m <sup>3</sup>
Aditivo	1,09 kg/L

Todos os traços foram iguais ao traço matriz, variando somente a quantidade de fibras.

### 5.1.2 Propriedades do concreto

A determinação da consistência desejada de um concreto é efetuada normalmente tanto na obra como em laboratório, pelo seu abatimento, medido pelo abatimento do tronco de cone. Este processo é também conhecido como “*slump-test*” (ABNT NBR NM 67:1998).

O ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67:1998, é um método simples e visa determinar a trabalhabilidade do concreto fresco.

Na Tabela 8 pode-se observar o comportamento da consistência de cada mistura de acordo com a norma ABNT NBR NM 67:1998 (Figura 15).

Tabela 8 Valores da consistência do concreto fresco

Traço	Tipo de fibra	Abatimento tronco cônico ( <i>Slump</i> ) (mm)
A	Traço matriz	225
B	Aço com 35 kg/m <sup>3</sup>	126
C	Aço com 45 kg/m <sup>3</sup>	111
D	Polipropileno com 2 kg/m <sup>3</sup>	25
G	Polipropileno com 4 kg/m <sup>3</sup>	10
E	Celulose com 2 kg/m <sup>3</sup>	130
F	Celulose com 4 kg/m <sup>3</sup>	77



Figura 15 Determinação da consistência do concreto fresco (slump test)

Para cada traço, foram confeccionados, 18 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm e 12 corpos de prova prismáticos de 10x10x35 cm, seguindo-se as recomendações preconizadas nas normas: ABNT NBR 5738:2003 e emenda de 2008; ABNT NBR12655:2006; ABNT NBR12821: 2009; ABNT NM 33:1 998.



No período de cura, os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, atendendo recomendações da ABNT NBR9479: 2006 - “Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova”.

Após foram realizados os seguintes ensaios: ABNT NBR 5739:2007; ABNT NBR 12142:1991; ASTM. C1018:1994; ABNT NBR 7222:1994; ABNT NBR 8522:2008; ABNT NBR 8802:1994.

### 5.1.3 Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas e gráficos a seguir. Nas Figuras de 16 a 28 estão apresentadas algumas ilustrações dos ensaios realizados.

#### 5.1.3.1 Resistência à compressão axial

Para cada traço foram moldados 18 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm, sendo que 6 foram submetidos à compressão aos 7 dias e 6 aos 28 dias. Os outros 6 corpos de prova foram submetidos à compressão diametral para determinação da resistência à tração.

Foram rompidos dois corpos de prova para cada idade, atendendo-se o preconizado na ABNT NBR 5739/2007. Os resultados são apresentados na Tabela 9. Na Figura 16, estes resultados estão apresentados de maneira gráfica. A figura 17 ilustra o ensaio.

Tabela 9 Resultados à compressão axial

<b>Traço</b>	<b>Resistência média aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência média aos 28 dias (MPa)</b>
matriz	22,1	26,9
com 35 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	17,8	22,5
com 45 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	19,9	29,6
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	22,4	25,9
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	19,7	24,5
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	18,4	23,2
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	15,8	19,6

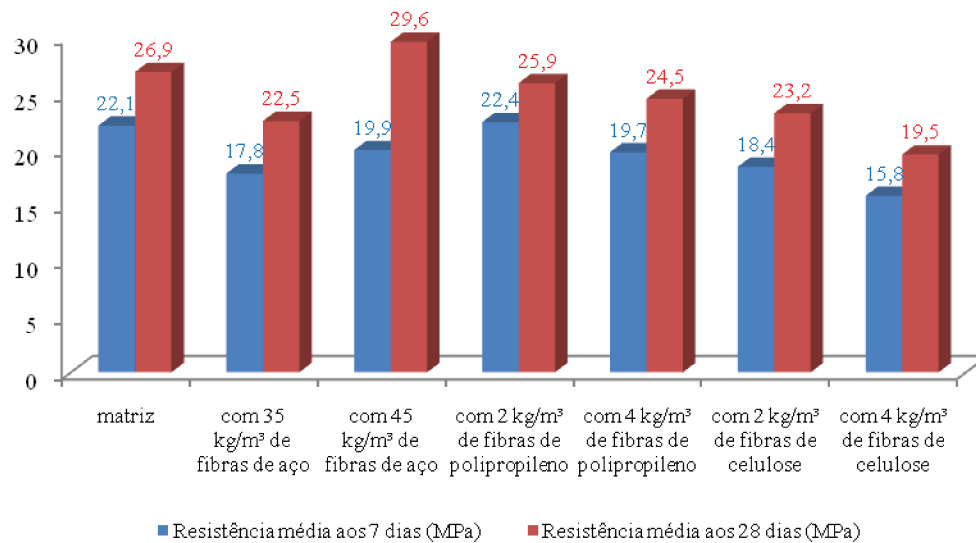


Figura 16 Resultados à compressão axial



Figura 17 Rompimento dos corpos de prova

Observa-se que todos os resultados à compressão de todos os traços, com exceção do traço com 45 kg/m³ de fibras de aço, apresentaram valores inferiores aos resultados do traço matriz. Os maiores valores nos traços com fibras foram obtidos com a utilização de fibras de aço e de polipropileno. No caso do aumento na taxa de fibras de aço, houve um acréscimo substancial na resistência, o que não ocorreu com as fibras de polipropileno e celulose. Mindess (1994) afirmou que as fibras de polipropileno e de carbono em grandes volumes chegam a reduzir um pouco a resistência do concreto, porque as fibras tendem a aumentar o volume de ar incorporado ao concreto durante a mistura.

### 5.1.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 7222:2011. Os resultados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 Resistência à tração por compressão diametral (figuras 18 a 20)

Traço	Resistência média aos 7 dias (MPa)	Resistência média aos 28 dias (MPa)
matriz	3,5	3,8
com 35 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	2,7	3,1
com 45 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	3,3	3,7
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	2,9	3,9
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	3,1	3,7
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	2,9	3,2
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	2,3	2,9

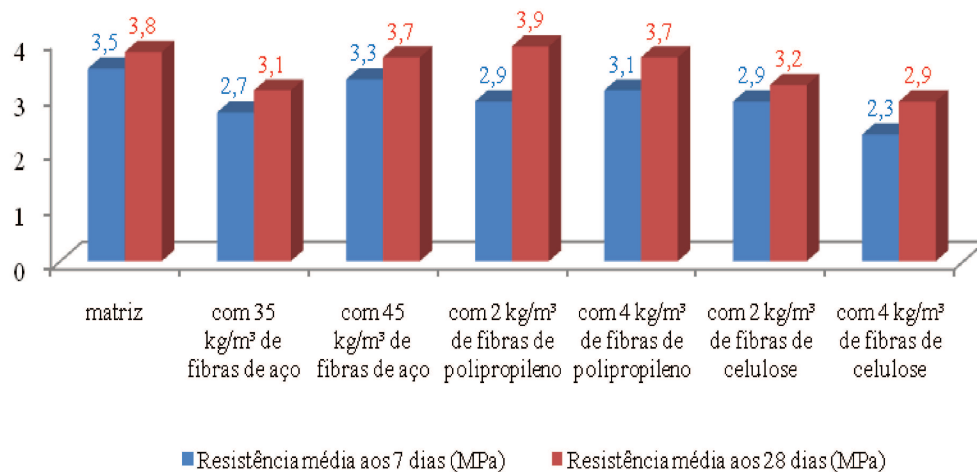


Figura 18 Resistência à tração por compressão diametral

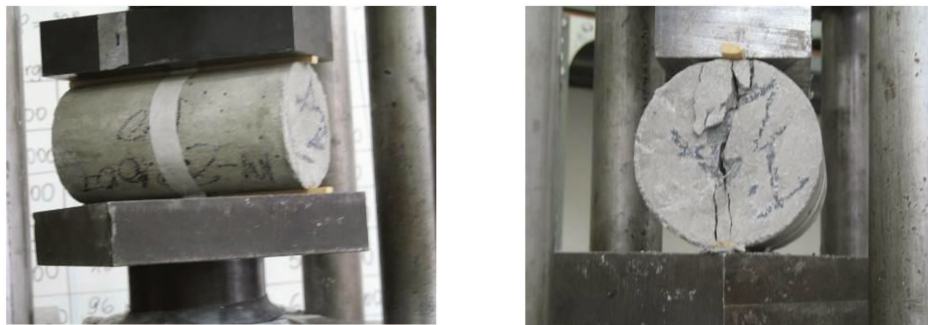


Figura 19 Ensaio à tração por compressão diametral



Figura 20 Corpo de prova rompido

Observa-se que somente o traço com  $2 \text{ kg/m}^3$  de polipropileno obteve resultados ligeiramente acima do traço matriz e todos os outros tiveram resultados abaixo. Aqui também se pode observar, com exceção das fibras de aço, que, quanto maior a taxa de fibras, pior o resultado.

### 5.1.3.3 Resistência à tração na flexão com a carga no meio do vão

Foram moldados 6 prismas de  $10 \times 30 \text{ cm}$  para ensaios à tração, sendo 3 com carga no meio do vão e 3 com carga nos terços.

O ensaio foi realizado conforme a ASTM C1018:1994. Na Tabela 11 estão compilados os resultados obtidos. Na Figura 22 está representada de forma gráfica esses resultados e na Figura 22 são mostradas fotografias do ensaio.

Tabela 11 Resistência à tração na flexão com carga no meio do vão (Figuras 23 e 24)

<b>Traço</b>	<b>Resistência média aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência média aos 28 dias (MPa)</b>
matriz	5,0	6,8
com $35 \text{ kg/m}^3$ de fibras de aço	4,8	6,3
com $45 \text{ kg/m}^3$ de fibras de aço	5,2	6,0
com $2 \text{ kg/m}^3$ de fibras de polipropileno	5,4	6,0
com $4 \text{ kg/m}^3$ de fibras de polipropileno	4,1	5,6
com $2 \text{ kg/m}^3$ de fibras de celulose	4,3	5,3
com $4 \text{ kg/m}^3$ de fibras de celulose	3,8	4,4

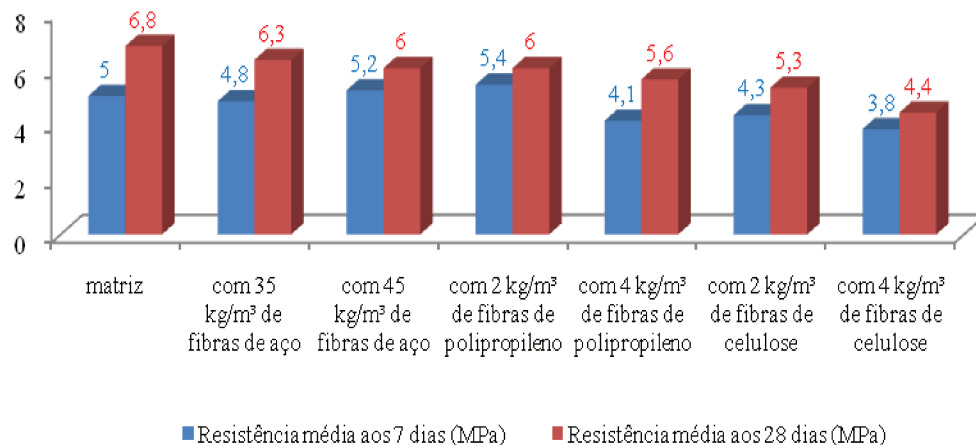


Figura 21 Resistência à tração na flexão com carga no meio do vão



Figura 22 Ensaio com carga aplicada no meio do vão

Como nos ensaios anteriores, constatou-se que todos os resultados foram inferiores aos resultados do traço matriz e que a resistência diminuiu com o aumento na taxa de fibras.

#### 5.1.3.4 Resistência à tração na flexão com a carga nas terças partes do vão

O ensaio foi realizado conforme a norma ABNT NBR 12142:2010. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.



Tabela 12 Resistência à tração na flexão com carga nas terças partes do vão

<b>Traço</b>	<b>Resistência média aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência média aos 28 dias (MPa)</b>
matriz	4,3	5,7
com 35 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	4,2	5,8
com 45 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	5,7	6,7
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	4,2	5,4
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	4,0	4,7
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	3,8	4,6
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	3,2	4,0

Na Figura 23 é apresentado o gráfico com as resistências e na Figura 24 a realização do ensaio.

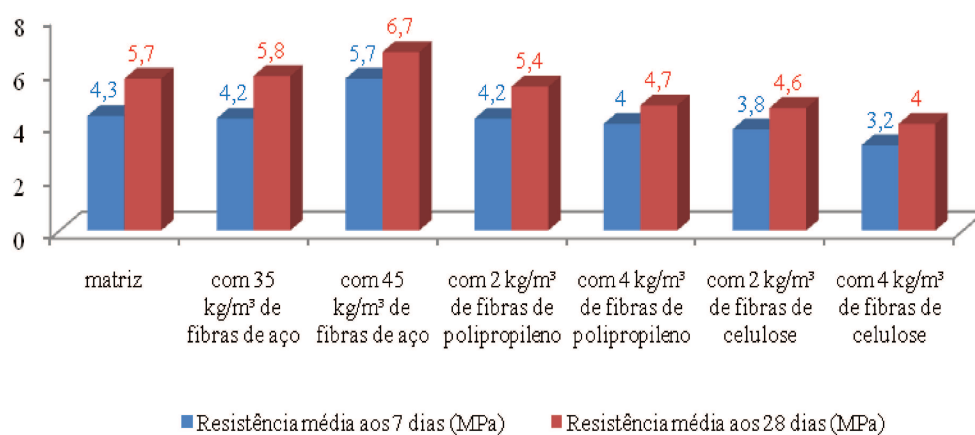


Figura 23 Resistência à tração na flexão com carga nas terças partes do vão



Figura 24. Ensaio com carga nos terços do vão.

No ensaio à tração na flexão nos terços do vão, foram obtidos resultados superiores ao do traço matriz somente com as fibras de aço. Como nos outros ensaios, houve um acréscimo de resistência com o acréscimo na taxa das fibras de aço e um decréscimo nas outras fibras.

### 5.1.3.5 Determinação dos módulos estáticos de elasticidade

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos. Na Figura 25, os resultados são apresentados de maneira gráfica e na Figura 26 podem-se vistas fotografias do ensaio.

Tabela 13 Módulo estático de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008)

Traço	Módulo aos 7 dias (GPa)	Módulo aos 28 dias (GPa)
matriz	49,3	46,6
com 35 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	29,5	40,2
com 45 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	43,2	45,5
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	54,5	41,1
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	39,0	33,5
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	28,9	34,7
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	25,0	28,3

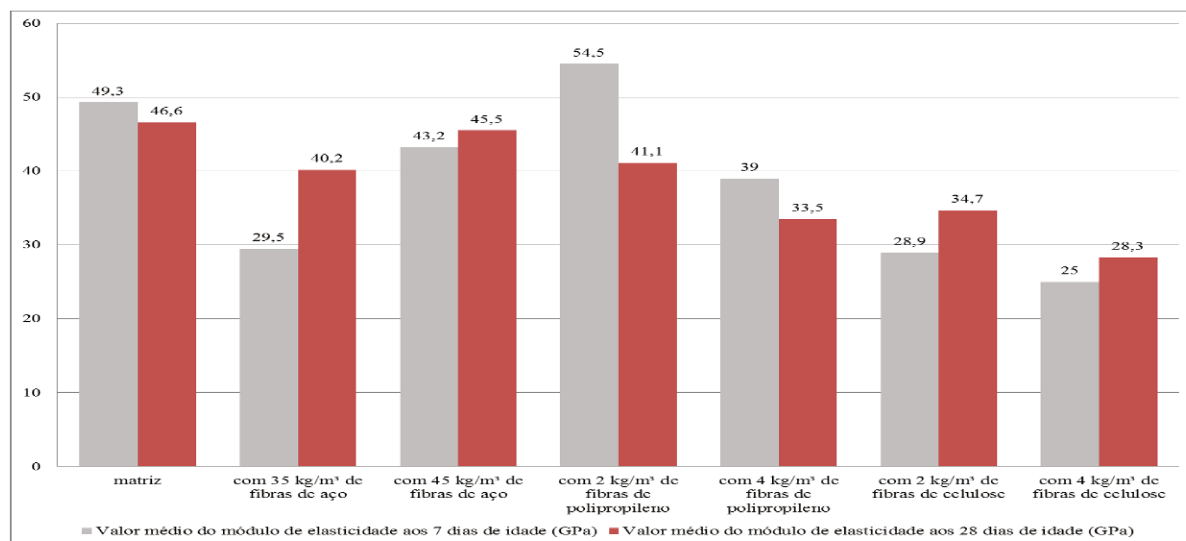


Figura 25 Gráfico do Módulo estático de elasticidade (GPa) (ABNT NBR 8522:2008)



Figura 26. Ensaio do Módulo estático de elasticidade (ABNT NBR 8522:2008)

De maneira geral, a adição de fibras não contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade.

#### 5.1.3.6 Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico (ABNT NBR 8802:1994)

A determinação do módulo dinâmico foi realizada através da propagação de onda ultrassônica, seguindo a recomendação da norma ABNT NBR 8802:1994 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, uma vez que ainda não existe uma norma brasileira específica para esse ensaio.

Na Tabela 14 estão os resultados obtidos. Nas Figuras 27 e 28, estão representados os resultados em um gráfico e imagens do ensaio realizado, respectivamente.

Tabela 14 Módulo de elasticidade dinâmico.

<b>Traço</b>	<b>Módulo aos 7 dias (GPa)</b>	<b>Módulo aos 28 dias (GPa)</b>
matriz	46,7	48,2
com 35 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	40,5	44,9
com 45 kg/m <sup>3</sup> de fibras de aço	48,3	50,6
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	44,5	50,5
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de polipropileno	36,6	42,3
com 2 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	37,7	41,8
com 4 kg/m <sup>3</sup> de fibras de celulose	32,4	34,5



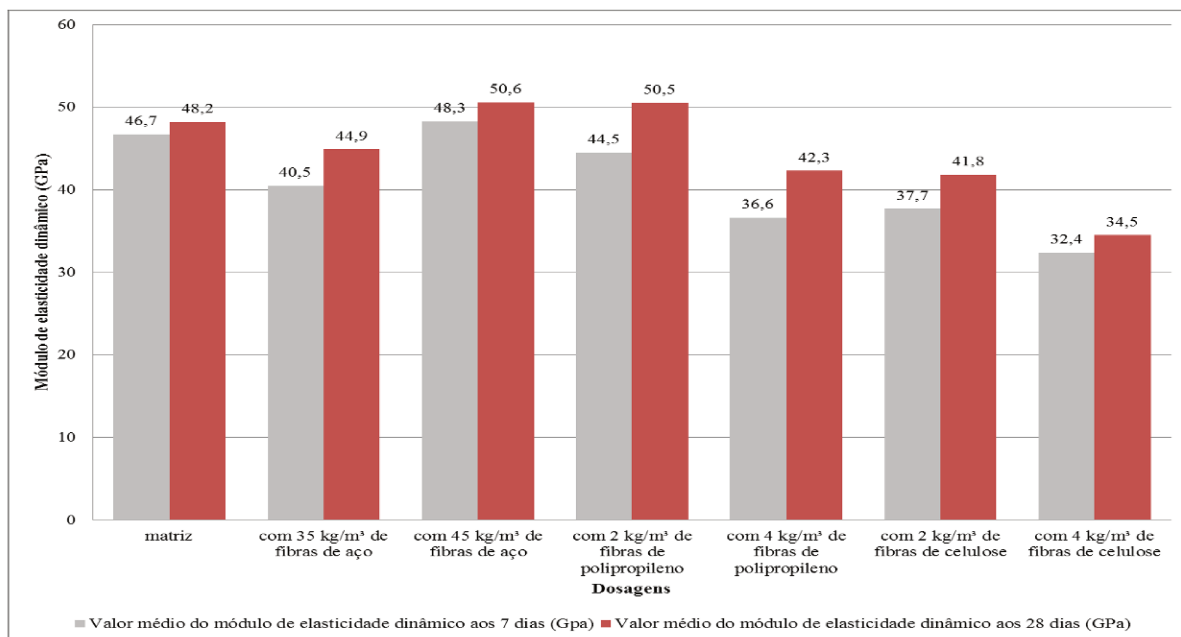
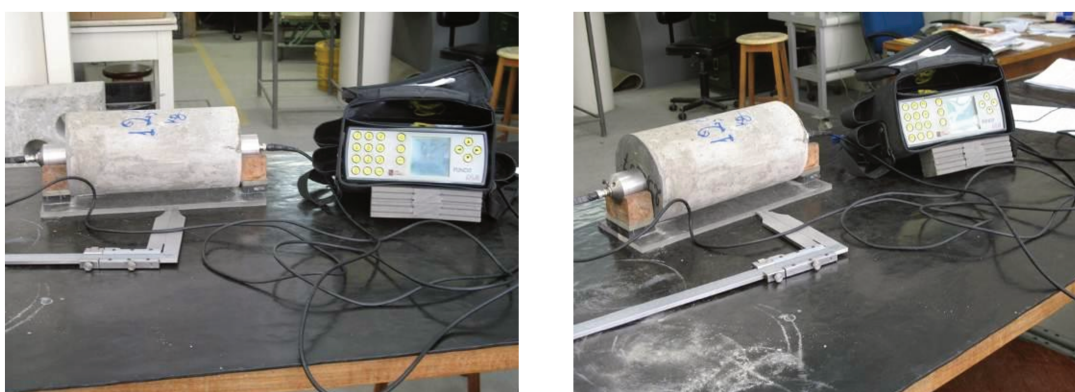


Figura 27 Gráfico dos resultados do Ensaio para determinação do Módulo (GPa) de elasticidade dinâmico



28 Ensaio para determinação do Módulo de elasticidade dinâmico

Figura

### 5.1.3.7 Análise dos Resultados dessa dosagem preliminar

É importante salientar que a fibra possui um papel passivo até o momento do surgimento da primeira fissura quando começa a atuar.

