

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
CONCRETOS PARA PAVIMENTAÇÃO EMPREGANDO  
DIFERENTES PROCESSOS DE CURA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Andrigo Kemel Zanella**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS  
PARA PAVIMENTAÇÃO EMPREGANDO DIFERENTES  
PROCESSOS DE CURA**

por

**Andrigo Kemel Zanella**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo**

**Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Kemel Zanella, Andrigo

Análise das propriedades mecânicas de concretos para  
pavimentação empregando diferentes processos de cura /  
Andrigo Kemel Zanella.-2014.

176 p.; 30cm

Orientadora: Tatiana Cureau Cervo

Coorientadora: Geraldo Cechella Isaia

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Métodos de cura 2. Pavimentos de concreto 3.  
Propriedades mecânicas 4. Resistência à tração na flexão 5.  
Módulo de elasticidade I. Cureau Cervo, Tatiana II.  
Cechella Isaia, Geraldo III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado:

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS  
PARA PAVIMENTAÇÃO EMPREGANDO DIFERENTES  
PROCESSOS DE CURA**

elaborada por

**Andrigo Kemel Zanella**

como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Tatiana Cureau Cervo, Dra.**  
(Presidente/Orientadora)

---

**Geraldo Cechella Isaia, Dr.(UFSM)**

---

**José Tadeu Balbo, Dr. (USP)**

---

**Ederli Marangon, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, 25 de agosto de 2014.

*Aos meus pais, Irineo e Marta,  
às minhas irmãs Ângela e Andrisa,  
por todo amor, carinho,  
incentivo e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por nunca ter me deixado desistir dos meus sonhos e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos de minha vida;

Aos meus pais, Irineo e Marta, por serem os meus exemplos de amor, carinho, educação, determinação e por serem as pessoas mais importantes em minha vida;

Às minhas irmãs, Ângela e Andrisa, por todo amor e carinho dados a mim e por também serem meus exemplos, a quem sempre poderei me espelhar para ser uma pessoa melhor em todos os âmbitos de minha vida;

À minha amiga, companheira e parceira de todas as horas, Carla Fernanda Perius, por toda paciência, carinho e alegria, que fizeram os meus dias mais felizes durante toda essa caminhada;

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eng<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo, por sua dedicação, comprometimento, apoio, atenção e responsabilidade com que me orientou na realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Eng. Geraldo Cechella Isaia, pela oportunidade de ingressar na área de pesquisa, pela sua motivação, entusiasmo e responsabilidade que muito me ajudaram a desenvolver as minhas atividades durante toda a minha graduação e pós-graduação.

Ao professor José Tadeu Balbo pelo incentivo e pelas experiências transmitidas para desenvolvimento deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Eng. Ederli Marangon, por toda ajuda na realização e execução dos ensaios, bem como, pela sua participação na banca de defesa deste trabalho que, com certeza, muito contribuirá para o engrandecimento desta pesquisa.

Ao grande amigo, parceiro para todas as horas Eng. Civil Mestre Maisson Tasca pela sua amizade e incentivo durante essa jornada;

Aos amigos Mauricio Silveira dos Santos e Lucas Lamberti pelo incentivo e colaboração nos trabalhos desenvolvidos;

Aos engenheiros Pedro Orlando Junior e Fernanda Saidelles e bolsistas, Laura Huber, Silvana Rubek, Renan Scherer e Junior Felice e aos demais funcionários do Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria, pela imensa colaboração no desenvolvimento desse estudo;

Aos amigos Marcelo Dias de Oliveira e Everton Luis Soares por todo empenho, auxílio e ajuda na execução dos ensaios na Universidade Federal do Pampa;

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela atenção prestada;

À minha família, familiares, e amigos que me acompanharam, apoiaram para que pudesse me dedicar na realização deste projeto;

À Concretina Artefatos de Concreto Ltda., na pessoa do Eng. Irineu Dalla Corte Filho, pelo auxílio com a doação dos materiais;

À Prontomix Artefatos de Concreto Ltda, na pessoa do Sr. Wilson Becker, pelo auxílio com a doação dos materiais;

À Logustec, na pessoa do Eng. Fábio Viecilli, pelo auxílio na doação dos materiais;

E a todas as pessoas que contribuíram com seu tempo, disposição, sabedoria, habilidade e motivação;

A todos meu sincero muito obrigado.

**“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.”**

(Mahatma Gandhi)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PARA PAVIMENTAÇÃO EMPREGANDO DIFERENTES PROCESSOS DE CURA**

AUTOR: ANDRIGO ZANELLA  
ORIENTADORA: TATIANA CUREAU CERVO  
CO-ORIENTADOR: GERALDO CEHELLA ISAIA  
Santa Maria, 25 de agosto de 2014.

Para o desenvolvimento de um projeto de dimensionamento de pavimentos de concreto é necessário conhecer as propriedades mecânicas e os diferentes processos de tratamento do material a ser utilizado. Este trabalho teve por objetivo analisar as propriedades mecânicas, tais como, resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático em concretos para pavimentação. Foram estudados os três tipos de concretos: um concreto referência, (tipicamente empregado em pavimentação, outro com a adição de fibras de polipropileno (prática comum em pavimentos) e um concreto de alta resistência, utilizado para rápida liberação ao tráfego. Diferentes métodos de cura foram aplicados: cura química com e sem a utilização de sacos de anagem úmidos (largamente aplicados em pavimentos) e cura em câmara úmida (conforme preconizado por norma). A avaliação das propriedades mecânicas para os concretos estudados, nos diferentes métodos de cura aplicados, mostrou que a microestrutura dos concretos, está interferindo de forma significativa nos resultados obtidos, principalmente nos concretos curados para condições de pista (cura química sem e com a colocação de sacos de anagem), onde fatores como a absorção e reabsorção da água de evaporação para hidratação do cimento, a fissuração da interface pasta/agregado, as condições ambientes relacionadas à temperatura e umidade, estejam interferindo na resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e principalmente no módulo de elasticidade estático e ainda, a partir dos resultados obtidos na presente pesquisa e daqueles apresentados por outros autores que estudaram um concreto de alta resistência, é possível verificar que existem particularidades ainda desconhecidas sobre o comportamento do concreto de alta resistência.

**Palavras-chave:** Métodos de cura; Pavimentos de concreto; Resistência à tração na flexão, Resistência à compressão axial; Resistência à tração por compressão diametral; Módulo de elasticidade.

## **ABSTRACT**

Master's Degree Dissertation  
Pos-graduation Program in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PAVEMENT FOR USING DIFFERENT PROCEDURES FOR CURING**

**AUTHOR: ANDRIGO KEMEL ZANELLA**

**ADVISOR: TATIANA CUREAU CERVO**

**City and Date: Santa Maria, August, 25<sup>th</sup>, 2014.**

To develop a project sizing concrete pavement is necessary to know the mechanical properties and the different treatment processes of material to be used. This study aimed to analyze the mechanical properties such as flexural strength, compressive strength, indirect tensile strength and static modulus of concrete paving. The three types of concrete were studied: An actual reference (typically used in paving, one with the addition of polypropylene fibers (common practice for floors), and a high strength concrete used to rapidly release the traffic. Different methods of curing were applied: chemical cure with and without the use of wet burlap bags (widely applied in pavements) and curing in a moist chamber (as recommended by standard). This evaluation of the mechanical properties for the concrete studied in different curing methods applied, showed that the microstructure of concrete is significantly interfering with the results, especially in cured concrete to track conditions (chemical cure without and with the placement of burlap sacks). Where factors such as the absorption and reabsorption of water evaporation to cement hydration, cracking the interface folder / aggregate, ambient conditions related to temperature and humidity, are interfering with the tensile strength in bending, compressive strength, indirect tensile strength and particularly in the static modulus and still, from the results obtained in this study and those reported by other authors who studied a high-strength concrete, it is possible to verify that there are particularities still unknown about the behavior of high strength concrete.

**Key-words:** Methods of curing; Concrete pavements; Flexural strength, compressive strength; indirect tensile strength; Modulus of elasticity.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CP II-Z .....	76
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CP V ARI.....	77
TABELA 3 - GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO (AREIA).....	78
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 1 .....	79
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 2.....	80
TABELA 6 - DADOS TÉCNICOS DO PLASTIFICANTE – TEOR DE SÓLIDOS.....	81
TABELA 7 - DADOS TÉCNICOS – SUPERPLASTIFICANTES – TEOR DE SÓLIDOS.....	81
TABELA 8 - PROPRIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA .....	82
TABELA 9 - DADOS TÉCNICOS – FIBRAS DE POLIPROPILENO .....	83
TABELA 10 - DADOS TÉCNICOS – CURA QUÍMICA.....	83
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO EMPREGADO NA PISTA EXPERIMENTAL EPUSP (SEVERI, 2002) .....	84
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DO PRIMEIRO CONCRETO REF ANALISADO .....	87
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DO SEGUNDO CONCRETO REF ANALISADO.....	88
TABELA 14 - CARACTERÍSTICAS DO TERCEIRO CONCRETO REF ANALISADO .....	88
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS DO QUARTO CONCRETO REF ANALISADO, SENDO ESTE O TRAÇO DEFINITIVO .....	89
TABELA 16 - CONCRETO REF DEFINITIVO APÓS ESTUDO DE DOSAGEM.....	90
TABELA 17 - CONCRETO REF DEFINITIVO APÓS ESTUDO DE DOSAGEM.....	91
TABELA 18 - CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO EMPREGADO NO WHITETOPPING ULTRADELGADO DA RODOVIA CASTELO BRANCO (BALBO, 1999) .....	92
TABELA 19 - CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS ANALISADOS DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) .....	93
TABELA 20 - CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA DEFINITIVO (CAR).....	94
TABELA 21 - MÉTODOS E IDADES DE CURA EMPREGADOS NOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS E CILÍNDRICOS .....	97
TABELA 22 - RESULTADOS DOS ENSAIOS À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	111
TABELA 23 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA A OBTENÇÃO MÓDULO DE ELASTICIDADE. ....	115
TABELA 24 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL ....	119
TABELA 25 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	122
TABELA 26 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PELA ANALOGIA DE MÖHR. ....	152
TABELA 27 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE.....	157

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS PARA CONCRETO ESTRUTURAL. (FONTE: ADAPTAÇÃO DE MEHTA & MONTEIRO, 2008). .....	36
FIGURA 2 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DO SILÍCIO METÁLICO E CAPTAÇÃO DA SÍLICA ATIVA.....	38
FIGURA 3 – CASO DE RUPTURA FORA DO TERÇO MÉDIO (ABNT NBR 12142, 1991).....	48
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO ROMPIMENTO POR RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. FONTE: EDUARDO C. S. THOMAZ (2009).....	55
FIGURA 5 - GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO. FONTE: MEHTA,1994.....	57
FIGURA 6 - DIFERENTES TIPOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE E O MÉTODO QUE OS DETERMINA. FONTE: METHA, 2008. ....	58
FIGURA 7 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO COM O SUPORTE “YOKE” E LVDT PARA MEDIDA DA DEFORMAÇÃO (JSCE-SF4, 1984)..	60
FIGURA 8 - DEFLEXÕES E INCLINAÇÕES DE VIGAS SIMPLEMENTE APOIADAS. FONTE: TIMOSHENKO/GERE (1994).....	61
FIGURA 9 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM).....	78
FIGURA 10 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 1 E BRITA 2. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM).....	79
FIGURA 11 - BETONEIRA UTILIZADA NAS MOLDAGENS. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM). ....	85
FIGURA 12 - ENSAIO DO TRONCO DE CONE. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM).....	86
FIGURA 13 - CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS SENDO ADENSADOS NA MESA VIBRATÓRIA. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM).....	86
FIGURA 14 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO – CONCRETO REF – ESTUDO DE DOSAGEM. FONTE: ENSAIOS REALIZADOS NO LMCC (UFSM) .....	90
FIGURA 15 - FLUXOGRAMA APRESENTANDO O RESUMO DA PESQUISA.....	96
FIGURA 16 - CURA EM CÂMARA ÚMIDA .....	98

FIGURA 17 - APLICAÇÃO DA CURA QUÍMICA.....	99
FIGURA 18 - CURA COM SACOS DE ANIAGEM (ESTOPAS ÚMIDAS) .....	99
FIGURA 19 - ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	101
FIGURA 20 - DISPOSITIVO DO CORPO DE PROVA (ABNT NBR 7222:1994).....	103
FIGURA 21 - ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO COM O SUPORTE “YOKE” E UM LVDT PARA MÉDIDA DA DEFORMAÇÃO. ....	105
FIGURA 22 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DE REFERÊNCIA. ....	112
FIGURA 23 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS.....	112
FIGURA 24 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA. ....	113
FIGURA 25 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DE REFERÊNCIA. ....	117
FIGURA 26 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DE REFERÊNCIA MAIS FIBRAS.....	117
FIGURA 27 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA. ....	118
FIGURA 28 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DE REFERÊNCIA. ....	120
FIGURA 29 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS.....	120
FIGURA 30 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	121
FIGURA 31 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO REFERÊNCIA.....	123
FIGURA 32 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS. .....	123
FIGURA 33 - RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CURA NO TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA. ....	124
FIGURA 34 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA. ....	127

FIGURA 35 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS.....	128
FIGURA 36 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	128
FIGURA 37 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	129
FIGURA 38 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS AOS 28 DIAS.....	130
FIGURA 39 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO OBTIDOS PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	130
FIGURA 40 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PELA ABNT NBR 12142 E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL. ....	132
FIGURA 41 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PELA ABNT NBR 12142 E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL. ....	133
FIGURA 42 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO PELA ABNT NBR 12142 E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL. ....	134
FIGURA 43 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS....	135
FIGURA 44 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS AOS 28 DIAS. ....	136
FIGURA 45 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	136
FIGURA 46 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL NO TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	138
FIGURA 47 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL NO TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS. ....	138

FIGURA 48 - CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E A RESISTÊNCIA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL NO TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	139
FIGURA 49 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	140
FIGURA 50 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	140
FIGURA 51 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL, OBTIDOS PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	141
FIGURA 52 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CÂMARA ÚMIDA, ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	142
FIGURA 53 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	143
FIGURA 54 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA MAIS SACOS DE ANIAGEM ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS.....	144
FIGURA 55 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS COM PERMANÊNCIA EM CÂMARA ÚMIDA ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	145
FIGURA 56 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA, ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	146
FIGURA 57 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA MAIS SACOS DE ANIAGEM ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	147
FIGURA 58 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CÂMARA ÚMIDA ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS.....	148

FIGURA 59 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS.....	149
FIGURA 60 - ANÁLISES DAS CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO OBTIDAS PARA O TRAÇO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM PERMANÊNCIA EM CURA QUÍMICA MAIS SACOS DE ANIAGEM ÀS IDADES DE 7, 28 E 91 DIAS. ....	150
FIGURA 61 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR PARA O CONCRETO REFERÊNCIA.....	154
FIGURA 62 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR PARA O CONCRETO REFERÊNCIA COM FIBRAS. ....	155
FIGURA 63 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	155
FIGURA 64 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE PARA O CONCRETO REFERÊNCIA. ....	158
FIGURA 65 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE PARA O CONCRETO REFERÊNCIA COM FIBRAS.....	159
FIGURA 66 - VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA. ....	160
FIGURA 67 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR E PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE, PARA O CONCRETO REFERÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	161
FIGURA 68 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR E PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE, PARA O CONCRETO REFERÊNCIA MAIS FIBRAS AOS 28 DIAS.....	162
FIGURA 69 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO PARA ANALOGIA DE MÖHR E PELA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA SEGUNDO TIMOSHENKO/GERE, PARA O CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS. ....	162

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TIPOS DE CIMENTO PORTLAND NORMALIZADOS NO BRASIL.....	44
QUADRO 2 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NAS PROPRIEDADES DE PASTAS, ARGAMASSAS E CONCRETOS.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

CP I - Cimento Comum

CP I - S - Cimento Comum com Adição

CP II -E - Cimento Composto com Escória

CP II -F - Cimento Composto com Fíler

CP II -Z - Cimento Composto com Pozolana

CP III - Cimento Alto-Forno

CP IV - Cimento Pozolânico

CP V - ARI - Cimento Alta Resistência Inicial

CPB - Cimento Branco Estrutural

CRS Cimento Resistente a Sulfatos

E – Módulo de elasticidade

EFNARC - *Applicators of Specialist Products for Structures*

EUA – Estados Unidos da América

$E_{ci}$  – módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal

$E_{cs}$  – módulo de deformação secante do concreto

$E_{ci}(t_0)$  – módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante  $t_0$

$E_{ci28}$  – módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias

$E_p$  – módulo de elasticidade do aço de armadura ativa

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$f_c$  – resistência à compressão do concreto

$f_{cd}$  – resistência de cálculo à compressão do concreto

$f_{cj}$  – resistência à compressão do concreto aos  $j$  dias

$f_{ck}$  – resistência característica à compressão do concreto

$f_{cm}$  – resistência média à compressão do concreto

$f_{ct}$  – resistência do concreto à tração direta

$f_{ct,m}$  – resistência média à tração do concreto

$f_{ct,f}$  – resistência do concreto à tração na flexão

$f_{ct,sp}$  – resistência do concreto à tração indireta

GPa – Giga Pascal

$I_c$  – momento de inércia da seção de concreto

IA - aditivo incorporador de ar

IA 1 - curas úmidas

IA 1 - desmoldagem – imersão em água- até data do ensaio

IA 4 - curas úmidas

IA 7 - curas úmidas

JSCE-SF4 - *Japan Society of Civil Engineers*

$K$  – coeficiente

LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil

LVDT - linear variable differential transducer

$M$  – momento Fletor

MPa – Mega Pascal

PA - aditivo redutor de água / plastificante

PCA - Pavimento de concreto armado

PCAC - Pavimento de concreto com armadura contínua

PCPM - Pavimento de concreto pré-moldado

PCPRO - Pavimento de concreto Protendido

PCS - Pavimento de Concreto Simples

PCS - Pavimentos de Concreto Simples

PL - desmoldagem e envolvimento do cp's em lona plástica, câmara úmida até ensaio