As fibras de polipropileno e de celulose não contribuíram de maneira relevante para o aumento da resistência do concreto e caberia em uma próxima experiência, observar mais detalhadamente, o seu papel como inibidoras ao surgimento de fissuras, através da execução de placas de concreto e acompanhamento da sua cura ao ar livre.

O surgimento de fissuras, principalmente devido ao fenômeno da retração no concreto, que é agravado no caso dos pavimentos devido à grande área exposta à evaporação, ressalta o papel benéfico da adição de fibras quer sejam de aço, de polipropileno ou de celulose (MOSCATELLI; FORTES, 2011).

Figueiredo (2000) afirmou que “O reforço do concreto com fibras de polipropileno, devido ao baixo módulo de elasticidade destas fibras, só atua com ganho significativo de desempenho, nas primeiras idades. Isto ocorre porque nesta situação o módulo de elasticidade do concreto também é baixo e as deformações estão associadas a um baixo nível de tensão, compatível com aquele absorvido pelas fibras de polipropileno.”, do que se subintende que essas fibras não são recomendadas quando a preocupação está em ganhar resistência. Tanto as fibras de polipropileno como a de celulose contribuem para reduzir a exsudação do concreto.

Pelo fato das fibras de aço apresentarem uma maior contribuição para o aumento da resistência do concreto e com a finalidade de verificar a influência da dosagem das fibras, pois segundo Bentur e Mindess (1990), o acréscimo no teor de fibras leva ao aumento da capacidade resistente do compósito, foi realizado um estudo mais aprofundado conforme descrito no item a seguir.

## **5.2 Estudo da Adição de Fibras de Aço**

O Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) apresentou o melhor desempenho, assim sendo, partiu-se para a segunda etapa da pesquisa para se estudar a influência de diferentes dosagens de fibras de aço no concreto, verificando-se o desempenho quando aplicado a pavimentação.

Foram utilizados na verificação, materiais coletados e amostrados na Usina Engemix, conforme definidos na Tabela 15.

Tabela 15 Materiais utilizados no estudo da dosagem com fibras de aço

Material	Fornecedor
Cimento CP II E 40	Votoran
Areia de Quartzo	Supriareia
Brita 1	Khoury

### 5.2.1 Características dos materiais utilizados

A areia utilizada apresentou as características discriminadas na Tabela 16.

Tabela 16: Características da areia utilizada

<u>AMOSTRA:</u>	<u>AREIA QUARTZO</u>			
DISCRIMINAÇÃO DO ENSAIO	RESULTADOS		NBR 7211	
1. MASSA ESPECÍFICA	2,63 g/cm³		NÃO ESPECIFICADO	
2. TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS	1,2 %		≤ 3,0 %	
3. ABSORÇÃO DE ÁGUA	1,8 %		NÃO ESPECIFICADO	
4. TORRÕES DE ARGILA	0,0 %		≤ 3,0 %	
5. MASSA UNITÁRIA	SECA	1,275 kg/dm³	NÃO ESPECIFICADO	
	h= 4,0 %	--- kg/dm³		
6. IMPUREZAS ORGÂNICAS E HÚMICAS	Mais Clara		MAIS CLARA	
7. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	#	% RETIDA		Zona Utilizável / Utilizável
	(mm)	INDIV.	ACUM.	
	9,5	0	0	0
	6,3	0	0	0 a 7
	4,8	0	0	0 a 10
	2,4	0	0	0 a 25
	1,2	2,7	3	5 a 50
	0,6	26,0	29	15 a 70
	0,3	44,7	73	50 a 95
	0,15	20,3	94	85 a 100
	FUNDO	6,3	100	---
	MÓD.FINURA	1,99		NÃO ESPECIFICADO
	Ø MÁX.	1,2 mm		NÃO ESPECIFICADO
	Graduação	AREIA QUARTZO		NÃO ESPECIFICADO

O cimento utilizado apresentou as seguintes características (Tabela 17).

Tabela 17: Especificação do cimento Portland

DISCRIMINAÇÃO DO ENSAIO	NORMA	RESULTADOS				NORMA NBR 11578
1. CONSISTÊNCIA NORMAL	NBR NM 43	26,9 %				---
2. FINURA NA # Nº 200	NBR 11579	0,70 %				≤ 12,0 %
3. TEMPOS DE PEGA	NBR NM 65	INÍCIO	3:15 HORAS		INÍCIO	≥ 01 h
		FIM	4:25 HORAS		FIM	≤ 10 h
4.1 EXPANSIBILIDADE LE CHATELIER	NBR 11582	A QUENTE	0,33 mm		A QUENTE	≤ 5mm
		A FRIO	---		A FRIO	≤ 5 mm
5. ÁREA ESPECÍFICA BLAINE	NBR NM 76	3620,0 cm²/g				≥ 2600 cm²/g
6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	NBR 7215	IDADE (dias)	IND. (MPa )	MÉDIA (MPa)	DESVIO (%)	≥ 15,0 MPa
		03	16,4	16,7	2,39	
			17,1			
			16,9			
			16,3			
		07	25,0	24,6	1,63	≥ 25,0 MPa
			24,4			
			24,6			
			24,4			
		28	32,3	33,4	3,29	≥ 40,0 MPa
			33,9			
			34,1			
			33,3			
7. MASSA ESPECÍFICA	NBR NM 23	2,992 g/cm³				---
OBSERVAÇÃO:						

OBSERVAÇÃO:

Foi utilizada uma brita 1 com as seguintes características ( Tabela 18).

Tabela 18 Características da brita 1

<b>AMOSTRA:</b>	<b>BRITA 1</b>		
DISCRIMINAÇÃO DO ENSAIO	RESULTADOS		NBR 7211
1. MASSA ESPECÍFICA SECA	2,66 g/cm <sup>3</sup>		NÃO ESPECIFICADO
2. MASSA ESPECÍFICA SATURADA	2,67 g/cm <sup>3</sup>		NÃO ESPECIFICADO
3. MASSA ESPECÍFICA APARENTE	2,70 g/cm <sup>3</sup>		NÃO ESPECIFICADO
2. TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS	0,37 %		≤ 1,0 %
3. ABSORÇÃO DE ÁGUA	0,6 %		NÃO ESPECIFICADO
4. MASSA UNITÁRIA	---	1,52 kg/dm <sup>3</sup>	NÃO ESPECIFICADO
5. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	#	% RETIDA	
	(mm)	INDIV.	ACUM.
	25	0	0
	19	7,93	8
	12,5	56,50	64
	9,5	25,59	90
	6,3	7,51	98
	4,8	1,54	99
	2,4	0	99
	1,2	0	99
	0,6	0	99
	0,3	0	99
	0,15	0	99
	FUNDO	0,94	100
	MÓD.FINURA	6,92 %	
	Ø MÁX.	25 mm	
	Graduação	BRITA - 1	

Foram executados 4 traços de acordo de acordo com a seguinte programação:

- Traço D1 : concreto sem fibras
- Traço D 2 : concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras
- Traço D 3 : concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras
- Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras

Adotou-se um traço piloto que atendesse a uma resistência a tração na flexão mínima de 4,5 MPa, conforme recomendado por Pitta (1998).

O escopo da pesquisa cobriu todas as determinações realizadas na etapa preliminar, acrescidas da determinação do desgaste por abrasão (ABNT NBR 12042:1992). Foram moldados 29

corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para cada traço, num total de 116 CPs, e 12 prismas 10 x 10 x 40 cm, num total de 48, para que fosse realizado o tratamento estatístico com a idade de 28 dias.

### 5.2.2 Propriedades do concreto

Com amostras dos materiais ensaiados, foram preparadas 04 dosagens das quais foi medido o abatimento e moldada 01 série de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, para determinação da resistência à compressão e flexão na idade de 28 dias (conforme as Normas NBR 5738 e 5739). Na Tabela 19 estão apresentadas as características de moldagem.

Tabela 19 características de moldagem

Dosagem Nº	$f_{cj}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	Abatimento pelo Tronco de Cone (mm)	Tipo de Cimento	Fator A/C
01	36,6	30,0	100+/-20	CP II E 40 RS	0,48
02	36,6	30,0	100+/-20	CP III E 40 RS	0,48
03	36,6	30,0	100+/-20	CP III E 40 RS	0,48
04	36,6	30,0	100+/-20	CP II E 40 RS	0,48

Na Tabela 20 está apresentado o traço unitário da dosagem proposta

Tabela 20 Traço Unitário

Dosagem Nº	Cimento	Areia Grossa	Brita 1	Água
01	1,00	2,06	2,94	0,48
02	1,00	2,06	2,94	0,48
03	1,00	2,06	2,94	0,48
04	1,00	2,06	2,94	0,48

Na Tabela 21 está apresentado o consumo de material para 1m<sup>3</sup> de concreto (materiais secos).

Tabela 21 consumo de material para 1m<sup>3</sup> de concreto (materiais secos).

Dosagem N°	Fator a/c	Cimento (kg)	Areia Quartzo (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (mL)	Fibra de aço (kg)	Água (L)
01	0,48	381	785	1120	2286	---	183
02	0,48	381	785	1120	2286	20,0	183
03	0,48	381	785	1120	2286	30,0	183
04	0,48	381	785	1120	2286	40,0	183

Na Tabela 22 estão os resultados obtidos nos ensaios do concreto fresco. Nas figuras 29 a 35 estão ilustrados os ensaios

Tabela 22 Resultados obtidos nos ensaios do concreto fresco

Dosagem N°	Fator a/c	Abatimento Medido (mm)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Concreto (°C)	Ar Incorporado (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
01	0,48	120	25,0	25,0	2,2	2460
02	0,48	120	25,0	25,0	2,0	2472
03	0,48	120	25,0	25,0	2,1	2480
04	0,48	110	25,0	25,0	2,0	2475



Figura 29: CP com fibra de aço sendo ensaiado à compressão axial



Figura 30: CP com fibra de aço rompido à compressão axial

Observa-se que o corpo de prova rompeu de maneira correta, apresentando o formato de uma cunha. Nas figuras 31 e 32 observa-se que mesmo após a ruptura, as partes não se destacaram devido à presença das fibras.



Figura 31: Prisma com fibra de aço sendo ensaiado com carga no meio do vão





Figura 32: Prisma com fibra de aço ensaiado com carga no meio do vão

Nas figuras 33 e 34 observa-se a atuação das fibras de aço que inclusive não permitiram a separação total após a ruptura.



Figura 33: CP com fibra de aço sendo ensaiado à compressão diametral



Figura 34: CP com fibra de aço rompido à compressão diametral

A figura 35 ilustra o posicionamento dos relógios comparadores utilizados no ensaio para determinação do módulo de elasticidade.



Figura 35: Ensaio para determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação

### 5.2.3 Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas e gráficos a seguir.

O cálculo estatístico dos dados foi realizado com o auxílio do programa Excel, onde a média e o desvio padrão são calculados automaticamente.

O coeficiente de variação (CV), é o resultado do desvio padrão (DPp) dividido pela média dos dados. Normalmente é multiplicado por 100, para ser expresso em %.

O coeficiente de variação CV é usado para analisar a dispersão em termos relativos ao seu valor médio. É uma medida relativa da dispersão, útil para a comparação em termos relativos do grau de concentração em torno da média.

De uma forma geral, se o CV for:

- menor ou igual a 15% - baixa dispersão, dados homogêneos
- entre 15 e 30% - média dispersão
- maior que 30% - alta dispersão , dados heterogêneos

### 5.2.3.1 Resistência à compressão axial

Na Tabela 24 estão os resultados do traço D1

Tabela 23 Traço D1 : concreto sem fibras – Resistência à compressão axial

Corpo de prova nº	Diâmetro (cm) D	Área (cm²) A	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à compressão ( $f_{c28}$ )	
					kgf/cm²	MPa
01	10,00	78,54	19.900	195,02	253	25,3
02	10,00	78,54	22.500	220,50	286	28,6
03	10,01	78,70	20.500	200,90	260	26,0
04	10,05	79,33	22.400	219,52	282	28,2
05	10,05	79,33	15.200	148,96	192	19,2
06	10,00	78,54	20.500	200,90	261	26,1
07	10,04	79,17	25.300	247,94	320	32,0
08	10,00	78,54	24.300	238,14	309	30,9
09	9,96	77,91	23.000	225,40	295	29,5
10	10,05	79,33	21.600	211,68	272	27,2
11	10,02	78,85	22.800	223,44	289	28,9
12	10,02	78,85	23.000	225,40	292	29,2
25	10,00	78,84	22.500	220,50	286	28,6
26	10,00	78,54	23.600	231,28	300	30,0
27	10,00	78,54	20.800	203,84	265	26,5

Os valores da resistência a compressão ( $f_{c28}$ ) foram obtidos pela seguinte equação.

$$\boxed{f_{c28} = \frac{P}{A}} \quad (9)$$

Nos gráficos apresentados nas Figuras 36 e 37 está apresentada a resistência à compressão axial considerando-se os 15 corpos de prova ensaiados e desconsiderando-se o CP5, respectivamente.

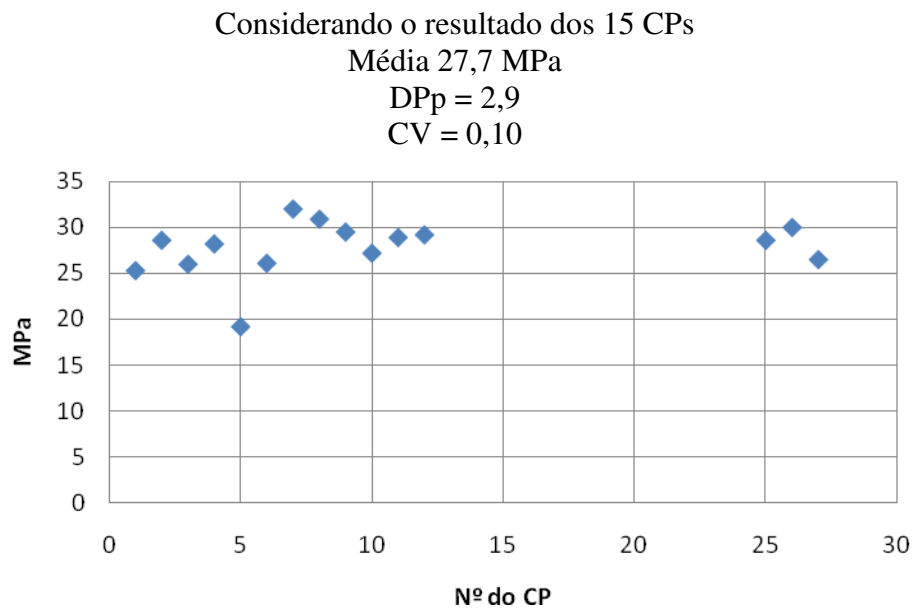


Figura 36 - Gráfico do Ensaio à Compressão Axial  
(considerando o resultado dos 15 CPs)

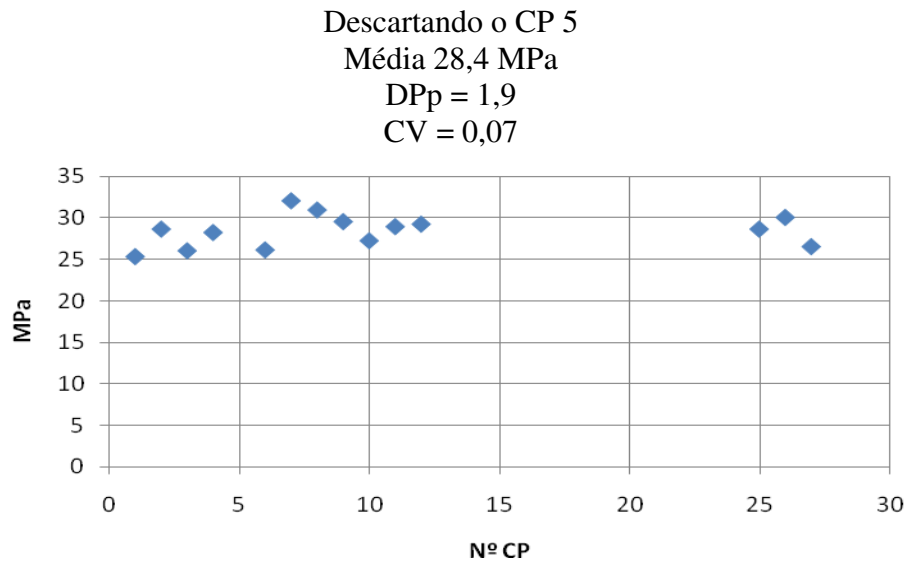


Figura 37 - Gráfico do Ensaio de Compressão Axial (descartando o CP 5)

Na Tabela 24 estão os resultados do traço D2

Tabela 24 Traço D 2 : concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial

Corpo de prova nº	Diâmetro (cm) D	Área (cm <sup>2</sup> ) A	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à compressão (f <sub>c28</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
30	10,00	78,54	23.500	230,30	299	29,9
31	10,00	78,54	24.700	242,06	314	31,4
32	10,00	78,54	23.400	229,32	298	29,8
33	10,00	78,54	24.500	240,10	312	31,2
34	10,00	78,54	18.700	183,26	238	23,8
35	10,00	78,54	20.000	196,00	255	25,5
36	10,00	78,54	23.700	232,26	302	30,2
37	10,00	78,54	22.400	219,52	285	28,5
38	10,00	78,54	21.900	214,62	279	27,9
39	10,00	78,54	19.000	186,20	242	24,2
40	10,00	78,54	21.200	207,76	270	27,0
41	10,00	78,54	21.100	206,78	269	26,9
42	10,00	78,54	23.600	231,28	300	30,0
43	10,00	78,54	19.600	192,08	250	25,0
44	10,00	78,54	25.500	249,90	325	32,5

Nas Figuras 38 e 39 está representada a resistência à Compressão Axial, considerando-se todos os corpos de prova ensaiados (15) e desconsiderando-se os CP 34 e 39, respectivamente.

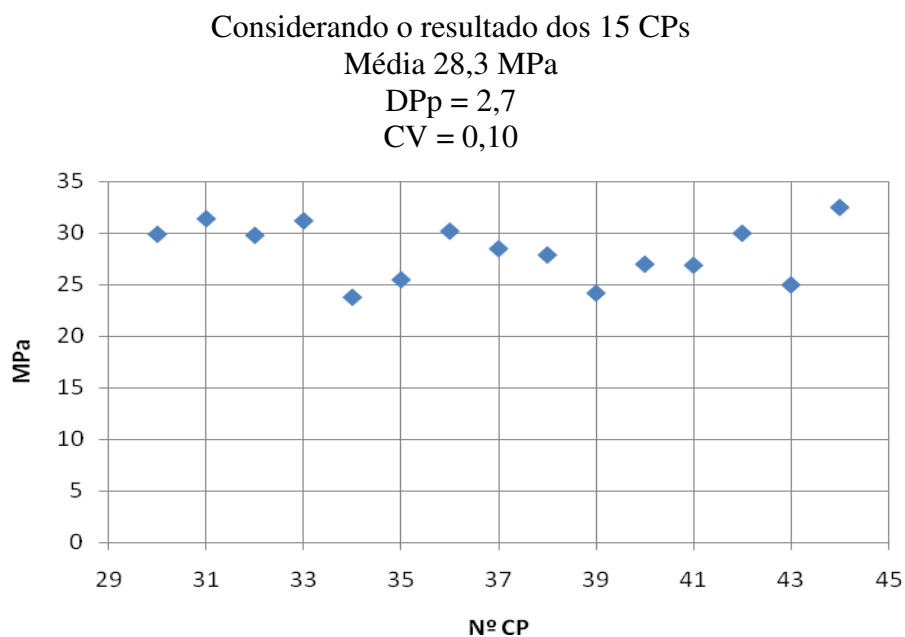


Figura 38- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (considerando o resultado dos 15 CPs)

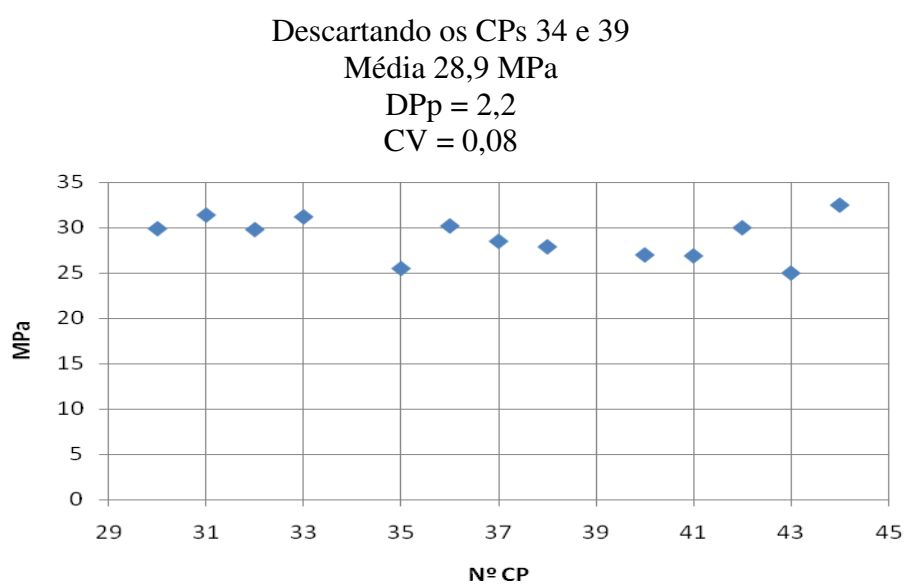


Figura 39- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (descartando os CPs 34 e 39)

Na Tabela 25 estão os resultados do traço D3

Tabela 25 Traço D 3 : concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial

Corpo de prova nº	Diâmetro (cm) D	Área (cm <sup>2</sup> ) A	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à compressão (f <sub>c28</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
59	10,00	78,54	28.250	276,85	360	36,0
60	10,00	78,54	28.100	275,38	358	35,8
61	10,00	78,54	27.800	272,44	354	35,4
62	10,00	78,54	27.100	265,58	345	34,5
63	10,00	78,54	28.200	276,36	359	35,9
64	10,00	78,54	29.200	286,16	372	37,2
65	10,00	78,54	27.350	268,03	348	34,8
66	10,00	78,54	27.200	266,56	346	34,6
67	10,00	78,54	29.200	286,16	372	37,2
68	10,00	78,54	27.600	270,48	351	35,1
69	10,00	78,54	27.850	272,93	355	35,5
70	10,00	78,54	28.150	275,87	358	35,8
83	10,00	78,54	24.300	238,14	309	30,9
84	10,00	78,54	24.000	235,2	306	30,6
85	10,00	78,54	26.400	258,72	336	33,6

Na Figura 40 está representada a resistência à Compressão Axial, considerando-se todos os corpos de prova ensaiados (15).

Considerando o resultado dos 15 CPs

Média 34,9 MPa

DPp = 1,9

CV = 0,05

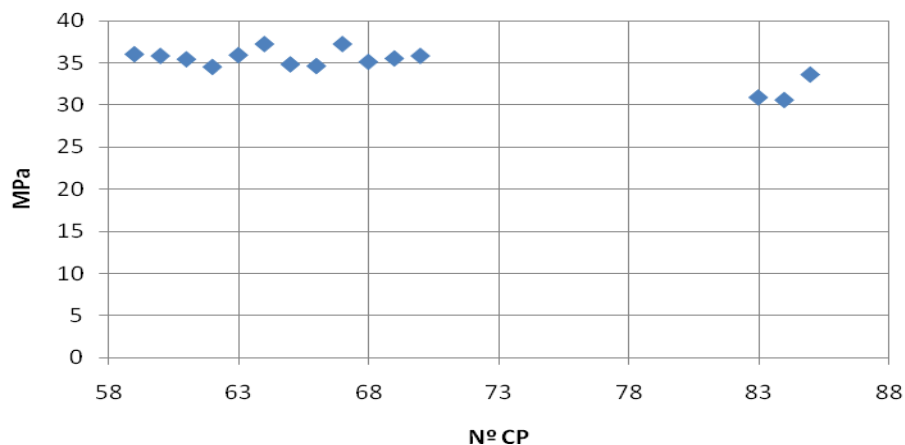


Figura 40- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial  
(considerando o resultado dos 15 CPs)

Na Tabela 26 estão os resultados do traço D4

Tabela 26 Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras– Resistência à compressão axial

Corpo de prova nº	Diâmetro (cm) D	Área (cm <sup>2</sup> ) A	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à compressão (f <sub>c28</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
88	10,00	78,54	26.000	254,8	331	33,1
89	10,00	78,54	29.500	289,1	376	37,6
90	10,00	78,54	28.000	274,4	357	35,7
91	10,00	78,54	28.500	279,3	363	36,3
92	10,00	78,54	28.750	281,75	366	36,6
93	10,00	78,54	30.100	294,98	383	38,3
94	10,00	78,54	28.950	283,71	369	36,9
95	10,00	78,54	29.400	288,12	374	37,4
96	10,00	78,54	28.700	281,26	365	36,5
97	10,00	78,54	28.750	281,75	366	36,6
98	10,00	78,54	28.900	283,22	368	36,8
99	10,00	78,54	28.250	276,85	360	36,0
112	10,00	78,54	30.000	294,00	382	38,2
113	10,00	78,54	28.100	275,38	358	35,8
114	10,00	78,54	29.200	286,16	372	37,2



Nas Figuras 41 e 42 está representada a resistência à Compressão Axial, considerando-se todos os corpos de prova ensaiados (15) e desconsiderando-se o CP 88, respectivamente. Na Tabela 27 estão apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação da amostra (CV) que é dado pelo desvio padrão dividido pelo valor médio, expresso em porcentagem.

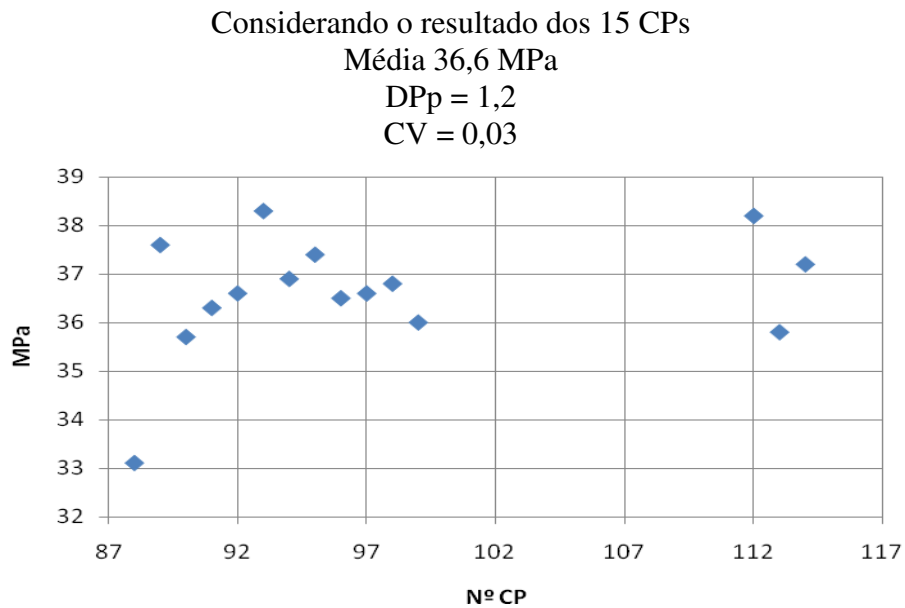


Figura 41 - Gráfico do Ensaio à Compressão Axial  
(considerando o resultado dos 15 CPs)

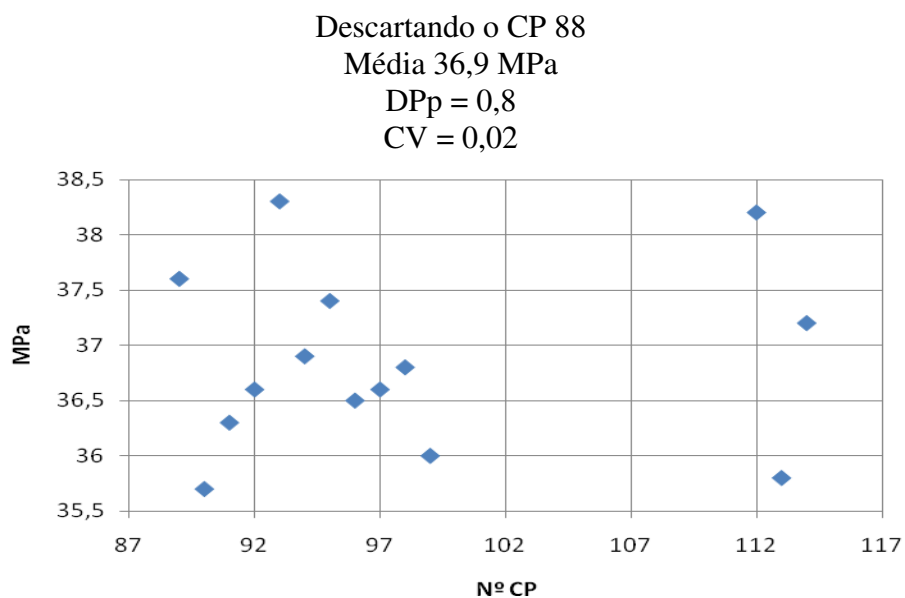


Figura 42- Gráfico do Ensaio à Compressão Axial (descartando o CP 88)

Na Figura 43 estão representados os valores apresentados na Tabela 27.

Tabela 27: Resumo dos Resultados da Compressão Axial

Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (Dpp) (MPa)	CV
D1	28,4	1,9	0,07
D2	28,9	2,2	0,08
D3	34,9	1,9	0,05
D4	36,9	0,8	0,02

Dpp = Desvio padrão;

CV = coeficiente de variação da amostra.

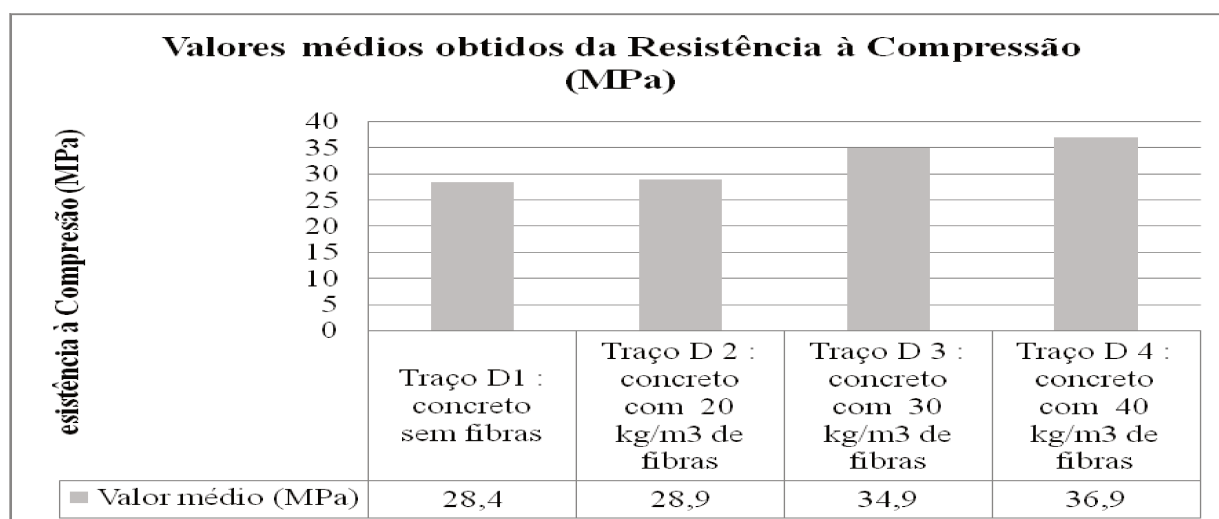


Figura 43: Valores médios obtidos da Resistência à Compressão Axial

Observa-se que com o aumento da porcentagem de fibras de aço houve um aumento da resistência à compressão axial.

### 5.2.3.2 Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão

Na Tabela 28 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 28 - Traço D 1 : concreto sem fibras – Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à tração na flexão ( $f_{tk}$ )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
1	10,00	10,00	30,00	1.500	14,70	45	4,5
2	10,00	10,00	30,00	1.600	15,68	48	4,8
3	10,00	10,00	30,00	1.640	16,07	49	4,9
4	10,00	10,00	30,00	1.580	15,48	47	4,7
5	10,00	10,00	30,00	1.620	15,88	49	4,9
6	10,00	10,00	30,00	1.600	15,68	48	4,8
7	10,00	10,00	30,00	1.720	16,86	52	5,2
8	10,00	10,00	30,00	1.770	1,35	53	5,3
9	10,00	10,00	30,00	1.690	16,56	51	5,1

$$f_{tk} = \frac{PL}{bh^2} \quad (10)$$

Onde :

$f_{tk}$  = resistência a tração na flexão em MPa;

P = Carga de ruptura;

L = vão entre os apoios;

b = largura do corpo de prova prismático;

h = altura do corpo de prova prismático

Na Figura 44 está apresentado os resultados obtidos da resistência a tração na flexão dos 9 prismas ensaiados.

Considerando o resultado dos 9 Prismas

Média 4,9 MPa

DPp = 0,2

CV = 0,04

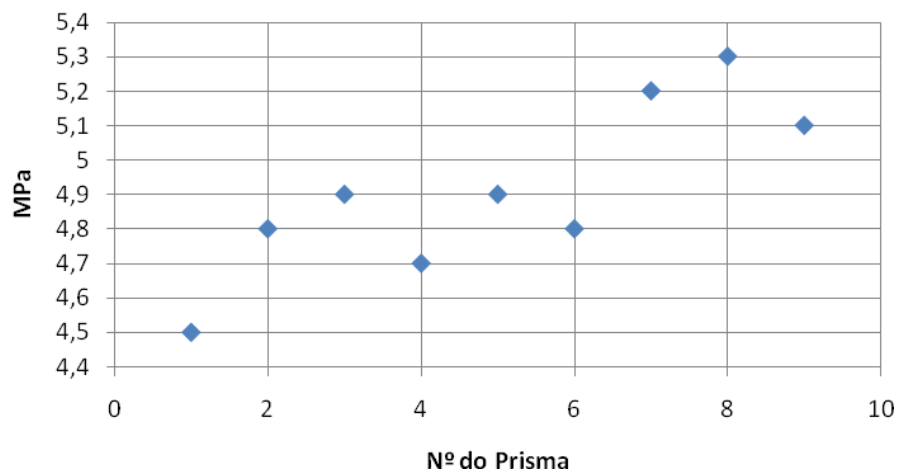


Figura 44- Gráfico do Traço D1 - Tração na Flexão

Na Tabela 29 e Figura 45 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 29 - Traço D 2 : concreto com 20 kg/m³ de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à tração na flexão ( $f_{t,k}$ )	
						kgf/cm²	MPa
13	10,00	10,00	30,00	1.680	16,46	50	5,0
14	10,00	10,00	30,00	1.680	16,46	50	5,0
15	10,00	10,00	30,00	2.240	21,95	67	6,7
16	10,00	10,00	30,00	1.980	19,40	59	5,9
17	10,00	10,00	30,00	1.900	18,62	57	5,7
18	10,00	10,00	30,00	2.020	18,80	61	6,1
19	10,00	10,00	30,00	1.840	18,03	55	5,5
20	10,00	10,00	30,00	1.840	18,03	55	5,5
21	10,00	10,00	30,00	1.600	15,68	48	4,8

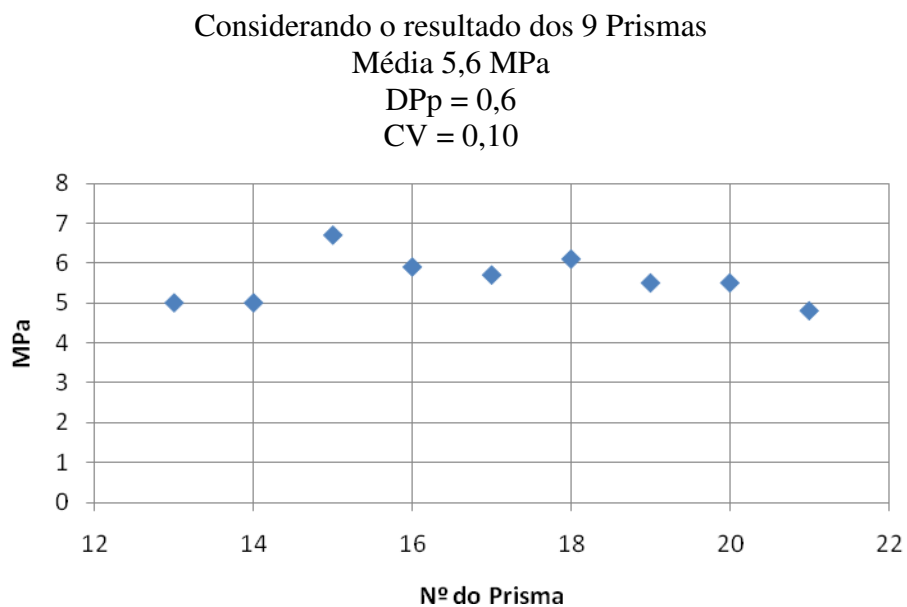


Figura 45 - Gráfico do Traço D2 - Tração por Flexão

Na Tabela 30 e Figura 46 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 30 - Traço D 3 : concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à tração na flexão ( $f_{t,k}$ )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
25	10,00	10,00	30,00	1.300	12,74	39	3,9
26	10,00	10,00	30,00	1.800	17,64	54	5,4
27	10,00	10,00	30,00	1.710	16,76	51	5,1
28	10,00	10,00	30,00	1.580	15,48	47	4,7
29	10,00	10,00	30,00	2.290	22,44	69	6,9
30	10,00	10,00	30,00	2.100	20,58	63	6,3
31	10,00	10,00	30,00	1.650	16,17	50	5,0
32	10,00	10,00	30,00	1.640	16,07	49	4,9
33	10,00	10,00	30,00	1.999	19,59	60	6,0

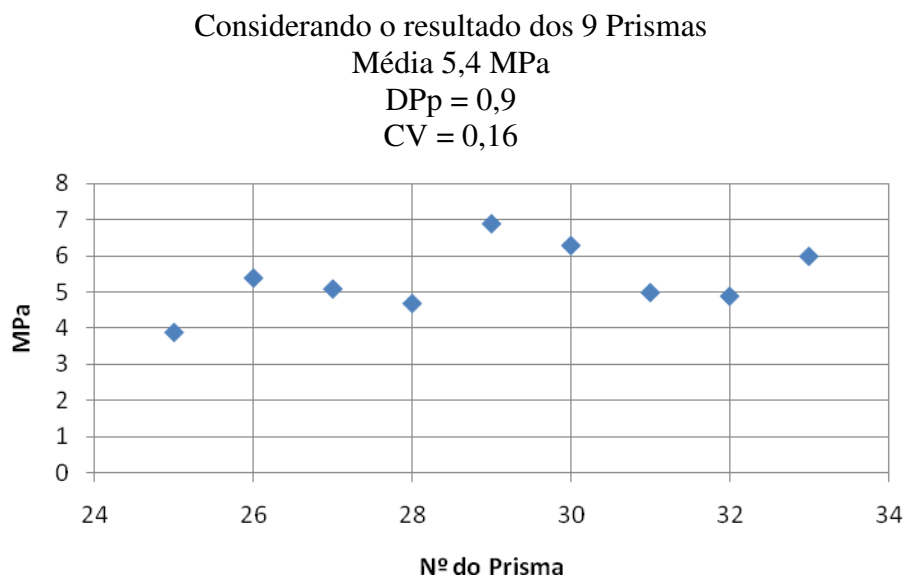


Figura 46- Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão

Na Figura 57 estão apresentados os valores obtidos do desvio padrão e do CV, desconsiderando-se os resultados dos prismas 25 e 29.