PN - aditivo redutor de água / plastificante

PR - aditivo redutor de água / plastificante

PVC – cura em filme de PVC

REF -traço do concreto convencional

RILEM TC162-TDF - *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*

RP - aditivo retardador de pega

SP –II R - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II

SP-I A - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I

SP-I N - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I

SP-I R - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I

SP-II A - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II

SP-II N - aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

USP – Universidade de São Paulo

WT - Whitetopping

WTUD – Whitetopping Ultradelgado

# SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	10
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	12
LISTA DE QUADROS .....	17
LISTA DE EQUAÇÕES .....	17
LISTA DE ABREVIATURAS .....	18
1. INTRODUÇÃO.....	24
1.1 Objetivo Geral .....	26
1.1.1 Objetivos específicos .....	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1. Breve Histórico.....	28
2.2. Tipos de pavimentos de concreto .....	29
2.3. Concretos de cimento Portland para pavimentação .....	30
2.3.1. Importância do controle tecnológico .....	32
2.3.2. Materiais que Constituem o Concreto .....	34
2.3.3. Fibras.....	42
2.3.4. Cimento Portland .....	43
2.3.5. Resistência à tração na flexão .....	47
2.3.6. Resistência à compressão axial.....	51
2.3.7. Resistência à tração por compressão diametral .....	54
2.3.8. Módulo de Elasticidade.....	56
2.3.9. Cura .....	64
2.3.10. Concreto convencional para pavimentos .....	71
2.3.11. Concreto de Alta Resistência para pavimentos .....	72
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	74

	22
3.1 Caracterização dos Materiais.....	75
3.1.1. Cimentos .....	75
3.1.2. Agregados .....	77
3.1.3. Plastificante e Superplastificante .....	80
3.1.4. Sílica Ativa.....	81
3.1.5. Fibras de polipropileno .....	82
3.1.6. Agente de cura .....	83
3.2 Dosagem dos Concretos .....	83
3.1.7. Concreto Convencional (CC) – Referência (REF) .....	84
3.1.8. Concreto de Alta resistência .....	91
3.1.9. Moldagem e Métodos de cura.....	94
3.3 Ensaio em concreto .....	100
3.3.1 Ensaio de tração na Flexão.....	100
3.3.2 Ensaio de Resistência à compressão axial .....	102
3.3.3 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral .....	103
3.3.4 Ensaio de Módulo de Elasticidade através do Ensaio de Tração na flexão (NM 55:1996) .....	104
3.3.5 Ensaio de Módulo de Elasticidade pela Analogia de Möhr .....	107
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	109
4.1 Resistência à tração na flexão .....	110
4.1.1 Ensaio à tração na flexão (ABNT NBR 12142: 2010).....	110
4.1.2 Ensaio de tração na flexão (ABNT NM 55, 1996) .....	114
4.2 Resistência à compressão axial .....	118
4.2.1 Ensaio de resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739: 2007) .....	118
4.3 Resistência à tração por compressão diametral .....	122
4.3.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011) .....	122

4.4	Correlações entre os ensaios de resistência mecânica .....	126
4.4.1	Correlação entre tração na flexão obtida pelo ensaio ABNT NBR 12142 (2010) e pela aquisição de dados para o módulo de elasticidade pela NM 55 (1996).....	126
4.4.2	Correlação entre a resistência à compressão axial com a resistência à tração na flexão .....	131
4.4.3	Correlação entre a resistência a resistência à compressão axial com a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta).....	137
4.5	Análise dos gráficos Carga x Deslocamento .....	141
4.6	Módulo de elasticidade estático .....	151
4.6.1	Análise do módulo de elasticidade estático pela analogia de Möhr.	151
4.6.2	Análise do módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere .....	156
4.6.3	Correlação entre os módulos de elasticidade estático.....	160
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	166
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	170

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade sempre priorizou a sua locomoção, buscando fazê-la da maneira mais rápida, segura e confortável possível. Diversas foram as soluções adotadas para a necessidade de locomoção do homem, dentre as quais se podem citar a construção de rodovias, ferrovias, portos e aeroportos. No entanto, verificou-se a necessidade da realização, cada vez mais detalhada, de estudos nos materiais empregados para a construção desses diversos modais de transportes.

O emprego do concreto de cimento Portland (CCP) para pavimentação é uma alternativa viável para a execução destas obras, sendo utilizado há muitas décadas no país, seja em grandes construções como portos, aeroportos e rodovias, ou em menores construções como corredores de ônibus e pistas experimentais (CERVO, 2004).

Segundo Balbo (2009):

“É necessário ampliar no conhecimento a certeza de que a falta de controle de diversos aspectos redundam em efeitos maléficos ao comportamento estrutural e ao desempenho desses pavimentos, seja por falta de completude de projetos ou por descaso com os aspectos essenciais de controle tecnológico” (p.63).

O desenvolvimento de pesquisas e estudos em pavimentos de CCP se faz necessário para a compreensão desta técnica, que é amplamente empregada em países europeus e norte americano; no entanto, no Brasil, somente em meados dos anos 90 as primeiras pesquisas foram iniciadas, mostrando que ainda existe um longo caminho a ser percorrido nos estudos deste material.

Desde a elaboração até a execução de um pavimento de concreto deve-se acompanhar e verificar os fatores que interferem de forma significativa na preparação, construção e vida útil deste. Dentre os quais, podem-se citar: a fabricação do material, no que se refere às especificações da relação água/cimento, do consumo de cimento, dos métodos de cura a serem empregados em campo, buscando a obtenção de uma mistura final com melhores propriedades mecânicas.

Verifica-se também que, em pavimentação, na literatura, não existe um esclarecimento adequado e consistente sobre os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão e nem para o módulo de elasticidade, sendo necessário

consultar trabalhos realizados no exterior ou pesquisas brasileiras fundamentadas em experiências internacionais, diferenciando-se em muito das condições peculiares encontradas no Brasil para os concretos de cimento Portland (CERVO, 2004; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

O entendimento das propriedades mecânicas do CCP faz-se necessário para obtenção de um material mais homogêneo, sendo ele qualificado com base nas seguintes propriedades: resistência à tração na flexão, resistência à resistência à compressão axial, resistência à tração por resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, entre outros (BATEZINI, 2013).

É importante também conhecer o modo como a cura confere resistência e durabilidade ao concreto em pavimentos, porém ainda existem divergências quanto ao método de cura mais indicado para utilização em pista e aquele preconizado por norma. Dentre os métodos de cura mais conhecidos e amplamente discutidos na literatura pode-se citar: a cura em câmara úmida, sendo esta a preconizada por norma, a cura química, muito utilizada em pista, podendo ou não ser utilizado por um determinado período de cura com sacos de aniagem úmidos (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

A realização do controle tecnológico vem ao encontro com a necessidade da obtenção de um material (concreto) mais homogêneo, refinado e com propriedades mecânicas, físicas e químicas controladas, resultando em valores de resistência mecânica, porosidade, absorção capilar e módulo de elasticidade mais adequados para o emprego do mesmo em qualquer situação de obra.

Diante da necessidade de ampliar o conhecimento sobre o concreto e suas propriedades mecânicas visou-se desenvolver um estudo que elucidasse: como os diferentes métodos de cura atuam na microestrutura do concreto utilizado em pavimentação e quais são as possíveis interferências nessas propriedades?

A relevância deste estudo é constituída a partir de sua possível contribuição científica sobre o assunto em questão, bem como, facilita o entendimento sobre os concretos utilizados na pavimentação, a partir das análises dos ensaios de resistência e módulo de elasticidade.

O presente estudo encontra-se dividido na seguinte sequência:

- No Capítulo 1 é apresentado um pequeno panorama do assunto a ser discutido na dissertação através da introdução e os objetivos (geral e específicos) da pesquisa.

- No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, contextualizando o concreto de cimento Portland em seus diversos usos na pavimentação, revisando os tipos de concreto, as adições minerais que podem ser empregadas, as propriedades destes concretos, os ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas e a influência dos diferentes métodos de cura para esses concretos.

- A caracterização dos materiais, bem como os traços e os ensaios que serão empregados neste estudo estão descritos no Capítulo 3, que se refere à Metodologia da pesquisa.

- No Capítulo 4 são apresentadas a análise e a discussão dos resultados encontrados.

- Finalmente o Capítulo 5, encerra a presente dissertação, apresentando as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo estudar concretos empregados em pavimentação no que tange a análise da influência que diferentes métodos de cura podem ocasionar na resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência tração por compressão axial e no módulo de elasticidade de concretos convencionais (CC) e de alta resistência (CAR).

### **1.1.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são enumerados como segue:

- Estudar três tipos de concreto: concreto convencional (CC), concreto convencional com adição de fibras de polipropileno (CC + FIBRAS) e concreto de alta resistência;

- Avaliar a influência dos diferentes métodos de cura nos concretos estudados, sendo elas, câmara úmida (preconizada por norma), cura química e cura química seguida da colocação de sacos de anagem úmidos (empregados usualmente em condições de campo);
- Determinar as propriedades mecânicas de cada concreto e para os diferentes métodos de cura, sendo estas, resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade;
- Correlacionar os ensaios de resistência à tração na flexão com resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade para avaliar a influência que estas propriedades mecânicas apresentam para os diferentes concretos em análise.
- Comparar os resultados de resistência à tração na flexão do concreto convencional com ou sem adição de fibras, com o concreto de alta resistência, a fim de obter uma análise mais consistente dos resultados com a aplicação de diferentes métodos de cura.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Breve Histórico**

As técnicas construtivas do mundo moderno provêm em sua grande parte das escolas européias, sendo que as mesmas impulsionaram os pavimentos de concreto a partir do século XIX. Existem diversos fatos que levam a crer que o primeiro pavimento de concreto tenha sido construído na cidade de Grenoble em 1876, (CORINI 1947, apud BALBO, 2009), porém não há nada que possa evidenciar esta afirmação. O primeiro pavimento de concreto relatado foi uma avenida construída na Main Street, em Bellafontaine, Ohio, EUA, em 1891 (BALBO, 2009).