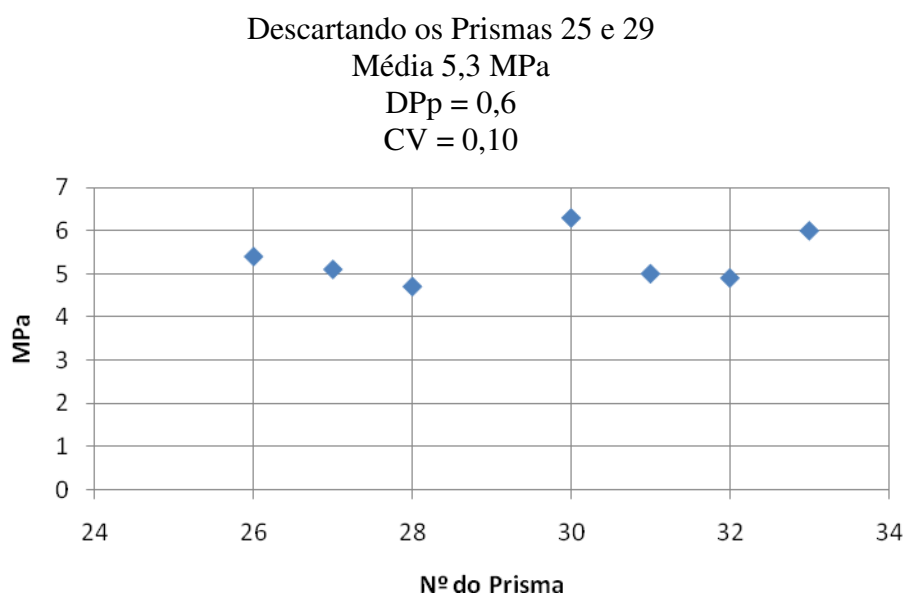


Figura 47- Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão  
(descartando os prismas 25 e 29)

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 31 - Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras– Resistência à tração na flexão, com carga aplicada nos terços do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência à tração na flexão ( $f_{t,k}$ )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
37	10,00	10,00	30,00	1.430	14,01	43	4,3
38	10,00	10,00	30,00	1.170	11,47	35	3,5
39	10,00	10,00	30,00	1.440	14,11	43	4,3
40	10,00	10,00	30,00	2.060	20,19	62	6,2
41	10,00	10,00	30,00	1.330	13,03	40	4,0
42	10,00	10,00	30,00	1.300	12,74	39	3,9
43	10,00	10,00	30,00	1.520	14,90	46	4,6
44	10,00	10,00	30,00	1.500	14,07	45	4,5
45	10,00	10,00	30,00	1.470	14,40	44	4,4

Nas Figuras 48 e 49 estão apresentados os resultados considerando os 9 prismas e desconsiderando o prisma 40, respectivamente.

Considerando o resultado dos 9 Prismas

Média 4,4 MPa

DPp = 0,7

CV = 0,16

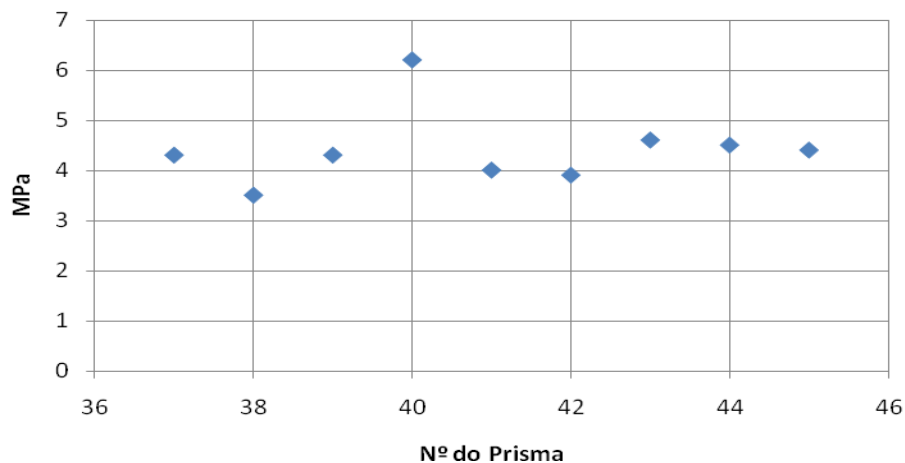


Figura 48 - Gráfico do Traço D4 - Tração por Flexão

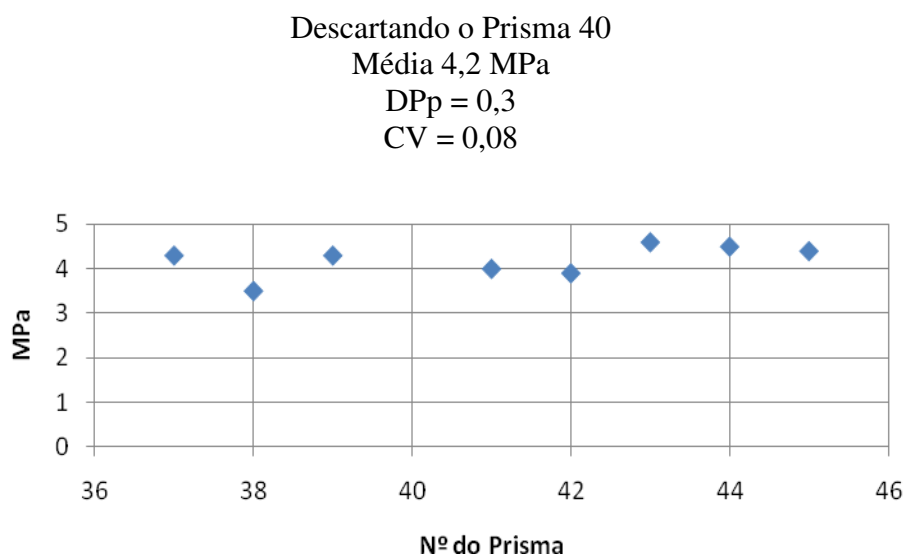


Figura 49- Gráfico do Traço D4 - Tração por Flexão (descartando o prisma 40)

Na Tabela 32 e Figura 50, está apresentado o resumo das resistências à tração na flexão obtida para cada traço.

Tabela 32: Resumo da Resistência à Tração na Flexão

Prisma	Média (MPa)	DPp (MPa)	CV
D1	4,9	0,2	0,05
D2	5,6	0,6	0,10
D3	5,3	0,6	0,10
D4	4,2	0,3	0,08

DPp = Desvio padrão;

CV = coeficiente de variação da amostra.



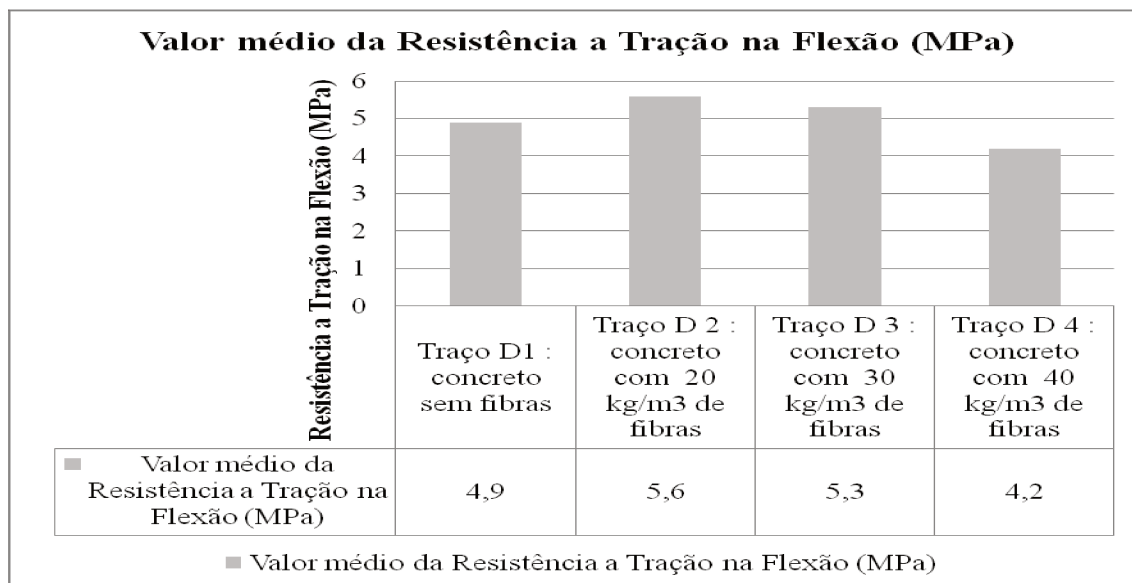


Figura 50: Valores médios da resistência à tração na flexão.

Observa-se que ocorreu um acréscimo na resistência com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras, mas quando se aumentou a dosagem para 30 e 40 kg/m<sup>3</sup>, ocorreu uma diminuição no valor da resistência, demonstrando que o valor ideal seria de 20 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3.3 Resistência à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão

Na Tabela 33 e Figura 51 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 33: Traço D 1 : concreto sem fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistencia à tração ( $f_{tmk}$ )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
10	10,00	10,00	30,00	1.060	10,39	48	4,8
11	10,00	10,00	30,00	1.140	11,17	51	5,1
12	10,00	10,00	30,00	1.240	12,15	56	5,6

$$f_{tmk} = \frac{1,5PL}{bh^2} \quad (11)$$

Onde:

$f_{tmk}$  = Resistência à tração na flexão com a carga aplicada no meio do vão;

P = Carga de ruptura;

L = vão entre os apoios;

b = largura do corpo de prova prismático;

h = altura do corpo de prova prismático.

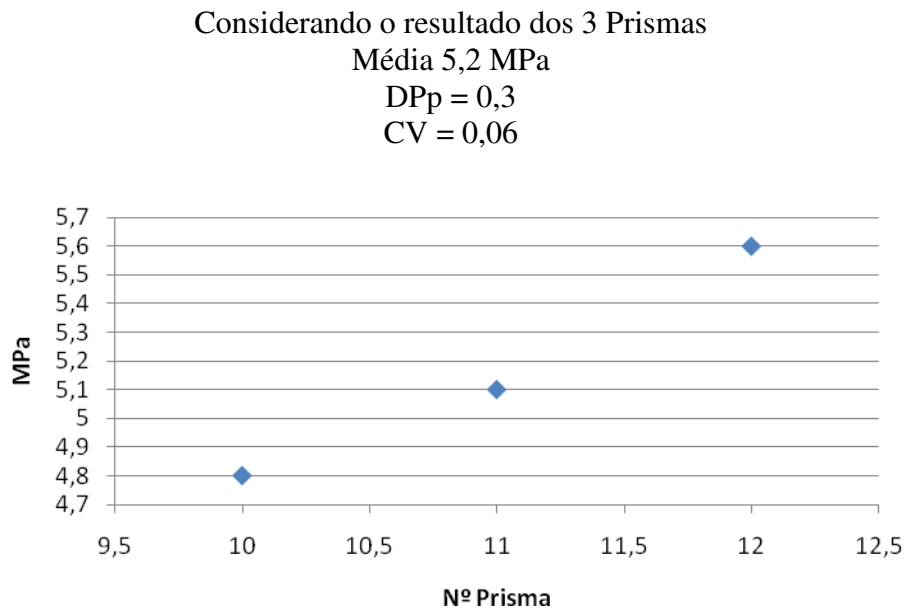


Figura 51: Gráfico do Traço D1 - Tração por Flexão no Meio do Vão

Na Tabela 34 e Figura 52 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 34: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistencia à tração ( $f_{tmk}$ )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
22	10,00	10,00	30,00	1.410	13,82	63	6,3
23	10,00	10,00	30,00	1.240	12,15	56	5,6
24	10,00	10,00	30,00	1.190	11,66	54	5,4

Considerando o resultado dos 3 Prismas

Média 5,8 MPa

DPp = 0,4

CV = 0,07

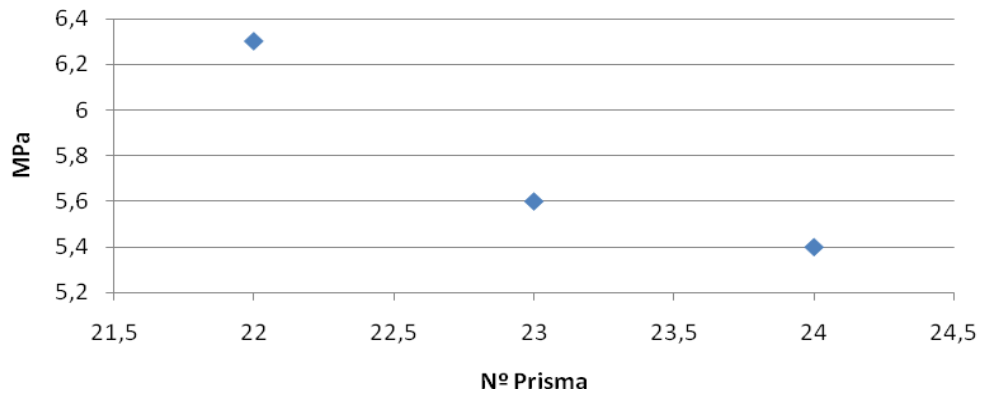


Figura 52: Gráfico do Traço D2 - Tração por Flexão no Meio do Vão

Na Tabela 35 e Figura 53 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 35: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m³ de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistencia à tração ( $f_{tmk}$ )	
						kgf/cm²	MPa
34	10,00	10,00	30,00	1.070	10,49	48	4,8
35	10,00	10,00	30,00	1.200	11,76	54	5,4
36	10,00	10,00	30,00	1.200	11,76	54	5,4

Considerando o resultado dos 3 Prismas

Média 5,2 MPa

DPp = 0,3

CV = 0,05

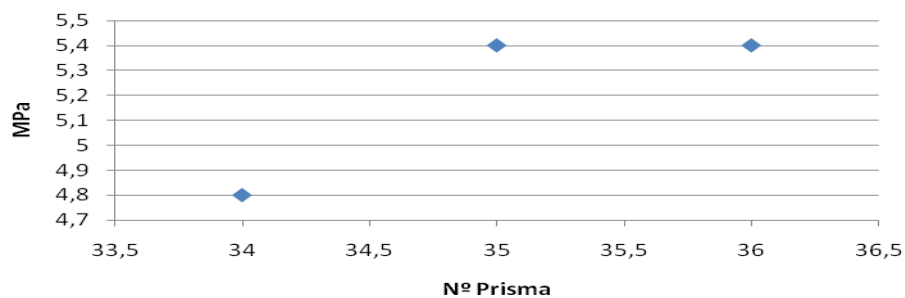


Figura 53: Gráfico do Traço D3 - Tração por Flexão no Meio do Vão

Na Tabela 36 e Figura 54 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 36: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras à tração por flexão, com carga aplicada no meio do vão

Prisma nº	b (cm)	h (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistencia à tração (f <sub>tmk</sub> )	
						kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
46	10,00	10,00	30,00	1.250	12,25	56	5,6
47	10,00	10,00	30,00	1.150	11,27	52	5,2
48	10,00	10,00	30,00	500	4,90	****	****

Considerando o resultado dos 2 Prismas

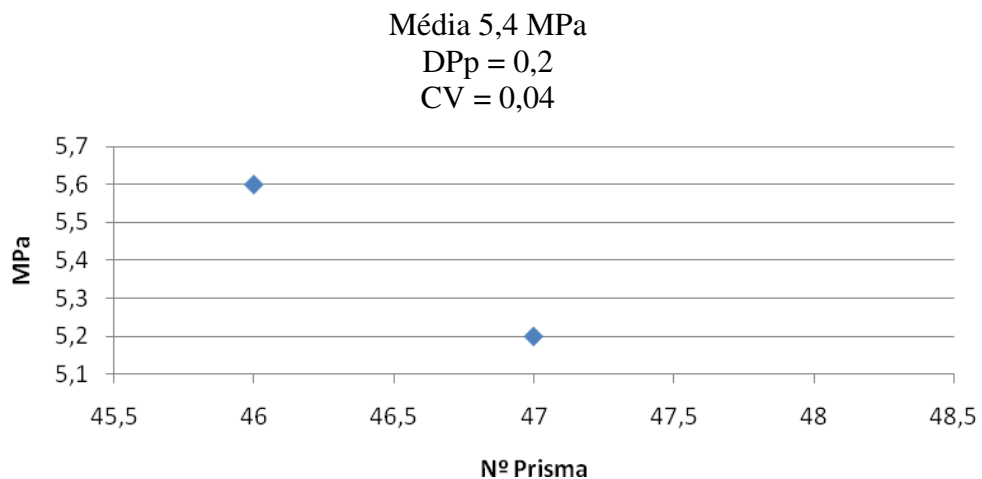


Figura 54: Gráfico do Traço D4 – Tração por Flexão no Meio do Vão

Na Tabela 37 estão apresentados os valores médios, desvio padrão e CV dos traços. Na Figura 55, os valores médios. Na Figura 56 é apresentado o comparativo da resistência à tração na flexão com a carga aplicada no terço dos vão e no centro do vão.

Tabela 37: Resumo da Tração por Flexão no Meio do Vão

Prisma	Média (MPa)	DPp (MPa)	CV
D1	5,2	0,3	0,06
D2	5,8	0,4	0,07
D3	5,2	0,3	0,05
D4	5,4	0,2	0,04

DPp = Desvio padrão;

CV = coeficiente de variação da amostra.