O mesmo autor relata ainda, que os grandes avanços da tecnologia do concreto para pavimentos devem-se principalmente a países como a Alemanha, Itália, Suíça e EUA, que buscaram nas pesquisas encontrar a chave para obter a durabilidade e a resistência necessária para conceber pavimentos de concreto com elevado grau de qualidade, o que até hoje faz desses países referência no controle tecnológico deste tipo de pavimento.

O histórico dos pavimentos de concreto no Brasil é vasto, impulsionados pelo presidente Washington Luís Pereira de Souza, onde “governar era abrir estradas” iniciou-se a utilização do concreto em estradas de rodagem.

O primeiro relato de estrada em concreto foi o antigo caminho do mar, entre Riacho Grande e Cubatão, tendo sua construção iniciada em 1925 e concluída em 1926, com 8 km de extensão (BALBO, 2009).

Em 1936 é fundada a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) para desenvolver postes, cercas e pavimentos de concreto, sendo estes amplamente utilizados até meados dos anos 50; Entretanto com o desenvolvimento da indústria de pavimentos asfálticos, com a política nacional de rodovias de penetração para o desenvolvimento das diversas regiões do país e a produção do cimento mais voltada para a construção civil pós-segunda guerra mundial, estagnou-se a utilização deste material até o início dos anos 90.

Quando houve seu ressurgimento através de investimento em novas tecnologias, treinamentos e na indústria do cimento, quebrando os três paradigmas da utilização do pavimento de concreto: custo inicial alto, péssimo conforto de rolamento e ritual de execução complicado. (MASCHIO, 2012)

Segundo o mesmo autor, nos últimos 20 anos, foram desenvolvidos 43 normas técnicas e procedimentos para pavimentos à base de cimento e 33 manuais e melhores práticas.

A quantidade de obras rodoviárias atualmente executadas no Brasil, com emprego de pavimentos de concreto é muito grande, e estende-se de nordeste a sul do país. Dentre tais obras destacam-se o Rodoanel Metropolitano de São Paulo, a perimetral de Porto Alegre, as rodovias Recife-Caruaru, Pelotas-Rio Grande, dentre outras, além de ampliações de pátios de aeroportos nos municípios de Curitiba, Porto Alegre e Brasília. (ABCP, 2014)

## **2.2. Tipos de pavimentos de concreto**

Os pavimentos de concreto de cimento Portland (CCP) são aqueles que apresentam a camada de rolamento composta pelo material concreto, que pode ser produzido com diferentes agregados e ligantes hidráulicos. Sua produção pode ser realizada através de pré-moldagem ou moldagem *in loco*, porém, para obterem-se todos os benefícios de resistência e durabilidade dos mesmos se faz necessário um controle tecnológico deste material, que é largamente utilizado com funções estruturais. (BALBO, 2009)

Dentre os diversos tipos de pavimentos de concreto pode-se citar:

- a) PCS (Pavimento de Concreto Simples) é um pavimento de concreto não armado, constituído de placas de concreto moldadas *in loco*, onde ocorre a serragem das juntas transversais e longitudinais algumas horas depois da moldagem. É executado com diversos tipos de concreto, como o concreto convencional (CC), o concreto de alta resistência (CAR) e o concreto compactado com rolo (CCR) sendo necessário um rigoroso controle tecnológico na dosagem, transporte e lançamento da

mistura (concreto), pois a resistência às deformações impostas pelos esforços gerados pelo tráfego está no concreto;

- b) PCA (Pavimento de concreto armado) é constituído por placas armadas, que apresentam dimensões maiores que as placas dos PCS, sendo necessária a utilização de armaduras para absorver os esforços de flexão na mesma. Fatores como a retração e a densidade de armaduras devem ser considerados para um bom dimensionamento. Deve-se ter cuidado na utilização do pavimento de concreto armado, pois a camada deste material deve apresentar uma espessura mínima para que as cargas impostas que geram deformações no pavimento sejam suportadas pelas armaduras transversais e longitudinais da estrutura;
- c) Existem ainda outros tipos de pavimentos que são utilizados para casos específicos, que podem ser de recuperação de pavimentos asfálticos deteriorados, como é o caso WT (Whitetopping) e WTUD (Whitetopping Ultradelgado), onde o controle tecnológico do concreto da mistura também tem grande importância;
- d) Os PCAC (Pavimento de concreto com armadura contínua), PCPRO (Pavimento de concreto Protendido), PCPM (Pavimento de concreto pré-moldado) que são concretos idealizados para atingir grandes resistências, com poucas variações nas propriedades do concreto fresco e endurecido e podem ser pré-moldados ou moldados *in loco*, para fazer parte de composições de pontes, viadutos e obras especiais.

### **2.3. Concretos de cimento Portland para pavimentação**

Os concretos são conhecidos pelas suas diversas utilidades, sempre mantendo boas características em suas duas principais propriedades: durabilidade e resistência. Para cada concreto existe uma série de materiais que quando combinados podem resultar em concretos parecidos, mas com

microestruturas distintas, o que pode gerar diferentes resultados frente aos estados do concreto fresco e endurecido (NEVILLE, 1997).

O concreto é atualmente o material de construção mais versátil e utilizado no mundo. Entretanto, além da correta preparação e dosagem é essencial que seja executada a cura correta para se obter todas as qualidades do concreto.

A evaporação da água do concreto irá provocar além da perda da água necessária à hidratação do cimento, a formação de poros e capilaridades bem como a diminuição da resistência e o desenvolvimento de trincas na superfície do concreto.

Para a obtenção de um maior controle das propriedades do concreto a cada dia, mais pesquisas vem sendo realizadas para alcançar novas alternativas no que envolve o uso de aditivos para concretos, com a elaboração de novos superplastificantes e produtos inibidores de evaporação e de retração, conjuntamente com novos produtos que auxiliam na cura, sendo aplicadas nas superfícies expostas dos concretos frescos criando uma camada inibidora da evaporação da água de amassamento. Todos os esforços são necessários para conceber concretos com suas propriedades controladas (BALBO, 2009).

A indústria química, nas últimas décadas, buscou métodos e novas alternativas para aditivos de concreto, produtos inibidores de evaporação e de retração, além de produtos que auxiliam na cura de grandes superfícies expostas, criando uma película inibidora de evaporação da água de amassamento (ex: cura química à base de parafina), ocasionando assim, concretos que se apresentam com melhor desempenho técnico para sua aplicação em cada situação específica.

Na pavimentação são diversos os tipos de concreto utilizados, entre eles pode-se citar: o concreto de alta resistência (CAR) que é assim chamado por utilizar adições minerais em sua composição e menor relação água/aglomerante, gerando, uma menor permeabilidade e uma maior resistência aos esforços.

O concreto convencional (CC) que, normalmente, não apresenta adições minerais em sua composição e é amplamente empregado na pavimentação

pela sua alta resistência à fadiga (esforços repetitivos) e por apresentar suas propriedades mecânicas de forma uniforme.

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) ou Concreto de Alta Resistência (CAR), são assim chamados por ter suas propriedades melhoradas, em comparação aos concretos convencionais. São constituídos por cimentos com maior finura e com adições minerais (ex. escória de alto forno, cinzas volantes, sílica ativa, cinza de casca de arroz) o que gera uma menor permeabilidade, conferindo-lhes uma maior durabilidade em situações como ataques por sulfatos e despassivação de armaduras, no caso de concreto armado. Porém em CERVO (2004), observou-se que o CAD apresenta um comportamento desvantajoso se comparado aos concretos convencionais para a resistência à fadiga, o que gera uma necessidade de um maior entendimento deste tipo de concreto que pode não ser de alto desempenho, mas sim, de alta resistência (CAR).

Ainda existem outros concretos como, o concreto compactado com rolo, empregado em bases de pavimentos e estradas vicinais; o concreto auto adensável, muito utilizado em pavimentos de concreto armado devido à alta taxa de armaduras longitudinais e transversais deste pavimento e, para as situações especiais onde a tenacidade da mistura é requerida para o emprego do concreto, utiliza-se o concreto reforçado com fibras. (BALBO, 2009)

O uso do concreto para pavimentação é vasto, onde para as mais diversas peculiaridades pode-se ajustar e controlar o concreto para que este apresente todos os pré-requisitos especificados para determinada situação na concepção de um pavimento.

### **2.3.1. Importância do controle tecnológico**

A necessidade de controlar as tecnologias aplicadas ao concreto para pavimentação vem ao encontro com a importância de dimensionar o pavimento segundo os esforços que atuarão no mesmo. Essa interdisciplinaridade contribui para o avanço nos estudos sobre o concreto trazendo melhorias nas propriedades mecânicas da estrutura do pavimento.

Os concretos para apresentarem o desempenho desejado em revestimentos ou bases de pavimentos necessitam do controle tecnológico,

que tem por objetivo controlar o comportamento do concreto frente aos seus dois estados: fresco e endurecido, não se restringindo apenas à resistência (BALBO, 2009).

O mesmo autor ainda relata que a realização do controle da tecnologia é mais pronunciada em PCS, onde o concreto tem função principal na estrutura do pavimento, sendo este o responsável pela resistência às deformações, pois apenas apresenta como armadura, as barras de transferência de carga. Estas constatações em relação ao PCS podem ser estendidas para outros pavimentos como o WT ou WTUD; Sendo assim, para estes pavimentos, o controle tecnológico do concreto deve ser realizado de maneira rigorosa e não, de forma empírica, como pode ser observado em experiências anteriores.