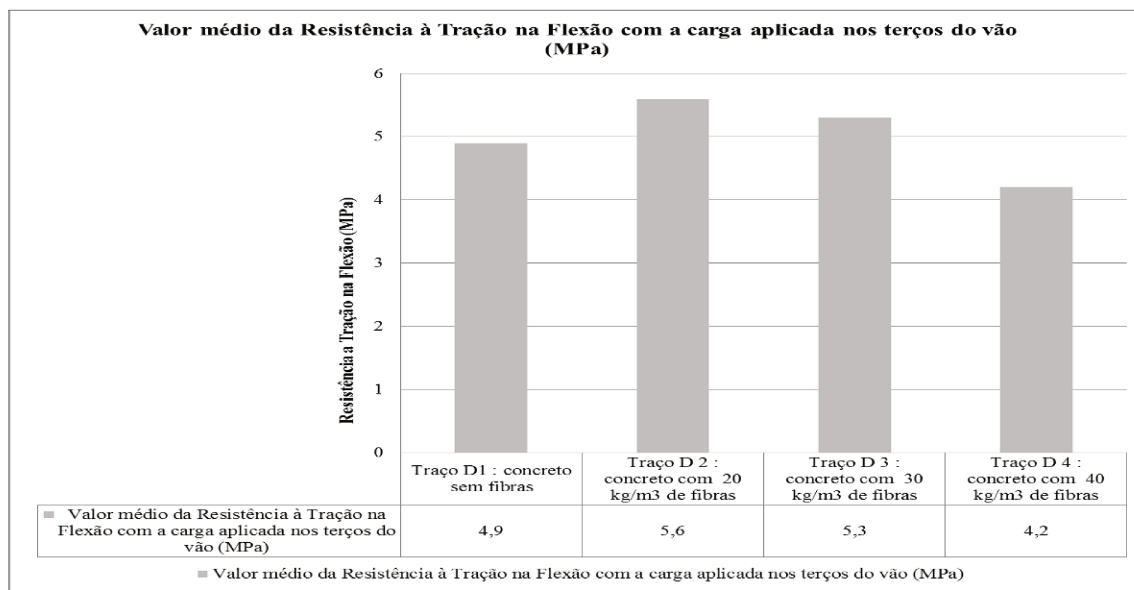


Figura 55 Valor médio da resistência à tração na flexão com a carga no centro do vão

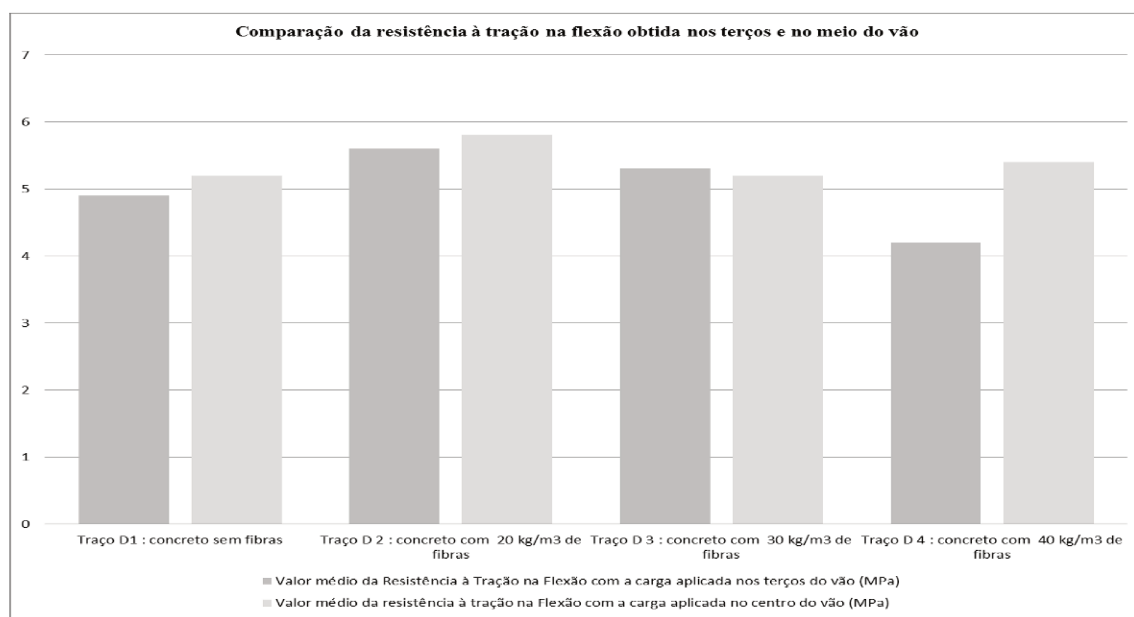


Figura 56: Comparação entre as resistências obtidas na tração na flexão com a carga aplicada nos terços dos vão e no centro

Observa-se que os maiores valores ocorreram com a carga aplicada nos terços do vão, o que pode ser justificado pela adição das fibras de aço, que no caso do ensaio com dois cutelos, terá a contribuição das fibras nos dois pontos solicitados. Verificou-se a maior resistência ocorreu para a dosagem de 20 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 38 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 38: Traço D 1 : concreto sem fibras - à tração por compressão diametral

Corpo de prova nº	Diâmetro D (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência ( $f_{t,D}$ )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
13	10,00	20,00	11.000	107,8	35	3,5
14	10,00	20,00	11.100	108,78	35	3,5
15	10,00	20,00	10.000	98,00	32	3,2
16	10,00	20,00	9.800	96,04	31	3,1
17	10,00	20,00	9.500	93,10	30	3,0
18	10,00	20,00	11.400	111,72	36	3,6
19	10,00	20,00	10.200	99,96	32	3,2
20	10,00	20,00	12.800	125,44	41	4,1
21	10,00	20,00	12.800	125,44	41	4,1
22	10,00	20,00	10.300	100,94	33	3,3
23	10,00	20,00	11.800	115,64	38	3,8
24	10,00	20,00	9.000	88,20	29	2,9

$$f_{t,D} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (11)$$

Onde:

$f_{t,D}$  = resistência à tração por compressão diametral;

P = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

L = comprimento do corpo de prova.

Na Figura 57 estão apresentados os resultados da resistência à tração por compressão diametral.

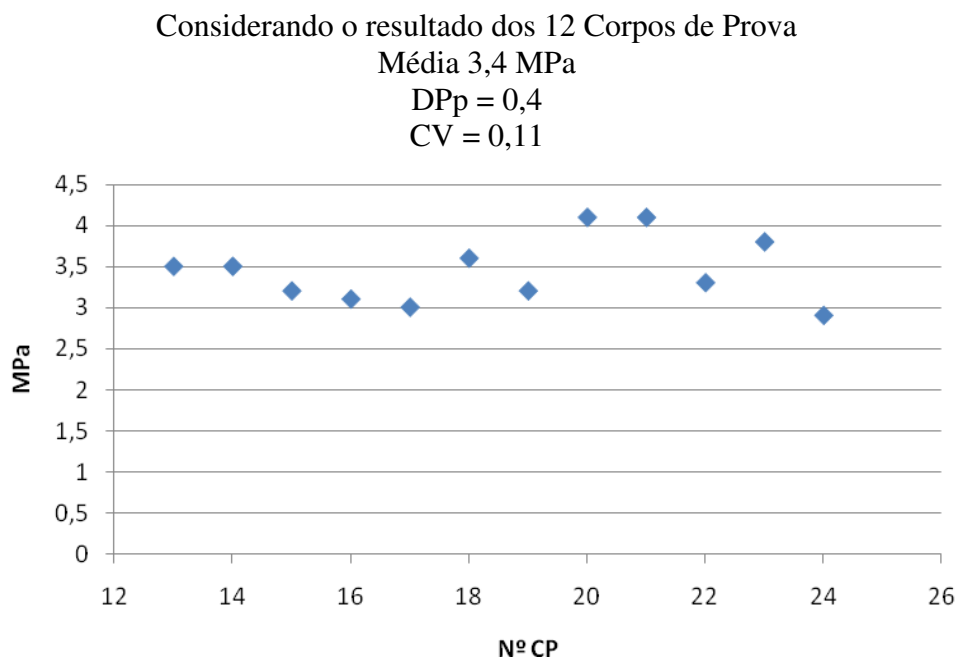


Figura 57: Gráfico do Traço D1 - Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 39 e Figura 58 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 39: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras- à tração por compressão diametral

Corpo de prova nº	Diâmetro D (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência (f <sub>t,D</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
45	10,00	20,00	8.250	80,85	26,0	2,6
46	10,00	20,00	10.000	98,00	32,0	3,2
47	10,00	20,00	8.920	97,42	28,0	2,8
48	10,00	20,00	9.860	96,63	31,0	3,1
49	10,00	20,00	12.050	118,09	38,0	3,8
50	10,00	20,00	7.960	78,00	25,0	2,5
51	10,00	20,00	8.250	80,85	26,0	2,6
52	10,00	20,00	8.640	84,67	28,0	2,8
53	10,00	20,00	12.320	120,74	39,0	3,9
54	10,00	20,00	9.850	96,53	31,0	3,1
55	10,00	20,00	9.560	93,69	30,0	3,0
56	10,00	20,00	10.250	100,45	33,0	3,3

Considerando o resultado dos 12 Corpos de Prova

Média 3,1 MPa

DPp = 0,4

CV = 0,14

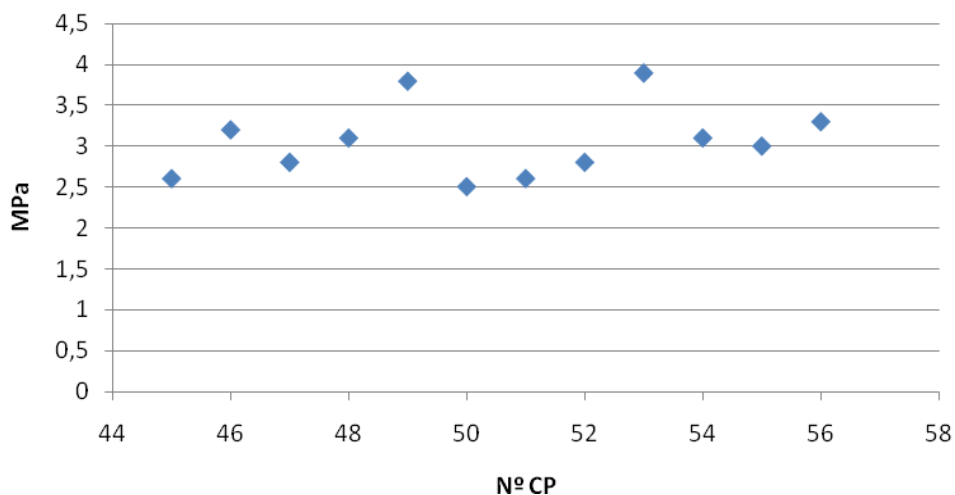


Figura 58: Gráfico do Traço D2 - Tração por Compressão Diametral



Na Tabela 40 e Figura 59 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 40: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras - à tração por compressão diametral

Corpo de prova nº	Diâmetro D (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência (f <sub>t,D</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
71	10,00	20,00	11.200	109,76	36	3,6
72	10,00	20,00	11.500	112,70	37	3,7
73	10,00	20,00	13.900	136,22	44	4,4
74	10,00	20,00	12.100	118,58	39	3,9
75	10,00	20,00	14.400	141,12	46	4,6
76	10,00	20,00	14.400	141,12	46	4,6
77	10,00	20,00	12.400	121,52	39	3,9
78	10,00	20,00	14.400	141,12	46	4,6
79	10,00	20,00	15.900	155,82	51	5,1
80	10,00	20,00	13.500	132,30	43	4,3
81	10,00	20,00	14.200	139,16	45	4,5
82	10,00	20,00	14.300	140,14	45	4,5

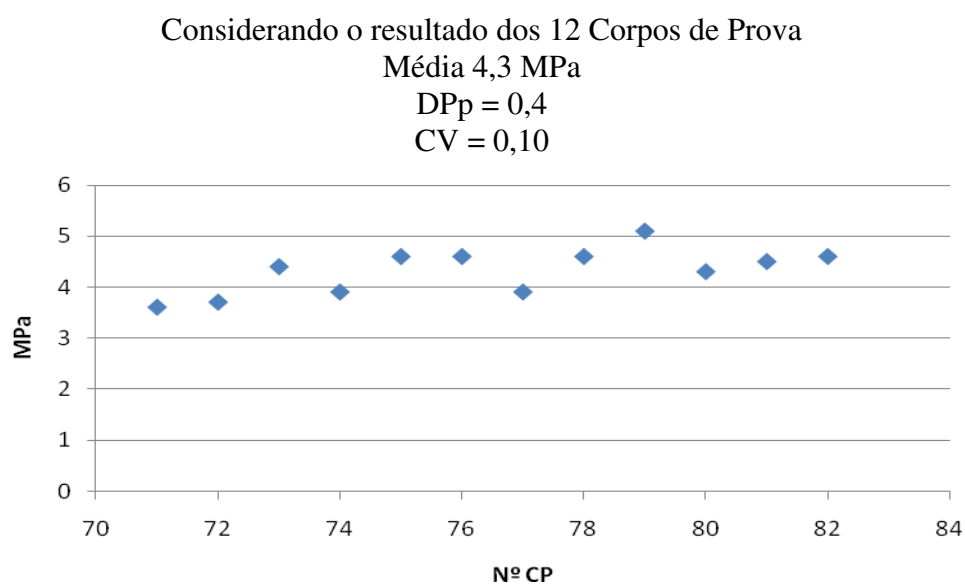


Figura 59: Gráfico do Traço D3 - Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 41 e Figura 60 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 41: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras- à tração por compressão diametral

Corpo de prova nº	Diâmetro D (cm)	L (cm)	Carga de ruptura (kgf) P	Carga de ruptura (kN) P	Resistência (f <sub>t,D</sub> )	
					kgf/cm <sup>2</sup>	MPa
100	10,00	20,00	13.700	134,26	44	4,4
101	10,00	20,00	13.750	134,75	44	4,4
102	10,00	20,00	13.700	134,26	44	4,4
103	10,00	20,00	13.800	135,24	44	4,4
104	10,00	20,00	14.800	145,04	47	4,7
105	10,00	20,00	13.700	134,26	44	4,4
106	10,00	20,00	14.600	143,08	47	4,7
107	10,00	20,00	14.450	141,61	46	4,6
108	10,00	20,00	14.100	138,18	45	4,5
109	10,00	20,00	13.900	136,22	44	4,4
110	10,00	20,00	12.900	126,42	41	4,1
111	10,00	20,00	13.900	136,22	44	4,4

Considerando o resultado dos 12 Corpos de Prova

Média 4,5 MPa

DPp = 0,2

CV = 0,03

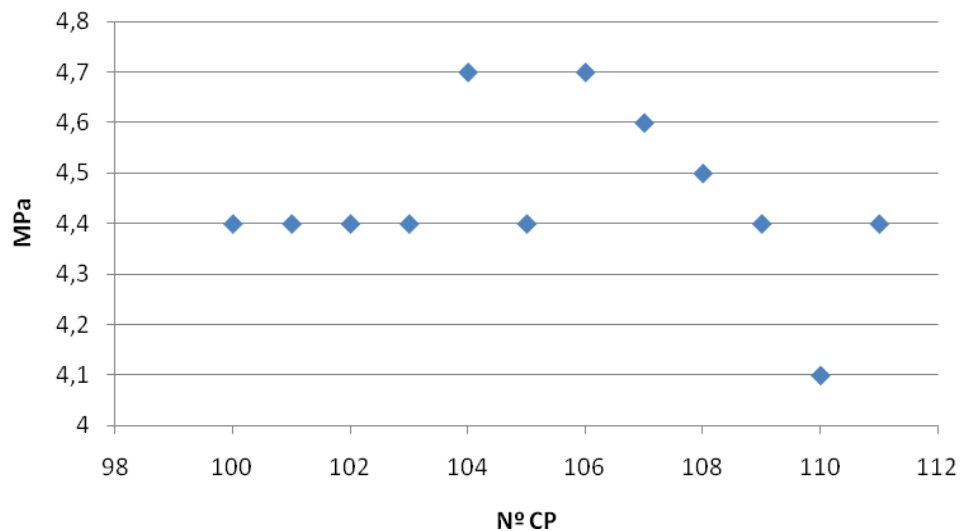


Figura 60: Gráfico do Traço D4 - Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 42 estão apresentados os valores médios, desvio padrão e CV para os quatro traços.

Tabela 42: Resumo da Tração por Compressão Diametral

Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (Dpp) (MPa)	Coef. Variação (CV)
Traço D1	3,4	0,4	0,11
Traço D2	4,3	0,4	0,10
Traço D3	4,3	0,4	0,10
Traço D4	4,5	0,2	0,03

Dpp = Desvio padrão;

CV = coeficiente de variação da amostra

Na Figura 61 estão apresentados os valores médios da resistência à tração por compressão diametral.

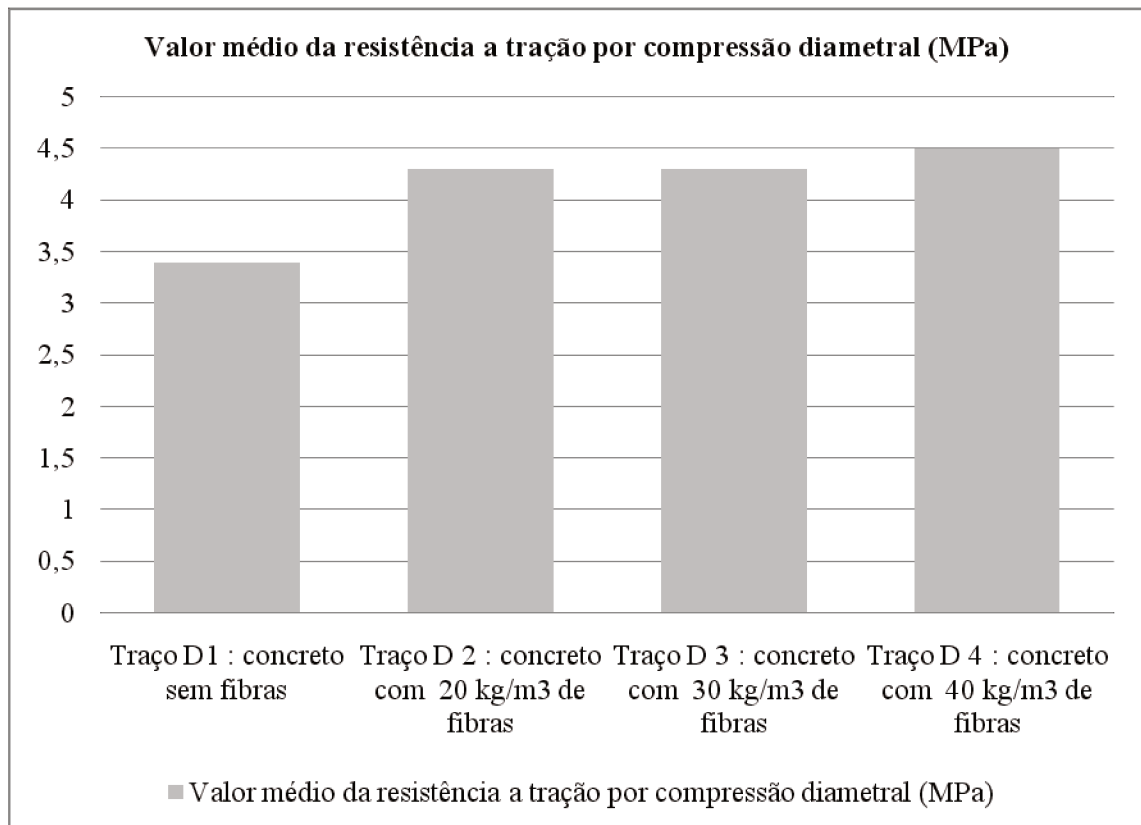


Figura 61: Valor médio da resistência à tração por compressão diametral

Observa-se que houve um acréscimo da resistência à tração por compressão diametral conforme se aumentou a dosagem de fibras.

### 5.2.3.5 Determinação do módulo de elasticidade do concreto

Na Tabela 43 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 43: Traço D1 : concreto sem fibras - módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 25

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 21.700 kgf (212,66 kN)

Estágio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6} \text{ m}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.600	28	25	26,5
3	400	4	3	3,5
4	0,4 Pmax. 8.600	26	28	27,0
5	400	4	3	3,5
6	0,4 Pmax. 8.600	26	28	27,0
7	400	4	3	$\Delta l_7 = 3,5$
8	0,4 Pmax. 8.600	26	28	$\Delta l_8 = 27,0$
9 Ruptura	22.500			
E				44,4 GPa

$$E = \frac{(\sigma_8 - \sigma_7) x l_0}{(\Delta l_8 - \Delta l_7)} \quad (12)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade estático em GPa;

$\sigma_8$  = tensão no estágio 8;

$\sigma_7$  = tensão no estágio 7;

$l_0$  = 0,10m;

$\Delta l_8$  = deslocamento no estágio 8;

$\Delta l_7$  = deslocamento no estágio 7.

Na Tabela 44 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 44: Traço D1 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 26

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 21.700 kgf (212,66 kN)

Estágio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.600	17	39	28,0
3	400	3	4	3,5
4	0,4 Pmax. 8.600	14	44	29,0
5	400	3	4	3,7
6	0,4 Pmax. 8.600	15	44	29,5
7	400	3	4	$\Delta l_7 = 3,7$
8	0,4 Pmax. 8.600	15	44	$\Delta l_8 = 29,5$
9 Ruptura	23.600			
E				40,5 GPa

Na Tabela 45 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 45: Traço D1 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 27

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 21.700 kgf (212,66 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.600	27	26	26,5
3	400	3	4	3,5
4	0,4 Pmax. 8.600	27	29	28,0
5	400	3	4	3,5
6	0,4 Pmax. 8.600	27	29	28,0
7	400	3	4	$\Delta l_7 = 3,5$
8	0,4 Pmax. 8.600	27	29	$\Delta l_8 = 28,0$
9 Ruptura	20.800			
E				42,6 GPa

Na Figura 62 estão apresentados os resultados para o traço D1.

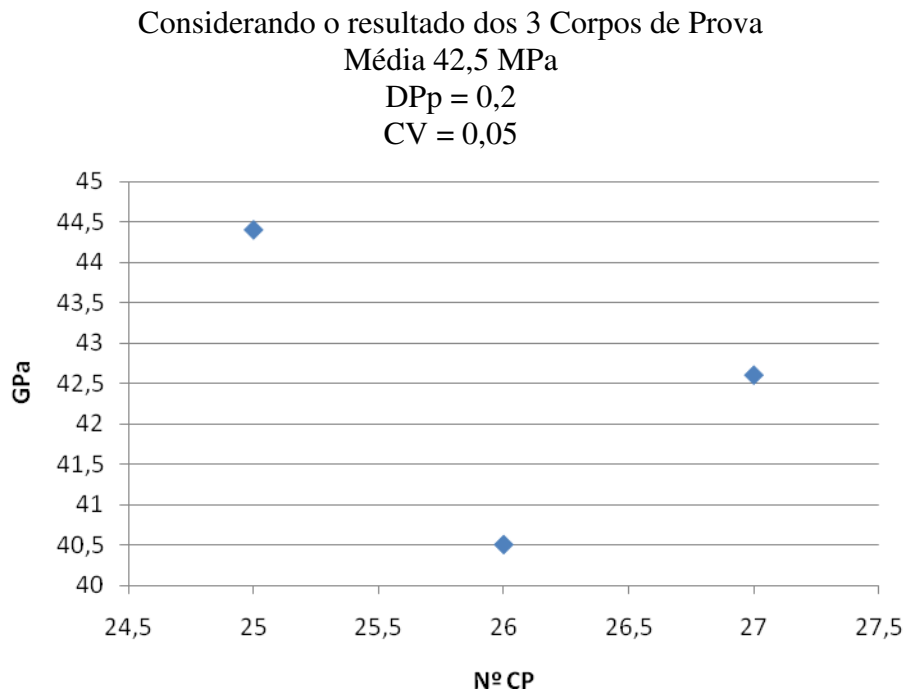


Figura 62: Gráfico do Traço D1 - Módulo de Elasticidade

Na Tabela 46 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 46: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m³ de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 42

Diâmetro médio : 10,00 cm

Área : 78,54 cm²

Carga máxima estimada à compressão : 23.000 kgf (225,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.000	17	33	25
3	400	3	2	2,5
4	0,4 Pmax. 8.000	21	28	24,5
5	400	4	2	3,0
6	0,4 Pmax. 8.000	23	28	25,5
7	400	4	1	$\Delta l_7 = 2,5$
8	0,4 Pmax. 8.000	25	27	$\Delta l_8 = 26,0$
9 Ruptura	23.600			
E				41,2 GPa

Na Tabela 47 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 47: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 43

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão : 23.000 kgf (225,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.000	53	4	28,5
3	400	13	14	8,5
4	0,4 Pmax. 8.000	50	8	29,0
5	400	14	4	9,0
6	0,4 Pmax. 8.000	50	14	32,0
7	400	14	4	$\Delta l_7 = 9,0$
8	0,4 Pmax. 8.000	50	14	$\Delta l_8 = 32,0$
9 Ruptura	19.600			
E				32,0 GPa

Na Tabela 48 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 48: Traço D 2: concreto com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 44

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 23.000 kgf (225,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 8.000	39	20	29,5
3	400	6	3	4,5
4	0,4 Pmax. 8.000	35	25	30,0
5	400	7	4	5,5
6	0,4 Pmax. 8.000	34	24	29,0
7	400	8	4	$\Delta l_7 = 6,0$
8	0,4 Pmax. 8.000	34	24	$\Delta l_8 = 29,0$
9 Ruptura	25.500			
E				42,1 Gpa

Na Figura 63 estão representados graficamente os valores obtidos para o traço D2.

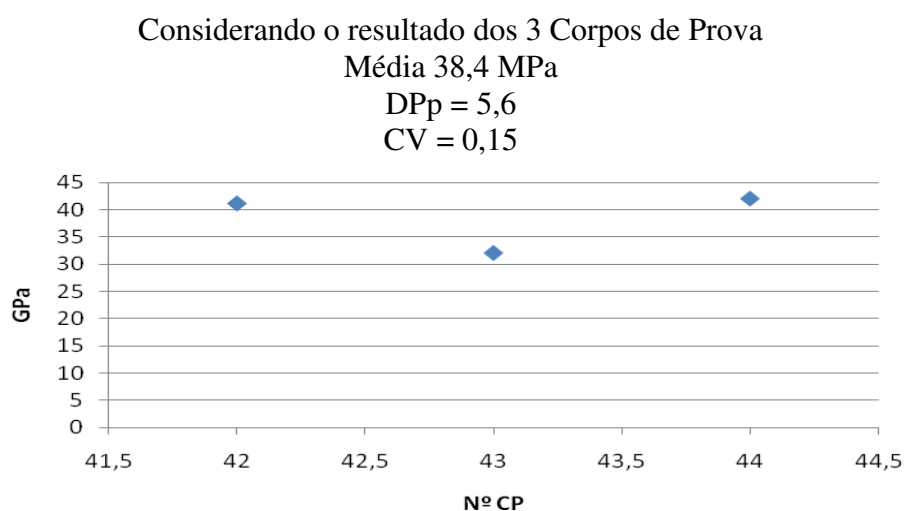


Figura 63: Gráfico do Traço D2 - Módulo de Elasticidade



Na Tabela 49 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 49: Traço D 3: concreto com 30 kg de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 83

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 27.000 kgf (264,60 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 10.000	17	38	27,5
3	400	2	2	2,0
4	0,4 Pmax. 10.000	19	38	28,5
5	400	3	2	2,5
6	0,4 Pmax. 10.000	19	38	28,5
7	400	3	2	$\Delta l_7 = 2,5$
8	0,4 Pmax. 10.000	19	38	$\Delta l_8 = 28,5$
9 Ruptura	24.300			
E				47,0 GPa

Na Tabela 50 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 50: Traço D 3: concreto com 30 kg de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 84

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 25.000 kgf (245,00 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 10.000	14	44	29,0
3	400	7	5	6,0
4	0,4 Pmax. 10.000	17	42	29,5
5	400	11	9	10,0
6	0,4 Pmax. 10.000	20	40	30,0
7	400	14	10	$\Delta l_7 = 12,0$
8	0,4 Pmax. 10.000	21	39	$\Delta l_8 = 30,0$
9 Ruptura	24.000			
E				67,9 GPa

Na Tabela 51 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 51: Traço D 3: concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 85

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 27.000 kgf (264,60 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 10.000	20	40	30,0
3	400	4	0	2,0
4	0,4 Pmax. 10.000	23	35	29,0
5	400	5	2	3,5
6	0,4 Pmax. 10.000	22	35	28,5
7	400	6	2	$\Delta l_7 = 4,0$
8	0,4 Pmax. 10.000	23	5	$\Delta l_8 = 14,0$
9 Ruptura	26.400			
E				48,9 GPa

Na Figura 64 estão apresentados os resultados graficamente. Na Figura 65 foi representado o gráfico descartando o corpo de prova 84. Observa-se que tanto o desvio padrão como o CV deram valores bem mais aceitáveis.

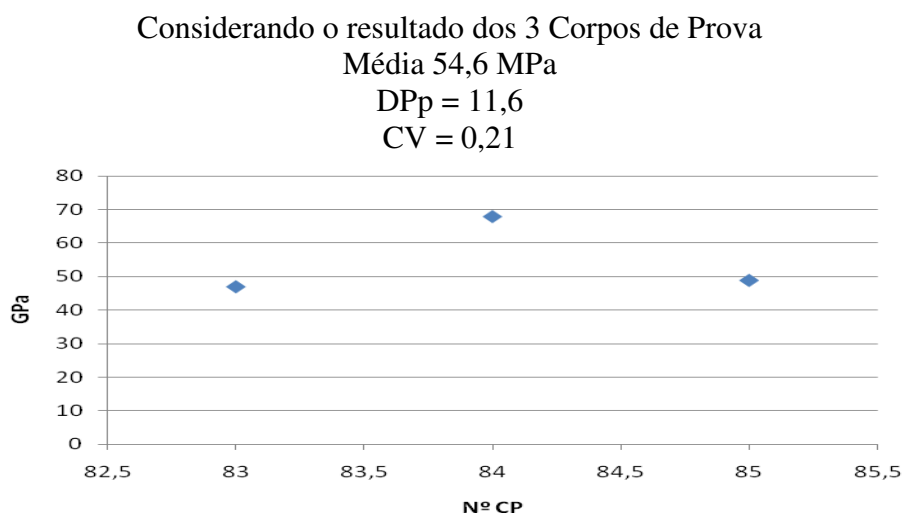


Figura 64: Gráfico do Traço D3 - Módulo de Elasticidade

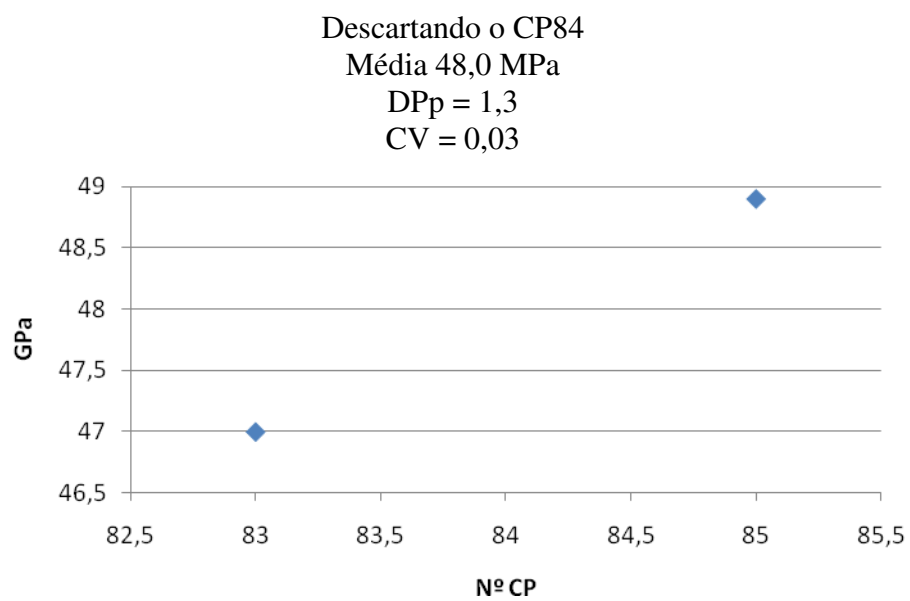


Figura 65: Gráfico do Traço D3 – Módulo de Elasticidade

Na Tabela 52 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 52: Traço D 4: concreto com 40 kgf/m<sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova n° 112

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 28.000 kgf (274,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 11.000	35	21	28,0
3	400	6	10	8,0
4	0,4 Pmax. 11.000	28	28	28,0
5	400	7	12	9,5
6	0,4 Pmax. 11.000	26	29	23,0
7	400	12	13	$\Delta l_7 = 12,5$
8	0,4 Pmax. 11.000	25	30	$\Delta l_8 = 27,5$
9 Ruptura	30.000			
E				90,0 GPa

Na Tabela 53 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 53: Traço D4 : concreto sem fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova n° 113

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 28.000 kgf (274,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 11.000	43	27	35,0
3	400	8	7	7,5
4	0,4 Pmax. 11.000	36	34	35,0
5	400	4	10	7,0
6	0,4 Pmax. 11.000	34	35	34,5
7	400	5	11	$\Delta l_7 = 8,0$
8	0,4 Pmax. 11.000	34	35	$\Delta l_8 = 34,5$
9 Ruptura	28.100			
E				50,9 GPa

Na Tabela 54 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 54: Traço D4: concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras- módulo de elasticidade

Corpo de prova nº 114

Diâmetro médio: 10,00 cm

Área: 78,54 cm<sup>2</sup>

Carga máxima estimada à compressão: 28.000 kgf (274,40 kN)

Estagio	Carga (kgf)	Leitura 1 (após 60 s)	Leitura 2 (após 60 s)	Leitura media $\Delta l \times 10^{-6}$
1	400	0	0	0
2	0,4 Pmax. 11.000	19	40	29,5
3	400	4	4	4,0
4	0,4 Pmax. 11.000	19	40	29,5
5	400	4	3	3,5
6	0,4 Pmax. 11.000	19	40	29,5
7	400	4	4	$\Delta l_7 = 4,0$
8	0,4 Pmax. 11.000	19	40	$\Delta l_8 = 29,5$
9 Ruptura	29.200			
E				52,9 GPa

Na Figura 66 os resultados estão representados graficamente. Na Figura 67, descartou-se o corpo de prova 112 e tanto o desvio padrão como o CV deram aceitáveis. Na Tabela 55 e Figura 71 estão apresentados os valores médios, os desvios-padrão e o CV para os traços.

Considerando o resultado dos três corpos de prova

Média 64,4 MPa

DPp = 22,0

CV = 0,34

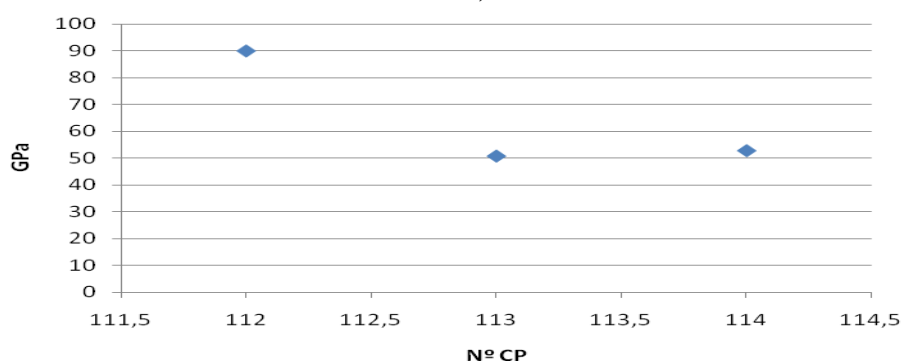


Figura 66: Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade

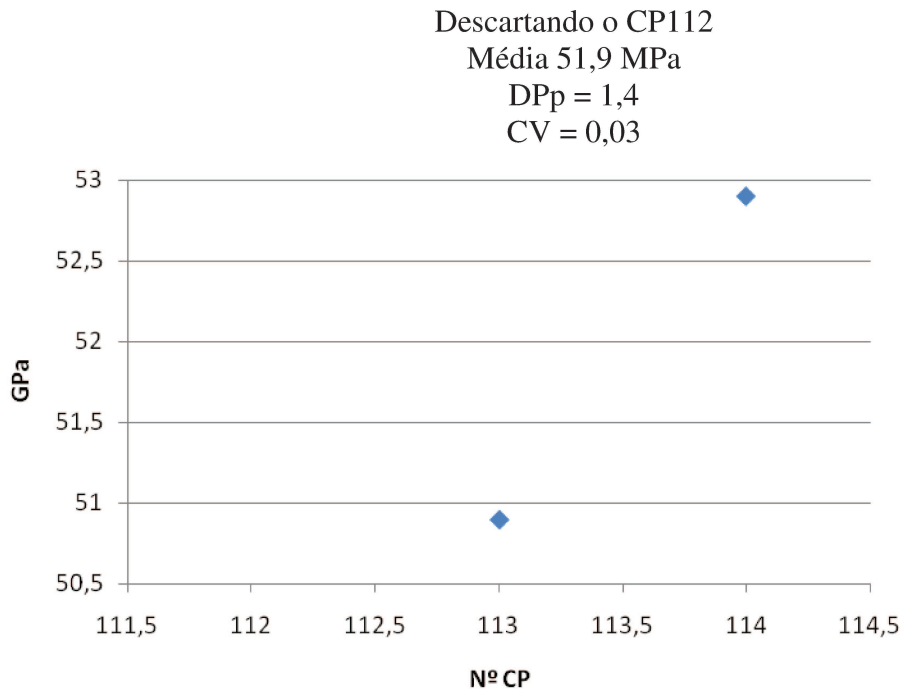


Figura 67: Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade

Tabela 55: Resumo do Módulo de Elasticidade (GPa)

Prisma	Média	DPp	CV
D1	42,5	2,0	0,05
D2	38,4	5,6	0,15
D3	48,0	1,3	0,03
D4	51,9	1,4	0,03

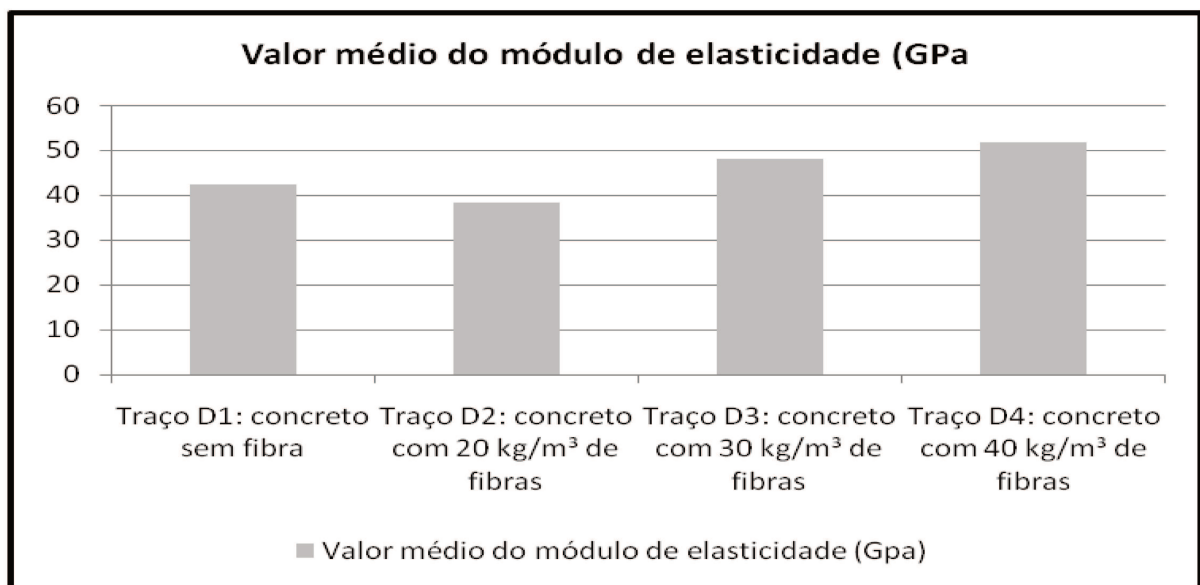


Figura 68: Valores médios do Módulo de elasticidade

Observa-se que houve um aumento no valor do módulo conforme se aumentou a dosagem de fibras de aço.