Em ISAIA (2011), verifica-se que nos últimos 50 anos ocorreram importantes avanços na ciência e tecnologia dos materiais, principalmente no concreto, que através de pesquisas na estrutura da pasta em escala micrométrica com equipamentos de difração de raios-X, porosimetria, microscopia eletrônica de varredura, termogravimetria, entre outros, foi possível desenvolver novos tipos de concretos que podem ser submetidos a condições mais severas e através do avanço no conhecimento da estrutura interna da pasta. Hoje, em escala nanométrica, observa-se que os avanços tendem a ser muito promissores, pois apontam para o aumento no desempenho de novos produtos como aditivos químicos com efeitos controlados, aceleradores à base de nanocarbonato de cálcio, compósitos à base nanotubos de carbono gerando um material tecnologicamente mais controlado.

Conforme o autor citado acima a falta de diretrizes técnicas e normativas para a realização desses pavimentos mostra que o Brasil ainda não tem muito dos requisitos fundamentais para o controle da utilização do concreto para pavimentação e nem são detalhadamente conhecidos.

Esta inexistência de diretrizes para esta tecnologia vem comprovar a necessidade de um maior desenvolvimento de pesquisas na área que tange os pavimentos de concreto, a fim de conceber pavimentos com maior respaldo técnico e normativo, mais duráveis e realmente confiáveis, semelhantemente aos pavimentos construídos em países com elevado conhecimento do controle tecnológico do concreto.

## **2.3.2. Materiais que Constituem o Concreto**

### **2.3.2.1. Agregados**

Os agregados são peças fundamentais na estrutura do concreto. São muito utilizados em bases e sub-bases de pavimentos como material de suporte, mas também podem ser adicionados para produzirem os mais diversos materiais e estruturas, desde blocos ou placas de concreto até revestimentos betuminosos.

Outras características são conferidas ao concreto empregado em pavimentos com a utilização dos agregados como: durabilidade, resistência à tração na flexão, impermeabilidade e trabalhabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Os agregados podem ser classificados quanto sua origem como: agregados naturais, quando encontrados na natureza já preparados para uso sem beneficiamento que não sejam a lavagem, ex. areia de rio, pedregulho, areia de cava, entre outros; britados: submetidos a processo de cominuição, geralmente por britagem; artificiais, derivadas de processos industriais, ex. argila expandida e peletizada; e reciclados, que podem ser resíduos industriais granulares ou proveniente do beneficiamento de entulho de construção ou demolição, ex. escória de alto-forno (FARIAS e PALMEIRA, 2010).

Os agregados, quanto à dimensão dos grãos, são classificados em: agregado graúdo, segundo a norma ABNT NBR 7211:2004, é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 152 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras padronizadas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1:2010 e agregado miúdo, é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 com peneiras de acordo com ABNT NBR ISO 3310-1:2010.

Algumas características importantes devem ser avaliadas para qualificar os agregados para uso na produção do concreto como: composição

granulométrica, forma e textura superficial, resistência mecânica, absorção e umidade superficial e substâncias nocivas nos agregados, todas estas podem interferem de forma benéfica ou maléfica na produção de determinado concreto se não bem definidas.

Verifica-se que os agregados condicionam o concreto a melhores ou piores resultados frente as suas propriedades nos estados, fresco e endurecido, necessitando-se realizar um controle tecnológico deste material, a fim de obter as condições exigidas para os concretos empregados na pavimentação.

### **2.3.2.2. Adições Minerai**

A utilização das adições minerai no concreto tem como finalidade melhorar suas propriedades. Conforme METHA e MONTEIRO (2008) as adições minerai são materiais silicosos finamente divididos, adicionados ao material cimentício em quantidades que variam de 20% a 70%.

As adições mais conhecidas e empregadas mundialmente são as compostas por sílica amorfa em sua microestrutura tais como sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto forno (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Estes materiais são subprodutos de usinas termelétricas (que se utilizam do carvão mineral como material de combustão) e de alto-fornos metalúrgicos, sendo descartados, todos os anos, milhões de toneladas que podem acabar sendo depositados em locais impróprios gerando graves problemas ambientais. Com a realização de pesquisas no âmbito das adições minerai encontrou-se um potencial pozolânico e cimentante para os mesmos, sendo utilizado em substituição parcial ao cimento Portland ou ao agregado miúdo no concreto, trazendo como resultados uma considerável redução na energia e no custo. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Segundo DAL MOLIN (2011), as adições minerai podem ser classificadas como:

- Material pozolânico, é um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia,

mas se finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes, ex. cinza volante com baixo teor de cálcio, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim;

- Material cimentante, é um material que não precisa de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para desenvolver propriedades cimentantes, geralmente sua hidratação é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados não é suficiente para fins estruturais, ex. escória de alto-forno;
- Fíler é uma adição mineral finamente dividida, sem atividade química.

Assim, na Figura 1 é possível verificar a classificação dos tipos de materiais que podem ser utilizados como adição mineral para concreto estrutural.

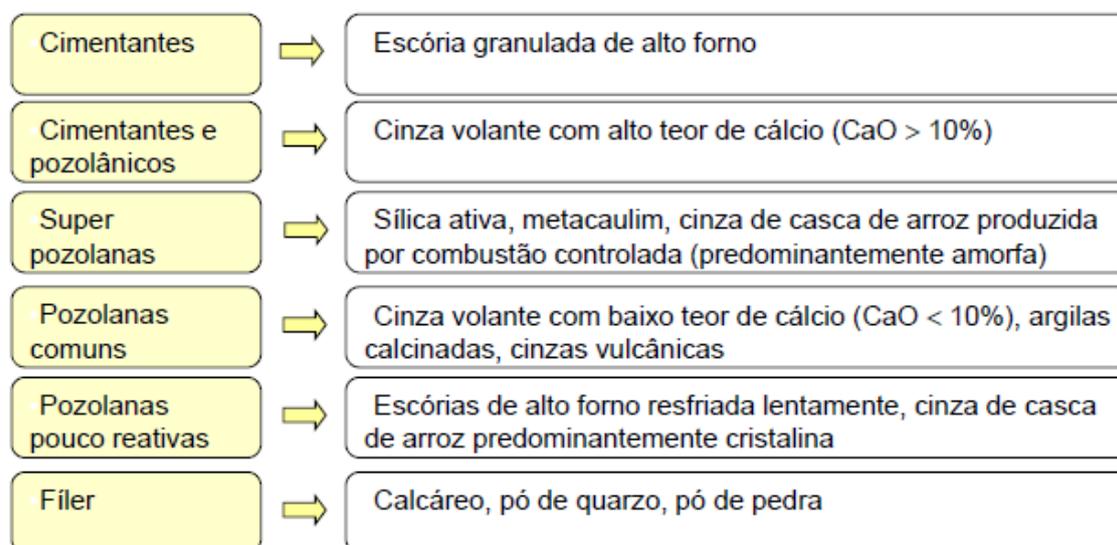


Figura 1 - Classificação das Adições Minerais para Concreto Estrutural. (Fonte: adaptação de MEHTA & MONTEIRO, 2008).

O uso das adições no concreto promove uma melhoria na resistência à fissuração térmica, devido à diminuição do calor de hidratação; aumento da resistência final (sendo utilizado em CAR); refinamento dos poros; fortalecimento das zonas de transição na interface e uma durabilidade mais

elevada ao ataque por sulfatos e à expansão pela reação álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na pavimentação o uso das adições minerais está correlacionado com concretos de alta resistência. A sua utilização age de forma benéfica na microestrutura do concreto de cimento Portland, ajudando no combate de patologias futuras, como as fissurações devido à grande superfície exposta do material, o que proporciona melhores condições de durabilidade e resistência aos esforços solicitantes.

### **2.3.2.3. Sílica Ativa**

A sílica ativa é um material pozolânico amplamente empregado em concretos de alta resistência (CAR). Os benefícios obtidos com a sua adição no concreto estão relacionados com o aumento da reatividade nas idades iniciais o que favorece o ganho de resistência mecânica inicial e final da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Esta adição mineral é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício, Aïtcin (2000). É altamente amorfa e reativa, tendo em sua constituição grãos esféricos que ajudam na hidratação (NEVILLE, 1997).

A Figura 2 apresenta o esquema de produção do silício metálico e captação da sílica ativa.

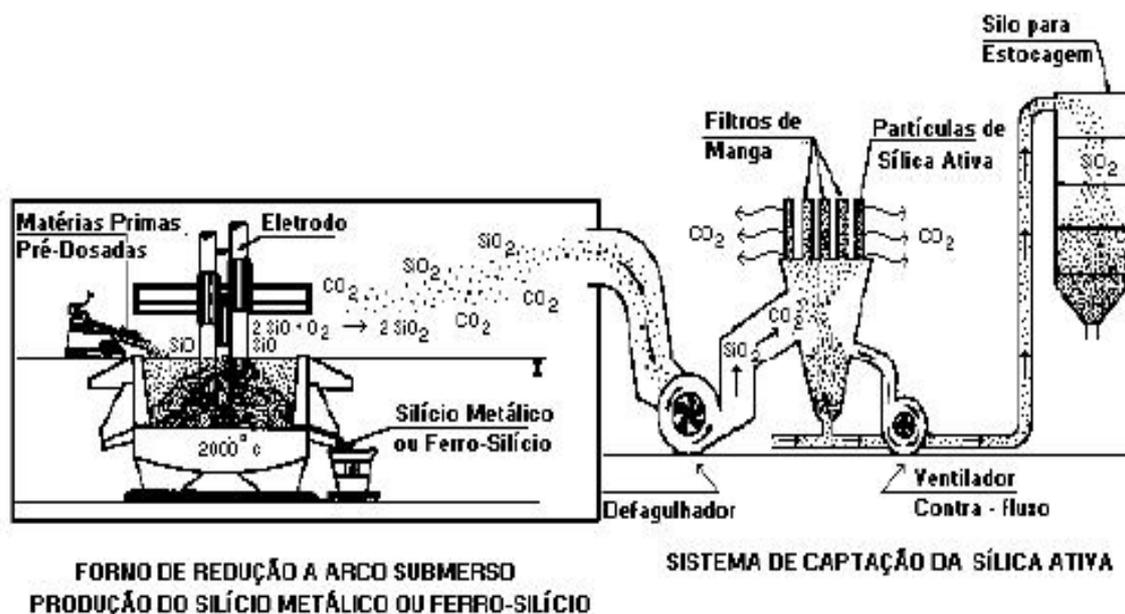


Figura 2 - Esquema de Produção do Silício Metálico e Captação da Sílica Ativa.

Fonte: DAL MOLIN(2011).

A sua adição, no concreto fresco, reduz a exsudação e aumenta a coesão; no concreto endurecido, produz alta resistência inicial e baixa permeabilidade. Seus efeitos benéficos não se limitam à reação pozolânica, pois há um efeito físico das partículas finas se posicionarem na interface pasta-agregado, que é a região mais porosa do concreto, obstruindo esses poros (NEVILLE, 1997).

ISAIA (1995) avaliou a influência que a substituição de parte de cimento por pozolanas como cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, exerce sobre algumas propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto de alto desempenho; Assim verificou a utilização dessas pozolanas nas seguintes proporções: cinza volante: 25 e 50%, sílica ativa: 10 e 20%, cinza de casca de arroz: 10, 20 e 30%, cinza volante e sílica ativa: 15+10 e 30+20%, cinza volante e cinza de casca de arroz: 15+10 e 30+20%. Foram utilizados os seguintes materiais: Cimento de alta resistência inicial (ARI), areia natural, agregado graúdo: com  $D_{máx} = 19$  mm, aditivos plastificante e superplastificantes, e os traços de concreto (em massa) 1:2,5; 1:4 e 1:5,5, com relações água/materiais cimentícios respectivos de 0,3, 0,4 e 0,5. O uso de sílica ativa no concreto gerou acréscimos de resistência entre 25 e 45%, sendo

que, para a absorção de água para teores de 10 e 20% de adição de sílica ativa no concreto resultou em um decréscimo de 45 e 68% respectivamente.

Simplificadamente pode-se dizer que a sílica ativa contribui de forma significativa na modificação das estruturas dos poros, aumentando o seu volume de menor diâmetro e diminuindo a comunicação entre eles, o que se traduz em um ganho de resistência capilar, com a diminuição da taxa de absorção e proporciona maior durabilidade para os pavimentos de concretos expostos a agentes deteriorantes.

#### **2.3.2.4. Aditivos**

De acordo com a ABNT NBR 11768:2011, aditivos químicos são produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. Essa norma classifica os aditivos como:

- aditivo redutor de água / plastificante (PR, PA, PN);
- aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I N);
- aditivo de alta redução de água / superplastificante tipo II (SP –II R, SP-II A, SP-II N);
- aditivo incorporador de ar (IA);
- aditivo acelerador de pega (AP);
- aditivo acelerador de resistência (AR);
- aditivo retardador de pega (RP).

A ASTM C 125 define aditivo como qualquer material – que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras – usado como elemento no concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

A ACI Committee 212 enumera 20 finalidades importantes para as quais esses materiais são usados, como, por exemplo: aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o consumo de água, reduzir a exsudação e segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar as taxas de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, reduzir a taxa de

evolução do aquecimento e aumentar a durabilidade do concreto em condições específicas.

A incorporação de aditivos na mistura do concreto tem como objetivo melhorar as características do mesmo, a fim de facilitar o seu uso e preparação; porém, deve-se ter cuidado, pois a adição em proporções erradas (acima dos limites previstos pelo fabricante, para cada tipo de concreto), pode gerar reações adversas, isto é, o concreto perde coesão e acaba segregando, tornando-se impróprio para a pavimentação (PITTA *et al.*, 1999).

Conforme NEVILLE (1997), o aditivo é um produto químico, que é adicionado à mistura do concreto em teores inferiores a 5% em relação à massa do cimento, sendo incorporado durante a composição da mistura antes do lançamento da mesma, com o objetivo de modificar propriedades específicas ou normais do concreto.

Ainda sua aplicação é importante nas dosagens de concretos projetados para resistir aos ciclos de gelo e degelo e também tem como efeito colateral do ar incorporado a melhoria na trabalhabilidade das misturas de concreto, particularmente as que contêm menores quantidades de cimento e água, agregados de textura áspera, ou agregados leves. Observa-se que, como os surfactantes incorporadores de ar tornam as partículas de cimento hidrofóbicas, uma dosagem excessiva do aditivo causará um retardamento excessivo na hidratação do cimento e dependendo da quantidade de ar incorporado, as misturas podem sofrer uma perda de resistência correspondente (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os aditivos redutores de água, conhecidos como plastificantes e superplastificantes, dependendo da quantidade de água de emassamento para uma determinada consistência (trabalhabilidade), são os superplastificantes de alta eficiência.

A ABNT NBR 11768:2011 define aditivo plastificante/ redutor de água como aquele que, sem modificar a consistência permite reduzir a quantidade de água no estado fresco, já a definição de aditivo superplastificante, segundo a mesma norma, é similar à definição de plastificante, apenas ressaltando a diferença na intensidade dos efeitos.

Os aditivos superplastificantes podem impactar de diversas formas na hidratação inicial do cimento (MAILVAGANAM, 1999), tais como:

- Alteração do grau de hidratação do cimento e morfologia dos produtos;
- Precipitação de produtos de interações insolúveis que agem como barreira física ao processo de hidratação;
- Barreira físico-química à hidratação adicional, causada pela absorção do aditivo químico nas partículas de cimento;
- Podem alterar o pH da mistura.

Os aditivos plastificantes são normalmente adicionados em doses que variam entre 0,3% a 0,6% da massa de material cimentício, enquanto os aditivos polifuncionais são normalmente adicionados em doses que variam entre 0,6% a 1,0% e hoje são empregados em aproximadamente 90% dos concretos produzidos mundialmente por processos industriais (HARTMANN *et. al*, 2011).

Ainda encontram-se aditivos modificadores de pega, que conforme a ABNT NBR 11768:2011, são aqueles que retardam a pega ou aceleram a resistência e a pega.

Os aditivos aceleradores de pega mais comuns são agrupados em sais solúveis inorgânicos (cloretos, brometos, fluoretos, carbonatos, tiocianatos, nitritos, nitratos, tiosulfatos, silicatos, aluminatos e hidróxidos alcalinos) e compostos solúveis orgânicos, tais como as alcanolaminas.

Em função dos riscos que impõem à durabilidade do concreto, KOSMATKA & WILSON (2011) recomendam cautela na utilização de aceleradores baseados em cloretos.

Os aditivos retardadores de pega são classificados nessas categorias pois atuam na redução da solubilidade de compostos hidratados no cimento, sendo muito utilizados para melhorar as condições de lançamento e acabamento do concreto (especialmente em locais de clima quente, pois ocorre uma aceleração nas reações de hidratação do cimento) (HARTMANN *et. al*, 2011).

Para pavimentos de concreto de cimento Portland, a adoção de aditivos gera condições da mistura apresentar melhores condições em suas propriedades físicas e mecânicas, necessitando sempre de um controle do concreto para cada situação específica. Assim a utilização dos redutores de água (plastificantes e superplastificante), dos incorporadores de ar e dos aceleradores ou retardadores de pega dependerá de fatores como a

trabalhabilidade desejada, as condições de lançamento, bem como, da temperatura, dos agentes corrosivos atuantes no pavimento, da resistência esperada, da homogeneidade da mistura, etc.

### **2.3.3. Fibras**

O concreto apresenta características que lhe conferem o posto de material estrutural mais utilizado no mundo, porém este também expõe limitações como o seu comportamento frágil, resistência à tração muito reduzida se comparada à sua resistência a compressão, além de uma baixa capacidade de deformação do material antes de sua ruptura, sendo assim, uma das técnicas empregadas para inibir essas limitações se encontra na utilização de fibras (FIGUEIREDO, 2011).

Os concretos com fibras podem ser definidos como compósitos, ou seja, materiais constituídos de, pelo menos, duas fases distintas principais: a própria matriz do concreto e as fibras, que podem ser produzidas a partir de diferentes materiais, como aço, vidro, polipropileno, náilon, entre outros (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras curtas são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal.

São exemplos deste material as fibras de polipropileno que podem ser divididas em dois tipos básicos: monofilamento e fibriladas. As fibriladas apresentam-se como um conjunto de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha das fibriladas promove um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, devido ao efeito de intertravamento (BENTUR; MINDESS, 1990).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008) é conveniente classificar os compósitos reforçados com fibras como uma função da fração volumétrica de fibra, como apresentado abaixo:

- Baixa Fração Volumétrica (<1%), são fibras utilizadas para reduzir a fissuração por retração.
- Fração volumétrica moderada (entre 1 e 2%). A presença de fibras nessa fração aumenta o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto.

- Alta fração volumétrica (maior que 2%). As fibras utilizadas nesse nível levam ao endurecimento por deformação dos compósitos.

#### **2.3.4. Cimento Portland**

Conforme NEVILLE (1997), cimento pode ser considerado todo o material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compactado.