### 5.2.3.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Tabela 56 e Figura 69 estão apresentados os resultados do traço D1.

Tabela 56: Traço D 1 : concreto sem fibras - Módulo de elasticidade dinâmico

CP nº	Massa Específica (kg/m³)	Altura (cm)	Tempo de percurso da onda (µs)	Velocidade (m/s)	Modulo de elasticidade dinâmico (GPa)
01	2.489	20,0	42,3	4.728	55,5
02	2.489	20,0	44,1	4.535	51,1
03	2.489	20,0	44,5	4.686	54,5
04	2.489	20,0	43,8	4.566	51,8
05	2.489	20,0	42,8	4.644	54,7
06	2.489	20,0	43,2	4.629	53,2
07	2.489	20,0	43,6	4.587	52,3
08	2.489	20,0	42,9	4.662	54,0
09	2.489	20,0	43,6	4.587	52,3
10	2.489	20,0	43,1	4.640	53,5
11	2.489	20,0	43,9	4.566	51,8
12	2.489	20,0	43,7	4.576	52,0
25	2.489	20,0	43,7	4.576	52,0
26	2.489	20,0	43,9	4.555	51,5
27	2.489	20,0	43,3	4.615	53,0

Considerando o resultado dos 15 Corpos de Prova

Média 52,9 GPa

DPp = 1,3

CV = 0,02

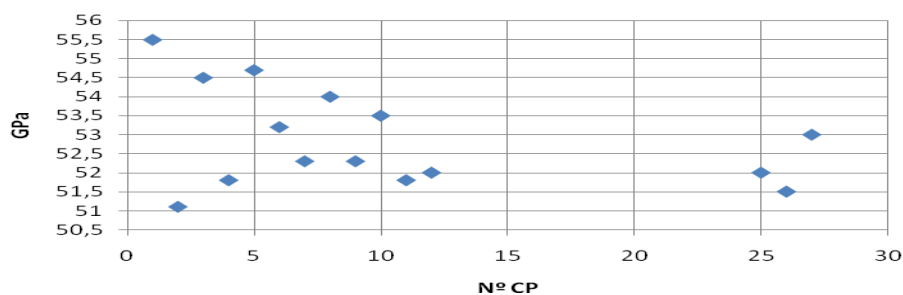


Figura 69: Gráfico do Traço D1 - Módulo de Elasticidade Dinâmico

Na Tabela 57 e Figura 70 estão apresentados os resultados do traço D2.

Tabela 57: Traço D 2 : concreto com 20 kg/m³ de fibras- Modulo de elasticidade dinâmico

CP nº	Massa Especifica (kg/m³)	Altura (cm)	Tempo de percurso da onda (µs)	Velocidade (m/s)	Modulo de elasticidade dinâmico (GPa)
30	2.489	20,00	43,1	4.640	53,5
31	2.489	20,00	42,4	4.716	55,2
32	2.489	20,00	44,0	4.545	51,3
33	2.489	20,00	42,8	4.672	54,2
34	2.489	20,00	42,7	4.683	54,5
35	2.489	20,00	43,3	4.618	53,0
36	2.489	20,00	42,8	4.672	54,2
37	2.489	20,00	43,5	4.597	52,5
38	2.489	20,00	43,2	4.629	53,2
39	2.489	20,00	42,4	4.716	55,2
40	2.489	20,00	42,3	4.728	55,5
41	2.489	20,00	43,5	4.597	52,5
42	2.489	20,00	42,5	4.597	52,5
43	2.489	20,00	43,6	4.587	52,3
44	2.489	20,00	43,8	4.566	51,8

Considerando o resultado dos 15 Corpos de Prova

Média 53,4 GPa

DPp = 1,3

CV = 0,02

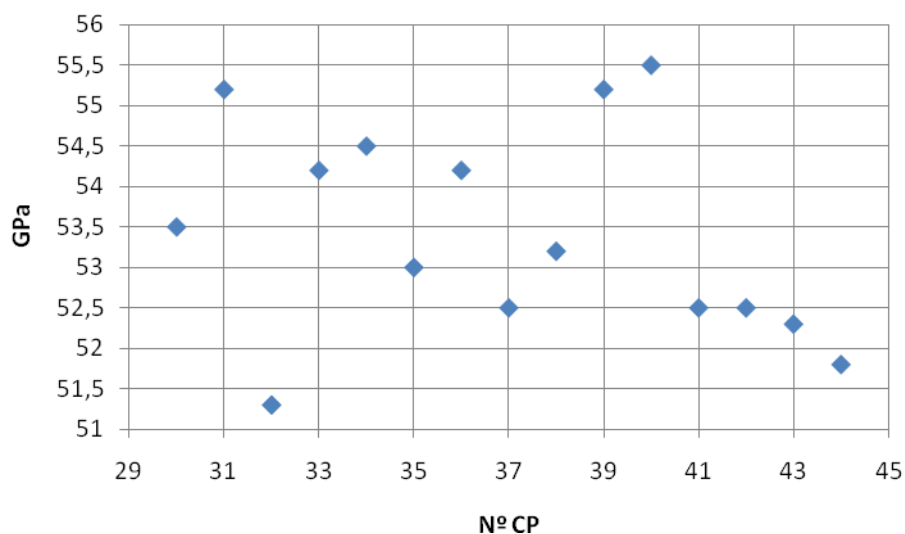


Figura 70: Gráfico do Traço D2 - Módulo de Elasticidade Dinâmico



Na Tabela 58 e Figura 71 estão apresentados os resultados do traço D3.

Tabela 58: Traço D 3 : concreto com 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras - Modulo de elasticidade dinâmico

CP nº	Massa Especifica (kg/m <sup>3</sup> )	Altura (cm)	Tempo de percurso da onda (µs)	Velocidade (m/s)	Modulo de elasticidade dinâmico (GPa)
59	2.506	20,00	50,3	3.976	39,5
60	2.506	20,00	44,8	4.464	49,8
61	2.506	20,00	44,7	4.474	50,1
62	2.506	20,00	46,5	4.301	46,3
63	2.506	20,00	48,7	4.106	42,2
64	2.506	20,00	47,6	4.201	44,1
65	2.506	20,00	46,1	4.338	47,1
66	2.506	20,00	45,1	4.434	49,2
67	2.506	20,00	46,6	4.291	46,0
68	2.506	20,00	47,1	4.246	45,1
69	2.506	20,00	44,9	4.454	50,1
70	2.506	20,00	44,3	4.514	51,0
83	2.506	20,00	48,7	4.108	42,2
84	2.506	20,00	44,7	4.423	50,1
85	2.506	20,00	44,8	4.464	49,6

Considerando o resultado dos 15 Corpos de Prova

Média 46,8 GPa

DPp = 3,5

CV = 0,07

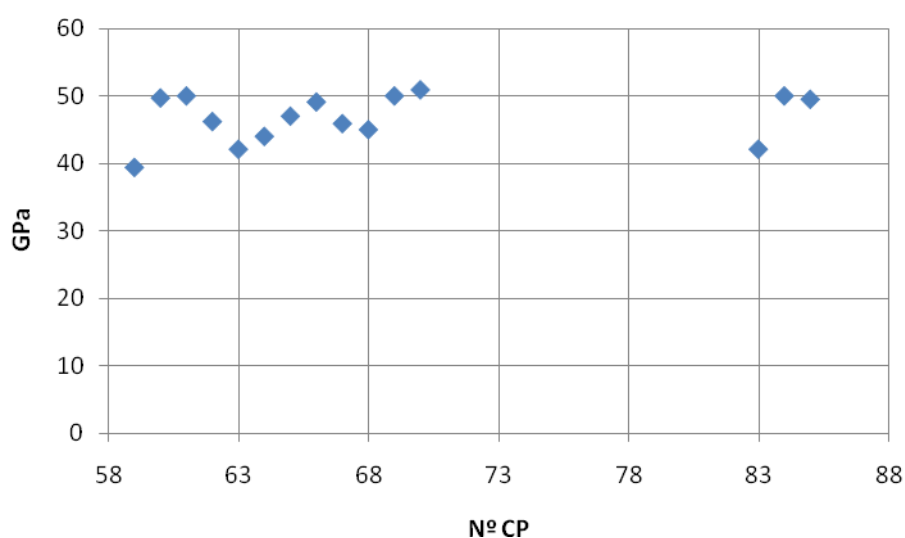


Figura 71: Gráfico do Traço D3 - Módulo de Elasticidade Dinâmico

Na Tabela 59 e Figura 72 estão apresentados os resultados do traço D4.

Tabela 59: Traço D 4 : concreto com 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras- Módulo de elasticidade dinâmico

CP nº	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Altura (cm)	Tempo de percurso da onda (µs)	Velocidade (m/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
88	2.506	20,00	45,2	4.424	48,9
89	2.506	20,00	47,3	4.228	44,7
90	2.506	20,00	43,2	4.629	53,6
91	2.506	20,00	49,2	4.065	41,3
92	2.506	20,00	43,0	4.651	54,1
93	2.506	20,00	46,4	4.310	46,5
94	2.506	20,00	45,2	4.424	48,9
95	2.506	20,00	46,1	4.338	47,1
96	2.506	20,00	46,4	4.310	46,5
97	2.506	20,00	44,6	4.484	50,3
98	2.506	20,00	44,5	4.494	50,5
99	2.506	20,00	45,0	4.444	49,4
112	2.506	20,00	43,0	4.651	54,1
113	2.506	20,00	47,6	4.201	44,1
114	2.506	20,00	45,9	4.357	47,5

Considerando o resultado dos 15 Corpos de Prova

Média 48,5 GPa

DPp = 3,6

CV = 0,07

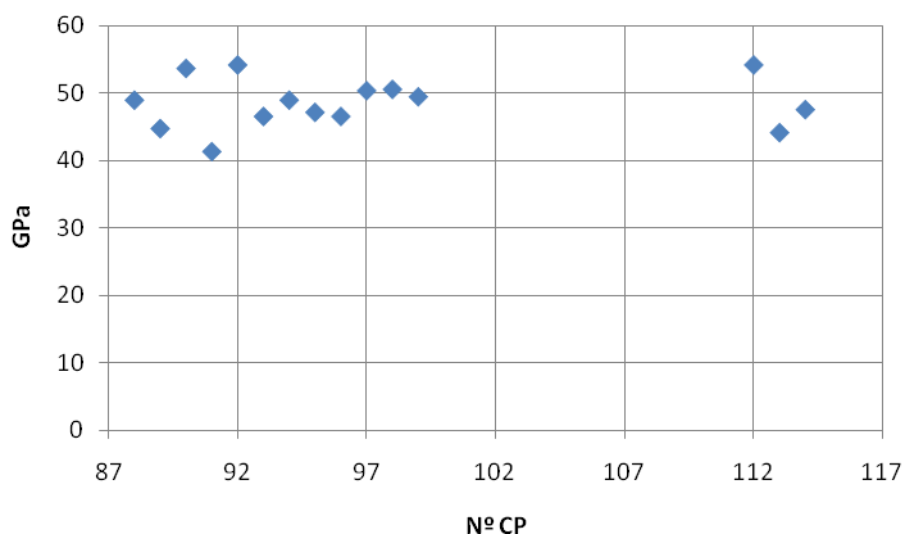


Figura 72 :Gráfico do Traço D4 - Módulo de Elasticidade Dinâmico

Na Tabela 60 estão apresentados os valores médios, o desvio padrão e o CV dos diversos traços. Na Figura 73 está apresentado o valor médio do Módulo de Elasticidade Dinâmico para cada traço.

Tabela 60: Resumo do Módulo de Elasticidade Dinâmico

Prisma	Média	DPp	CV
D1	52,9	1,3	0,02
D2	53,4	1,3	0,02
D3	46,8	3,5	0,07
D4	48,5	3,6	0,07

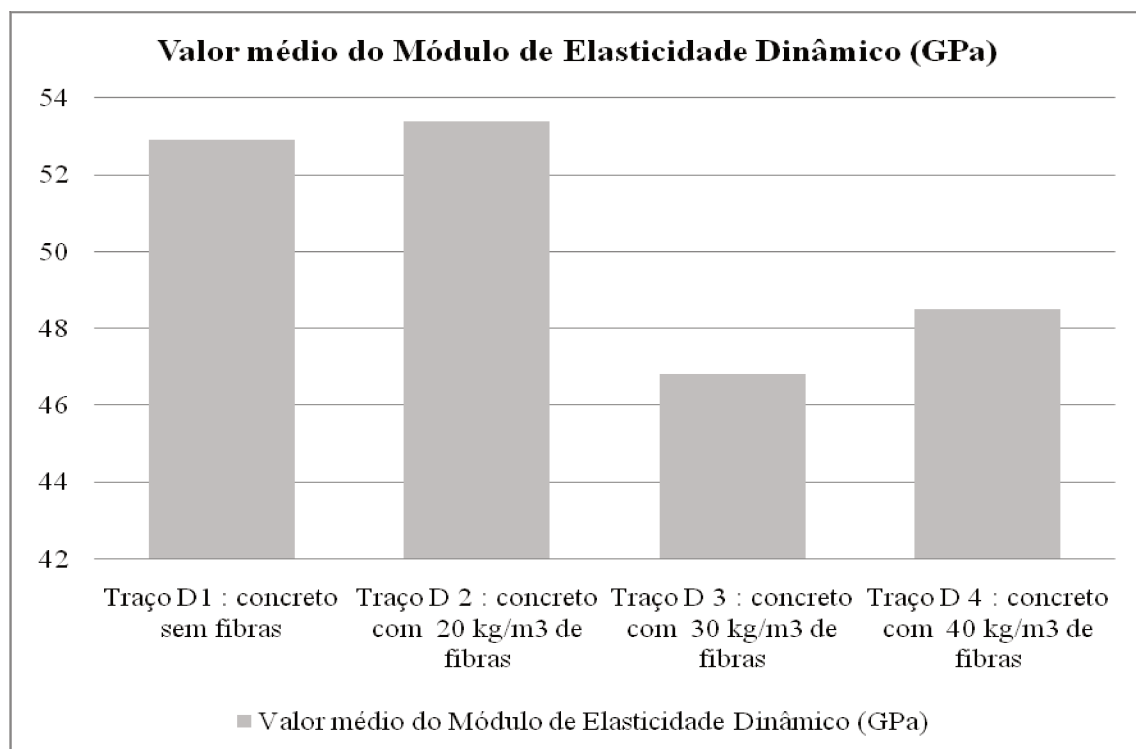


Figura 73: Valor médio do Módulo de Elasticidade Dinâmico para cada traço.

Observa-se que o melhor desempenho se deu para a dosagem de 20 kg/m<sup>3</sup>.

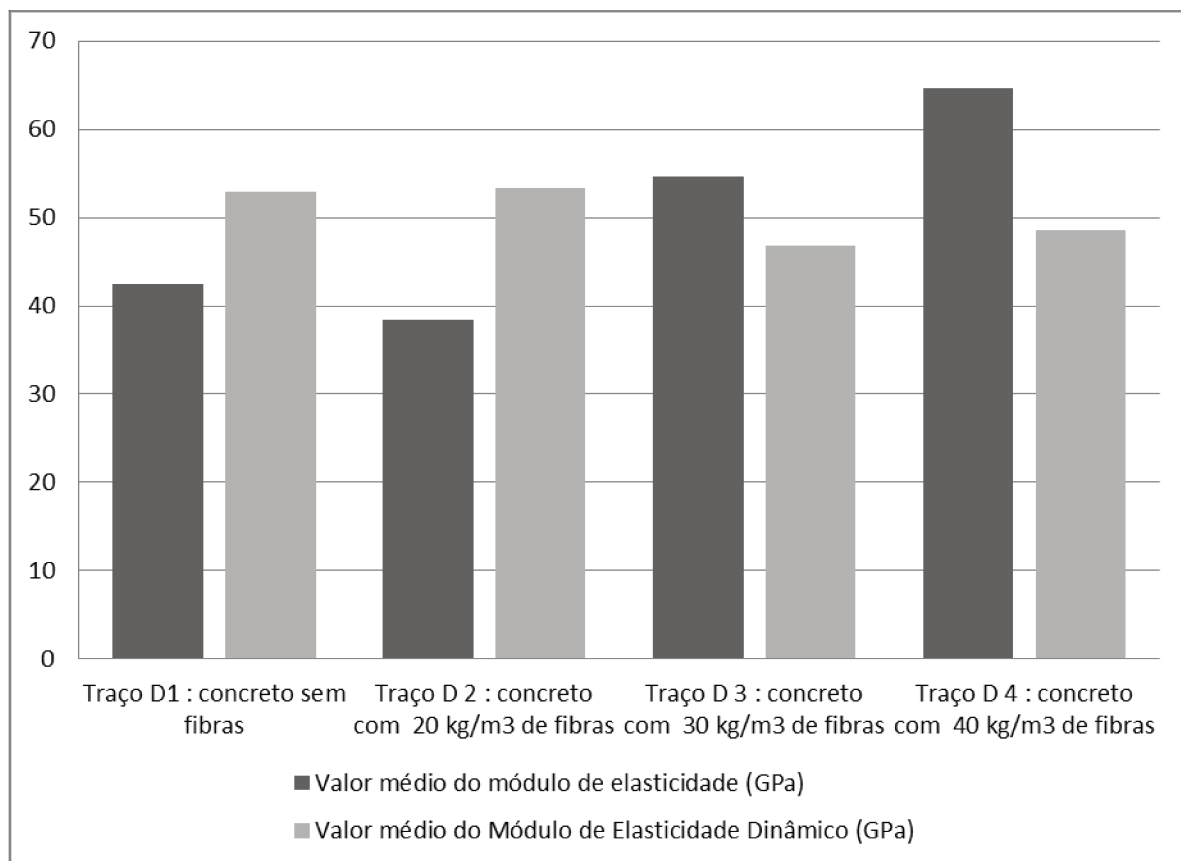


Figura 74 Valores médios do módulo de elasticidade e dinâmico

Observa-se que até a dosagem de  $20\text{kg/m}^3$ , o valor do módulo de elasticidade dinâmico foi superior ao obtido usualmente, sendo que para as dosagens de  $30\text{kg/m}^3$  e  $40\text{kg/m}^3$  houve uma inversão. Notou-se que o valor do módulo de elasticidade dinâmico praticamente não variou do concreto sem fibras para  $20\text{kg/m}^3$  e então sofreu um acréscimo linear.

Na tabela 61 está apresentado o resumo dos resultados dos ensaios realizados. São apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação da amostra (CV).