Já a ASTM C 150 define *cimento Portland* como um cimento hidráulico produzido pela moagem do clínquer constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

O cimento Portland, no Brasil, baseia-se nas normas do modelo europeu, que atualmente conta com mais de vinte e sete tipos de cimentos normatizados pelo CEN (EN 197-1:2000), porém aqui se dispõe de oito tipos básicos de cimentos Portland normatizados, os quais com seus subtipos e classes de resistência chegam a mais de duas dezenas disponíveis para as mais variadas utilizações (BATTAGIN, 2011).

O quadro 1, apresenta os tipos de cimento com suas nomenclaturas e conteúdos de constituintes especificados em normas:

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes (MPa)	Conteúdo dos Componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolona	Fíler Calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	0		
Comum com Adição	CP I - S	25, 32, 40	99-95	1-5		
Composto com Escória	CP II -E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CP II -Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CP II -F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI		100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	(*)			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40				

(\*) A composição depende do tipo do qual é derivado.

**Quadro 1 Tipos de Cimento Portland Normalizados no Brasil. Fonte: BATTAGIN, 2011.**

Devido às características especiais de alguns tipos de cimentos, o que confere a estes uma melhor aplicação para cada situação, foram normalizadas separadamente, o que acarreta uma utilização mais correta, conforme a aplicação, de cada cimento no mercado.

Assim as normas apresentam-se de forma a atenderem: 1) a necessidade de resistência aos sulfatos (ABNT NBR 5737:1992); 2) a necessidade de baixo calor de hidratação (ABNT NBR 13116:1994); 3) a necessidade de um cimento branco (ABNT NBR 12989:1993).

No quadro 2 observam-se as principais características que o cimento confere aos concretos, argamassas e pastas, em igualdade de condições (ABCP, 2002).

Influência	Tipo de Cimento					
	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	ARI	Resistente aos Sulfatos	Branco Estrutural
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Menor	Maior
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão

Quadro 2 - Influência do Tipo de Cimento nas Propriedades de Pastas, Argamassas e Concretos. Fonte: ABCP, 2002.

Diversos fatores são relevantes para o cimento Portland, como o tempo de pega, a estrutura do cimento hidratado, a finura do material e o calor de hidratação. Conforme a modificação destes fatores os cimentos apresentaram propriedades e microestruturas distintas, o que pode ser benéfico ou não para determinada situação de uso, senão bem especificado.

Em NEVILLE (1997) define-se pega como o termo usado para referência ao enrijecimento da pasta de cimento. Pega está relacionada com a mudança do estado fluido para o estado rígido e embora durante a pega exista um ganho de resistência, para efeitos práticos, é importante distinguir a pega do endurecimento, que se refere ao aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

A pega e o endurecimento são os resultados das reações químicas do cimento com a água, que é comumente denominada hidratação do cimento. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A hidratação do cimento tem grande importância para o concreto, pois as reações decorrentes do processo de hidratação são as responsáveis por conferir as características adequadas ao concreto, melhorando as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, por isso, deve-se ter um controle

deste processo para a obtenção de melhores resultados finais, gerando um material mais homogêneo, coeso e com menores problemas relacionados à durabilidade e resistência.

Outra característica que deve ser considerada na composição do cimento Portland é a sua finura, uma vez que, a mesma afeta a reatividade do cimento com a água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dentre os aspectos que tangem os processos de hidratação e endurecimento do cimento existe uma que deve ser considerada de forma especial, o calor de hidratação.

Os compostos, de cimento Portland são produtos de reações a alta temperatura que não estão em equilíbrio e, assim, estão em estado de alta energia. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com água para adquirir estados estáveis de baixa energia, e para este processo denomina-se liberação de energia em forma de calor, sendo conhecido com o calor de hidratação (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Segundo o mesmo autor, o calor de hidratação do cimento tem importância para diversos aspectos na tecnologia do concreto, sendo, às vezes, favorável (exemplo: estruturas de concreto-massa) e, outras vezes, desfavorável (exemplo: concretagens no inverno, onde se encontra temperaturas muito baixas para o fornecimento de energia de ativação para as reações de hidratação).

Para a fabricação do cimento é necessário um controle rigoroso dos distintos processos industriais, o que acarreta na realização de um grande número de ensaios nos laboratórios das unidades industriais para o controle da produção, que envolve as características químicas e físicas das matérias-primas iniciais e da mistura crua e controles por sistemas *online* de tecnologia (BATTAGIN, 2011).

Para garantir a qualidade necessária ao produto final e para atender as normas da ABNT nos distintos cimentos, são efetuados ensaios para determinar as suas características físicas e químicas como: Finura e Resistência mecânica do cimento; Área específica Blaine; Granulometria por difração a laser; Resistência mecânica e interação com a finura do cimento.

Para o concreto, o cimento Portland é vital, sendo este responsável pelo processamento da mistura, através dos seus ligantes hidráulicos, o que

ocasiona as reações de hidratação e conseqüentemente confere a mistura elevadas condições em suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, se devidamente controlada esta tecnologia.

### **2.3.5. Resistência à tração na flexão**

As propriedades mecânicas do concreto são responsáveis pelos principais fatores que fazem do concreto um material resistente e durável para o emprego em pavimentos com tráfego intenso e cargas que geram grandes esforços na estrutura. Sua verificação através de ensaios é significativamente importante para a obtenção de concretos com especificações adequadas para o seu uso nos mais diversos modelos de pavimentos.

Para Metha e Monteiro (2008) a resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. Na pavimentação, as estruturas de concreto têm sua resistência intimamente ligadas com a formação de fissuras, que é proveniente das tensões de tração na flexão, promovidas pelos esforços repetidos que acabam superando a resistência à fadiga e ocasionam a ruptura. Estas tensões provocam as fissuras na estrutura de um pavimento de concreto, o que promove os mais diversos processos de deterioração na vida útil da mesma.

Assim, a avaliação mais específica dos fenômenos que regem a resistência à tração na flexão torna-se necessária para um bom dimensionamento das estruturas de concretos para pavimentação, a fim de elucidar os conceitos e as propriedades deste material, desde sua moldagem até suas condições de cura.

Na resistência à tração na flexão, vários aspectos se correlacionam e se apresentam como fundamentais para a mesma, podendo-se destacar: a porosidade, que tem uma relação inversamente proporcional a resistência, a relação água/ cimento; que quanto mais elevada, aumenta a porosidade da estrutura diminuindo sua resistência; a incorporação de ar; o tipo de cimento que pode acelerar as reações de hidratação nas primeiras idades, proporcionando resistências à tração na flexão mais baixas se comparadas com os cimentos que retardam a hidratação do cimento, como os cimentos

com adição de pozolanas, a água de amassamento; as condições de cura e a idade de cura, que pode influenciar de forma benéfica ou não na estrutura do concreto, afetando diretamente sua resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

É necessário que o controle tecnológico do concreto de cimento Portland empregado em pavimentos seja realizado por meio de ensaios de medida da resistência à tração na flexão em corpos de prova, através de amostras prismáticas moldadas e curadas em laboratório.

A determinação da resistência à tração na flexão se dá com a utilização de corpos de prova prismáticos ensaiados à flexão, conforme Figura 3. Para a ocorrência da tração por flexão realiza-se o ensaio com a utilização de suportes que fazem com que a viga de concreto simples esteja bi apoiada, podendo ser aplicadas duas forças nas suas seções transversais, no terço médio da viga, ou uma força concentrada no meio do vão da seção, conforme preconiza norma ABNT NBR 12142:2010.

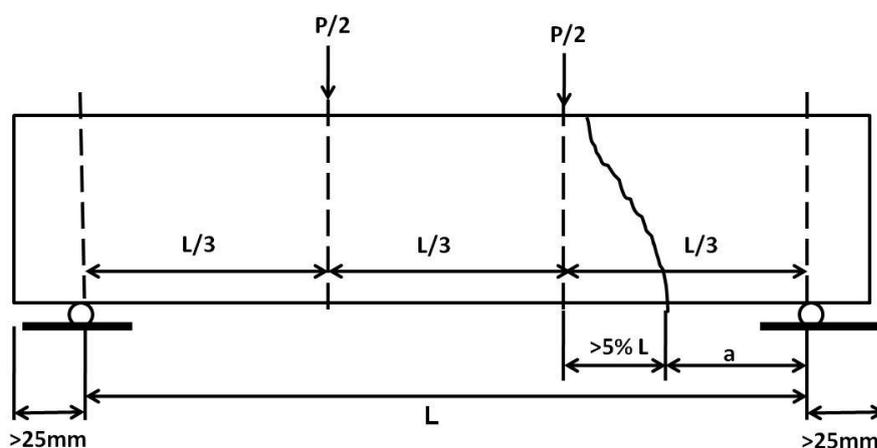


Figura 3 - Caso de ruptura fora do terço médio e ensaio de tração na flexão (ABNT NBR 12142, 1991)

Uma seção do corpo de prova alcança sua tensão máxima quando a região entre as duas forças aplicadas fica sujeita a um momento fletor máximo e as seções se apresentam com esforços cortantes quase nulos, tendo em vista que essas forças cortantes, de pequena intensidade, apenas atuam pela ação do peso próprio do corpo de prova.

Com a ruptura ocorrendo na seção transversal entre as forças concentradas (2 cutelos) aplicadas, a resistência à tração na flexão, pode ser determinada a partir da equação 1.

$$f_{ct,f} = \frac{M}{W} = \frac{Fl}{bh^2} \quad \text{Equação 1}$$

Se a ruptura ocorre na seção transversal que está entre o plano de aplicação de uma das forças e o plano que contém a seção de um dos apoios, a resistência à tração na flexão é determinada pela equação 2.

$$f_{ct,f} = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \text{Equação 2}$$

Segundo a hipótese de Navier, ruptura da viga de concreto simples ocorre sem a distribuição linear das tensões e para a obtenção das equações 1 e 2 esta hipótese foi considerada válida.