Tabela 61: Resumo dos resultados

Traço	Compressão axial			Tração na flexão Nos terços do vão			Tração na flexão no meio do vão			Compressão diametral			Modulo de elasticidade estático			Modulo de elasticidade dinâmico			Abrasão (mm)	
	MPa	DPp	CV	MPa	DPp	CV	MPa	DPp	CV	MPa	DPp	CV	GPa	DPp	CV	GPa	DPp	CV	500 m	100 0 m
D 1	28,4	1,9	0,07	4,9	0,2	0,05	5,2	0,3	0,06	3,4	0,4	0,11	42,5	2,0	0,05	52,9	1,3	0,02	1,55	3,07
D 2	28,9	2,2	0,08	5,6	0,6	0,10	5,8	0,4	0,07	4,3	0,4	0,10	38,4	5,6	0,15	53,4	1,3	0,02	1,77	3,27
D 3	349	1,9	0,05	5,3	0,6	0,10	5,2	0,3	0,05	4,3	0,4	0,10	48,0	1,3	0,03	46,8	3,5	0,07	1,62	3,08
D 4	36,9	0,8	0,02	4,2	0,3	0,08	5,4	0,2	0,04	4,5	0,2	0,03	51,9	1,4	0,03	48,5	3,6	0,07	1,45	3,08

D 1 – Sem fibras

D 2 – Com 20 kg/m<sup>3</sup>D 3 – Com 30 kg/m<sup>3</sup>D 4 – Com 40 kg/m<sup>3</sup>

DPp – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação

### 5.2.3.7 Determinação do desgaste por abrasão

Os ensaios à abrasão foram realizados no laboratório do IPT, de acordo com a norma NBR 12042:1990 – “Materiais Inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão” (CETA-LCSC-PE-001) e os resultados foram analisados conforme indicado na norma 11801:1992 – “Argamassa de alta resistência mecânica para pisos – Especificação”.

Foram ensaiados dois corpos de prova de cada traço, com dimensões aproximadas de 69mm x 69mm x 50mm (Figura 74). Na Figura 75 é mostrada a máquina de ensaio e na Figura 76 a determinação da abrasão. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 62.



Figura 75: Corpos de prova a serem ensaiados



Figura 76: Equipamento para desgaste AMS-01 CETAC-LCSC



Figura 77 Determinação do desgaste da amostra

Tabela 62: Resultados do ensaio desgaste por abrasão

Referência	Corpo de prova n.º	Dimensões da base mm	Desgaste em mm correspondente ao percurso de:			
			500 m		1000 m	
			Individual	Média	Individual	Média
9585	1	69,24 X 68,58	1,44	1,55	2,90	3,07
	2	68,70 X 70,70	1,67		3,23	
9586	1	68,15 X 68,47	1,58	1,77	3,01	3,27
	2	69,29 X 67,10	1,96		3,53	
9587	1	68,20 X 67,32	1,54	1,62	2,92	3,08
	2	68,91 X 68,86	1,71		3,24	
9588	1	70,23 X 67,48	1,48	1,45	3,22	3,08
	2	68,25 X 67,61	1,42		2,94	

O desgaste medido foi praticamente igual para todos os traços, não havendo nenhuma melhora com o acréscimo de fibras de aço.

Em função dos limites especificados pela NBR 11801:1992, o material ensaiado não se enquadra como argamassa de alta resistência.



## **CAPITULO 6 - CONCLUSÃO**

O estudo foi conduzido inicialmente estudando o potencial da adição de diversos tipos de fibras ao concreto para fins de pavimentação e em uma segunda etapa optou-se por aprofundar a pesquisa em três diferentes dosagens da fibra de aço, verificando o seu comportamento em termos de desempenho técnico.

Com os resultados obtidos foi possível observar que a fibra de aço possui um papel importante no controle da fissuração devido à solicitação de carregamento e que o aumento de sua dosagem contribuiu para o aumento de sua resistência à compressão axial. No caso da resistência à tração na flexão que é a que comanda o dimensionamento do pavimento de concreto de cimento Portland, observou-se que o maior valor de resistência foi atingido com a dosagem de 20 kg/m<sup>3</sup>.

Foi constatado nos ensaios à tração na flexão, que a presença de fibras de aço no concreto inibe e dificulta o aparecimento de fissuras pelo fato de redistribuir as tensões, enquanto que no ensaio das peças sem fibras, o concreto rompeu imediatamente após o aparecimento da primeira fissura. As fibras atuam como uma armadura tridimensional que redistribuem as tensões na peça estrutural. O concreto com adição de fibras modifica seu comportamento de frágil para dúctil.

Quanto à execução, observou-se que o procedimento é similar ao do pavimento de concreto simples. Cabe ressaltar que embora o bombeamento não seja uma prática usual na execução de pavimentos, deve-se tomar um maior cuidado nessa atividade quando se tratar do concreto com adição de fibras de aço. O processo substitui em alguns casos as armaduras e os espaçadores convencionais, as telas e arames, eliminando custos de mão de obra para corte e dobra, transporte das barras de aço e diminuindo o espaço de estocagem no canteiro.

Deve-se ressaltar, porém, o cuidado quanto ao uso de vibrador de imersão em concretos com adição de fibras de aço. O adensamento com este equipamento pode contribuir para a formação de ouriços, ou seja, um acúmulo de fibras numa única região, fato este que ocasionaria uma mistura heterogênea e que faria com que a vantagem da adição da fibra deixasse de existir.

Analisando os dados estatísticos de todos os ensaios, constatou-se que os coeficientes de variação são menores quando se aumenta a quantidade de fibras, o que leva a concluir que quanto maior o teor de fibras, maior é a uniformidade do concreto.

Os resultados dos ensaios à abrasão demonstraram não haver nenhuma melhora com o acréscimo de fibras, e de acordo com os limites especificados pelas normas, o material ensaiado não se classifica como argamassa de alta resistência.

Em relação ao custo, as fibras de aço ainda não apresentam um preço competitivo (o preço do kg da fibra FF3 utilizada no ensaio é de aproximadamente R\$ 5,50). Por essa razão foi criado o programa EcoLane, que se utilizou das fibras oriundas da reciclagem da estrutura de aço dos pneus usados e também de materiais reciclados, conseguindo com isso uma redução de custo de construção em 10 a 20%, no tempo de construção em 15% e no consumo de energia em mais de 40% (PILAKOUTAS, 2010).

## **6.1 Sugestão para novas pesquisas**

Sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas na direção do programa do EcoLane. Sugere-se também um estudo mais profundo do comportamento do concreto com adição de outros tipos de fibras, quanto ao fissuramento.

Recomenda-se verificar o comportamento quanto à vida útil, fadiga, deformação permanente e os benefícios advindos de sua utilização, considerando o custo total.

## Referências Bibliográficas

ACHILLEOS, C. et al. **Proportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes for Pavement Construction and Their Impact in Environment and Cost.** Sustainability Journal 2011, 3, 965-983; doi: 10.3390/su3070965. ISSN 2071-1050. 965-983 pp.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C42/C42M - 10a **Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.** Developed by Subcommittee: C09.61 |Book of Standards Volume: 04.02. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C157 / C157M - 08 **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.** Developed by Subcommittee: C09.68 |Book of Standards Volume: 04.02. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS ASTM C309 - 11 **Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.** Developed by Subcommittee: C09.22 |Book of Standards Volume: 04.02. 2011

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **STANDARD TEST Method For Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).** ASTM C1018. BOOK OF ASTM STANDARDS, Parte 04.02. ASTM, Philadelphia, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Procedimentos Recomendados para o Controle Tecnológico do Concreto. Procedimento – D 0510.** Primeira Edição - Outubro de 2005. p.35.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5732:1991 **Cimento Portland comum - Especificação.** Rio de Janeiro. 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5733:1991 **Cimento Portland CP V ARI - Especificação.** ABNT/EB 2. Rio de Janeiro. 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5735:1991 **Cimento Portland de Alto-Forno - Especificação.** ABNT/EB 208. Rio de Janeiro. 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 5736:1991 Versão Corrigida: 1999. **Cimento Portland pozolânico - Especificação.** Rio de Janeiro. 1999. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 5737:1992. **Cimentos Portland resistentes a sulfatos - Especificação.** Rio de Janeiro. 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738:2003 **Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova - Método de Ensaio.** ABNT/MB 2. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739/2007 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio.** ABNT/MB 3. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5752:1992 **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.** ABNT/MB 1153. Rio de Janeiro, 2007. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2007 **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** ABNT/NB 1. Rio de Janeiro, 2007. 221p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6467:2006 Versão Corrigida 2:2009 **Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio.** ABNT/MB 215. Rio de Janeiro, 2009. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7207:1982 **Terminologia e Classificação de Pavimentação - Terminologia.** ABNT/TB 7. Rio de Janeiro. 1982. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211:2009 **Agregados para Concreto – Especificação.** ABNT/EB 4. Rio de Janeiro. 2009. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7212:1984 **Execução de concreto dosado em central.** ABNT/EB 136. Rio de Janeiro. 2009. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215:1996 **VERSÃO CORRIGIDA:1997 Cimento portland - determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro. 1997. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7218:2010  
**Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** ABNT/MB  
8. Rio de Janeiro. 2010. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7221:1987  
**Agregados - Ensaio de qualidade de agregado miúdo.** ABNT/MB 95. Rio de Janeiro. 1987.  
5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7221:1987 Errata  
1:2000 **Agregados - Ensaio de qualidade de agregado miúdo.** Rio de Janeiro. 2000. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222:2011  
**Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão  
diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2011. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7389-2:2009  
**Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo.**  
ABNT/MB 2699. Rio de Janeiro. 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7680:2007  
**Concreto - extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto.** ABNT/NB 695. Rio de  
Janeiro. 2009. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7809:2006 Versão  
Corrigida:2008 **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do  
paquímetro - Método de ensaio.** ABNT/MB 1776. Rio de Janeiro. 2006. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522:2008 -  
**Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da  
curva tensão-deformação – Método de Ensaio.** ABNT/MB 1924. Rio de Janeiro, 2008.  
16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9479:2006  
**Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova -  
Especificação.** ABNT/EB 1684. Rio de Janeiro, 2006. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009 **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9779:1995 – **Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1995. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9917/2009 **Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis.** ABNT/MB 2686. Rio de Janeiro, 2009. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9937:1987 **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9937:1987 Errata 1:1988 **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1988. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9938:1987 **Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos - Método de ensaio.** ABNT/MB 2699. Rio de Janeiro. 1987. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10787/1994 – **Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 1994. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10908:2008 **Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização.** Rio de Janeiro. 2008. 17p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11578:1991 Versão Corrigida: 1997. **Cimento Portland composto – Especificação.** Rio de Janeiro. 1997. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579:1991.  
Cimento Portland - **Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio.** ABNT/MB 3432. Rio de Janeiro. 1991. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768:2011 –  
**Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro. 2011.  
19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12042:1992.  
**Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 1992. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12142:2010  
**Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos - Método de Ensaio.** ABNT/MB 3483. Rio de Janeiro. 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12317:1992  
**Verificação de desempenho de aditivos para concreto - Procedimento.** ABNT/NB 1401.  
Rio de Janeiro. 1992. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12654:1992 Versão Corrigida:2000. **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – Procedimento.** ABNT/NB 1417. Rio de Janeiro. 2000. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655:2006 -  
**Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento.** Rio de Janeiro. 2006. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12821:2009 -  
**Preparação de concreto em laboratório- Norma.** ABNT/NB 1435. Rio de Janeiro. 2009.5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15558:2008  
**Concreto - Determinação da exsudação.** Rio de Janeiro. 2008.7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-1:2008  
Versão Corrigida:2008. **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para**

**avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro. 2008. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-3:2008  
Versão Corrigida:2008 **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro. 2008. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-4:2008  
Versão Corrigida 2:2009 **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro. 2008. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-6:2008  
Versão Corrigida:2008 **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de Janeiro. 2008. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15900-1:2009 **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro. 2009. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 9/2003  
**Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração.** Rio de Janeiro, 2004. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 18:2004  
**Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2004. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 25:2003  
**Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.** Rio de Janeiro. 2003. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 30:2001  
**Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 33:1998  
**Concreto - Amostragem de concreto fresco - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1998. 5p.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NM 45:2006 **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 46:2003 **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 47:2002 **Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2003. 23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 49:2001 Versão Corrigida:2001 **Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. NM 49:2001. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 51:2001 **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 2001. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52:2003 **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53:2009 **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NM 53:2009. Rio de Janeiro. 2009. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 65:2003 **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro. 2003. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67:1998 **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro. 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 68:1998 **Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff**. Rio de Janeiro. 1998. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 76:1998 Cimento Portland - **Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. NM 76:1998. Rio de Janeiro. 1998. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248:2003 **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 Versão Corrigida 2:2006 **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories)**. Brasil. Confirmada em 14.10.2010.31 pages.

AZEVEDO, Ângela Azevedo de; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; MATTOS, Viviane Dias Leite. **Correlação entre diferentes tamanhos de corpos-de-prova prismáticos utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2007, Brasil, setembro de 2007.

BANDUK, Ragueb Chauki. **Apostila de Materiais de Construção II**. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia. Engenharia Civil. 2005.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier.2002.

BILODEAU, K.; SAUZÉAT, C.; BENEDETTO, H. DI; OLARD F.; BONNEAU, D. **Laboratory and in situ investigation of steel fiber reinforced compacted concrete containing reclaimed asphalt pavement**. Transport Research Board. TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington. USA. 2011.

BOLPETTI, Luis Felipe F. F.; FORTES, Rita Moura. **Um Estudo da Adição de Fibras de Celulose em Concreto de Cimento Portland para Pavimentos**. CONINFRA — CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ANDIT- Associação Nacional de Infraestrutura de Transportes. São Paulo, São Paulo, Brasil, 19 a 22 de junho de 2007.

CARNEIRO, A.P.; **CAD reforçado por fibras metálicas visando aplicação em pavimentações**, REIBRAC 39 – IBRACON, ago. 1997, p. 407 – 420.

COOLEY Jr., L. Allen; BROWN, E. Ray & WATSON, Donald E. “**EVALUATION OF OGFC MIXTURES CONTAINING CELLULOSE FIBERS**”. NCAT Report 00-05 National Centes for Asphalt Technology. December 2000. USA. pp16.

CECCATO M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação USP – 1998.

CHODOUNSKY, M.A. Fibras metálicas para reforço de concreto. Copyright © 2009 - AUGE - Todos os direitos reservados. Acessado em 10/07/2011. Disponível em: <http://www.augepisos.com.br/site/blog/?p=946>

CONFEDERACAO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa Rodoviária 2009 - Relatório Gerencial**. Brasília. CNT 2009. págs. 33, 34 e 105. Acessado em 21/08/2010. <http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/rodoviaria/2009/>

CONFEDERACAO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa de Fluidez 2002 - Relatório Gerencial**. Brasília. CNT. 2002. Acessado em 21/08/2010. <http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/rodoviaria/2002/>

DANTAS F.A. **Concretos de baixo consumo de cimento, reforçados com fibras. Propriedades e análise da fissuração devido à retração**. Tese de doutorado apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP – 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER-ME 049/94 - **Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Método de Ensaio. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT 037/2004-ME – **Pavimento Rígido - Água para amassamento de concreto de cimento Portland - Ensaios comparativos** – Método de Ensaio. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT 036/2004-ME – **Pavimento Rígido - Água para amassamento do concreto de cimento Portland - Ensaios químicos** – Método de Ensaio. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT  
047/2004- ES - **Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte.** Especificação de Serviço. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT  
048/2004- ES - **Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho.** Especificação de Serviço. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT  
049/2009- ES - **Pavimento Rígido - Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante.** Especificação de Serviço. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT  
054/2004 PRO – **Pavimento Rígido – Estudo de traço de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimento.** 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT  
055/2004-ME – **Pavimento Rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos.**  
Método de Ensaio. 2004. Rio de Janeiro.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de; TANESI, Jussara; NINCE, Andréia, Azevedo.  
“**Concreto com fibras de polipropileno (CFP)**”. Revista Técnica em Setembro de 2002, p 48 – p51.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com fibras de aço.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. PCC USP. ISSN 0103-9830, 70p, 2000.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**, volume II, Seção VIII. Cap. 39, v2, Ibracon. 2005.

FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgílio, ZUPPOLINI NETO, Alexandre; RIBEIRO, Luiz Eduardo de Souza & MARQUES, João Carlos. **Evaluation of the two years of the**

**inter-laboratory asphalt program in Brazil.** IJP - International Journal of Pavements, ISSN 1676-2797. Vol.1, No.1, January 2002, pp.77-87. Qualis B1.

HELENE, Paulo. **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**, Volume I – Ibracon, 2005.

ISAÍÁ G.C. “**Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**”. Ed. IBRACON. São Paulo. 2005. 2v, 1579p.

HOLANDA, K.M.A.; PINHEIRO, L.M. **Desempenho Estrutural do Concreto reforçado com fibras de aço**, REIBRAC 43, IBRACON, 18 –Ago. 2001.

NORONHA, Maria Aparecida A.; COSSICH, Fabiano Alves. **Concreto armado com fibras. Colóquio sobre concreto massa**. Reunião do IBRACON em 1981.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MINDESS, Sidney. **Fibre Reinforced Concrete – Myth and Reality” Advances in Cement and Concrete**. - ASME – American Society of Civil Engineers – 1994.

MOHAMMADI, Y.; Ghasemzadeh, H.M.; Talari, T.B.; Ghorbani, M.A. **Replacing Fibre reinforced concrete with bitumen asphalt in airports**. Proc. World Acad Sci. Eng. Technol. 2009. 58, 30-34.

MOSCATELLI, Ivo; FORTES, Rita Moura. **Estudo Comparativo da Adição de Fibras de Celulose, Polipropileno e Aço em Dosagens de Concreto de Cimento Portland Aplicados a Pavimentação**. 6º SEMINÁRIO NACIONAL - MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS. Associação Catarinense de Engenheiros. Florianópolis - Santa Catarina. In Cd Proceedings.

NEVILLE. **Propriedades do concreto**. – 2ª edição Pini – 1997 – SP

NUNES Nelson L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto**. Dissertação USP – 1998.

NUNES Nelson L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. Tese de doutorado – Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil - USP – 2006. 253p.

PACE, G. D.; BECKER, E. **Life cycle cost of urban pavements**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, 8., 1998, Lisboa, Portugal, “Proceedings”. Lisboa, Portugal: [s.n.], 1998. p.111-116.

PARK, J.S.; JUNG, W.T; CHOI, S.Y. **A Fundamental Study on the Macro Fiber and Hybrid Fiber Reinforced Concrete Pavement**. Transport Research Board. TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington. USA. 2011.

PILAKOUTAS, K. **Publishable Final Activity Report**. EcoLane. Economical and Sustainable Pavement Infrastructure for Surface Transport. The University of Sheffield. EcoLanes FP6 SREP Project (2006 – 2009). 031530. 2010. 12p. Acessado em 10 de julho de 2011. Disponível em: <http://www.shef.ac.uk/content/1/c6/06/11/36/EcoLanes-Publishable-Executive-summary.pdf>

PITTA, Márcio Rocha. **Dimensionamento de Pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84**. 3ª. Edição. São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998, 91p. (ET-97). ISBN 85-87024-04-3.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **LEI Nº 9.055, DE 1 DE JUNHO DE 1995**. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.

REIS, Andréa P. A. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço**. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP – 2003. 286p.

REIS, Neuto Gonçalves (2006). **Impacto do estado das rodovias sobre o custo operacional dos caminhões**. São Paulo. Acessado em 15 de julho de 2011. Disponível em: [http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/Artigos/impacto\\_mauestado\\_rodovias.asp](http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/Artigos/impacto_mauestado_rodovias.asp) .

SAVASTANO, Holmer Junior. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito** – Tese de doutorado – Escola Politécnica – USP – 1992. 209p.

TANESI, J.; TORNERI, P.; VALOIS, A.D; **A influência das fibras de polipropileno na fissuração por retração**, CON PAT 97, 4º congresso Ibero-americano de Patologia das Construções 1997, p. 273 – 280

TANESI, Jussara. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP. 1999. 132 p.

ZANIEWSKI, J. P. **Effect of pavement surface type on fuel consumption Portland cement**. Illinois: Association Skokies, 1998.