Para a realização deste ensaio, no Brasil, adotam-se como padrão amostras prismáticas com as dimensões de 150x150x500 mm, mas também é aceito amostras em dimensões menores com 100x100x400 mm, o que facilita a realização deste ensaio, com uma redução significativa de material e carga de ruptura.

Os estudos de Cervo (2004) verificaram a possibilidade de reduzir as dimensões dos corpos de prova prismáticos para o ensaio de tração na flexão, tendo em vista todas as dificuldades que os corpos de prova com as dimensões recomendadas por norma (150x150x500 mm) ocasionam para a execução deste ensaio.

Segundo Cervo *et al.*(2004) o peso da amostra e a suas elevadas dimensões causam problemas no manuseio do corpo de prova, no posicionamento correto da peça para o ensaio de tração na flexão, no elevado nível de carga que deve ser imposto sobre o corpo de prova para chegar à ruptura e nos custos envolvidos no ensaio, que tendem a ser mais elevados quanto maiores forem às dimensões das peças ensaiadas. Com a redução da dimensão do corpo de prova prismático para 100x100x400 mm, o ensaio torna-se mais fácil.

Em laboratório, a resistência à tração na flexão ainda está sujeita a dispersões devido a fatores climáticos, moldagem, cura, etc; que são evidenciadas em pista, mesmo que de maneira mais atenuada, mostrando a necessidade de se reportar aos processos executivos que dosam em laboratório os concretos empregados em campo (Oliveira *et al.*, 2008).

Na literatura encontram-se poucos estudos relacionados ao ensaio de tração na flexão para concretos empregados em pavimentos, porém autores como Sachet (2012), Tseng (2010) e Batezini (2013) realizaram estudos através do ensaio de tração na flexão e de outras propriedades mecânicas para concretos com a incorporação de fresados para bases de pavimentos, com a reutilização de agregados reciclados provenientes de pavimentos de concreto antigos para novos pavimentos de concreto e em concretos permeáveis para revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves, respectivamente.

Nos estudos de Sachet (2012) foram estudados os efeitos da incorporação de agregados fresados em concreto compactado com rolo (CCR), sendo produzidos 6 diferentes misturas: CCR de referência (CCR - 1) com areia industrial e serviu de parâmetro para análise das demais misturas: CCR com areia natural (CCR - 2), CCR com substituição de 100% da areia por agregado fresado (CCR1 - AF), CCR com a substituição de 50% de agregado natural por 50% da fração total do agregado (CCR1 - FT). Os ensaios de tração na flexão mostraram que a incorporação do agregado fresado, em qualquer fração, diminuiu bruscamente a resistência mecânica dos corpos de prova, em relação ao CCR referência. Embora a incorporação do agregado fresado tenha diminuído a resistência conseguiu-se verificar que este poderia ser utilizado como base e sub-base de pavimentos, pois alcançou parâmetros mecânicos que viabilizariam seu uso.

Já no trabalho de Tseng (2010) apresenta resultados da análise das características dos agregados produzidos da britagem de antigas placas de concreto do Rodoanel Metropolitano Mário Covas, onde no estudo das características mecânicas dos concretos a resistência à tração na flexão, a resistência à tração na compressão e o módulo de elasticidade diminuíram conforme se aumentou a absorção de água ponderada dos agregados.

### 2.3.6. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é considerada a propriedade mais importante do concreto, já que a esta os códigos nacionais e internacionais procuram associar as demais resistências e propriedades. A determinação é feita pelos ensaios à compressão de corpos de prova de dimensões padronizadas.

Também são padronizados a moldagem, o tempo em que os corpos de prova ficam nas fôrmas, o tempo e tipo de cura depois de desmoldados e o nivelamento da face pela qual ocorreu a moldagem no caso de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos.

No Brasil, o corpo de prova adotado como padrão é o cilíndrico de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, mas o mais utilizado é o cilíndrico de 10x20 cm, moldado e preparado para ensaio de acordo com o método indicado na ABNT NBR 5738 (2003) e ensaiado à compressão de acordo com o método indicado na ABNT NBR 5739 (2007).

Por ter grande variabilidade e pela maior dificuldade na realização dos ensaios de tração na flexão, é comum em obra as empresas preferirem trabalhar com dados de resistência à compressão axial para avaliação da qualidade do concreto, inclusive porque os métodos de dosagem se baseiam neste fator. Em aplicações para pavimentos “*fast track*” (liberação rápida para o tráfego), onde há a necessidade de se conhecer os valores de resistência à tração na flexão em idades iniciais, surge então a necessidade de obter-se valores confiáveis da relação entre estes dois parâmetros.

Embora as resistências à tração na flexão e à compressão sejam relacionadas entre si, não possuem uma proporcionalidade direta (Metha e Monteiro, 1994). Existem diversas relações estabelecidas em normas e na literatura em geral propondo expressões matemáticas que possibilitam estimar-se a resistência à tração na flexão a partir da resistência à compressão aplicáveis a concretos já maduros. Estas expressões não são válidas para pequenas idades, já que a relação entre resistência à tração/compressão diminui com a idade de cura (Metha e Monteiro, 1994).

A ABNT NBR 6118 (2014) estabelece que, para concretos com  $f_{ck,j} \geq 7\text{MPa}$ , a resistência à tração direta pode ser indiretamente obtida via resistência à compressão em idades diferentes de 28 dias através das seguintes equações 3, 4, 5 e 6.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad \text{Equação 3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad \text{Equação 4}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad \text{Equação 5}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $f_{ct,m}$  e  $f_{ck}$  são expressos em MegaPascal.

Esta norma recomenda que se considere a resistência à tração direta  $f_{ct}$  igual a 70% do valor da resistência à tração na flexão,  $f_{ct,f}$ , portanto, na falta de ensaios para obtenção de  $f_{ct,f}$ , esta pode ser indiretamente, segundo Rheinheimer (2006), obtida pelas equações 7 e 8 e pela equação de relação 9.

$$f_{ct,fm} = 0,7 \left( 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \right) \quad \text{Equação 7}$$

$$f_{ct,fk,inf} = 0,21 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad \text{Equação 8}$$

Portanto, a seguinte relação será uma constante.

$$\frac{f_{ct,fk,inf}}{f_{ck}^{\frac{2}{3}}} = 0,21 \quad \text{Equação 9}$$

No trabalho de Oliveira *et al.* (2008), realizou-se um estudo comparativo entre a resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial empregando diferentes métodos de cura, (cura química e sacos de anagem) e aqueles descritos por norma (cura úmida) para misturas em concreto convencional. Os resultados indicam que, empregando-se a equação apresentada pela NBR 6118, a resistência à tração na flexão obtida a partir dos ensaios de resistência à compressão axial são inferiores àqueles obtidos pelo ensaio de tração na flexão, ou seja, os dados resultam em valores de tração na flexão menores do que aqueles realmente obtidos pelo ensaio. Isto não é exatamente um problema (do ponto de vista de dimensionamento), uma vez que se os resultados da norma são inferiores, quando usados para dimensionar pavimentos de concreto se estará subestimando a resistência real do concreto.

RICHARDSON *et al.* (2014) seguiu algumas especificações que permitem a substituição de resistência à compressão pelo ensaio de resistência à flexão para o controle de projetos em que a resistência à flexão é crítica, tais como para pavimentos. Os mesmos autores verificaram que existem certos erros durante a produção de concreto e agregados, em que a utilização dos testes de controle de qualidade de resistência à compressão podem não ser suficientemente sensíveis para detectar alterações significativas na resistência à flexão. Através de um levantamento das operações de produção de concreto verificou-se que numerosos erros de produção (variáveis) comumente ocorrem na prática. Treze dessas variáveis de produção de plantas foram examinadas por seus efeitos sobre as mudanças na resistência à compressão em relação à resistência à flexão. Combinando os resultados do presente estudo com os dados reportados na literatura indicaram que a resistência à compressão pode ser menos sensível do que a resistência

à flexão em mudanças na forma de agregados de partículas e textura, graduação, tamanho máximo do agregado, mineralogia do agregado e relação do material de cimento-água. Assim, sobre determinadas condições, pode-se usar o teste de resistência à compressão em vez de um ensaio de resistência à flexão para o controle de qualidade.

### **2.3.7. Resistência à tração por compressão diametral**

Segundo Mehta e Monteiro, 2008, a resistência à compressão diametral é um índice adequado para os diversos tipos de resistências, sendo assim, uma relação direta deve existir entre as resistências de compressão, tração ou flexão de um concreto específico, porém nem sempre se aplica esta aproximação, mesmo sendo válida. Observa-se que vários fatores influenciam na resistência, como: métodos que avaliam a tração direta (tração indireta, ensaio de tração por resistência à tração por compressão diametral ou ensaio de tração na flexão), qualidade do concreto, características dos agregados e aditivos ou adições.

Assim se faz necessário conhecer as características dos concretos também pela resistência à tração indireta (resistência à tração por compressão diametral), através do ensaio, que em mecânica dos solos é conhecido como “ensaio brasileiro”, que foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, em 1943.

Após algumas averiguações e considerações, se idealizou o ensaio de resistência à tração por compressão diametral que hoje é normatizado pela NBR 7222, conforme apresentado na Figura 4.

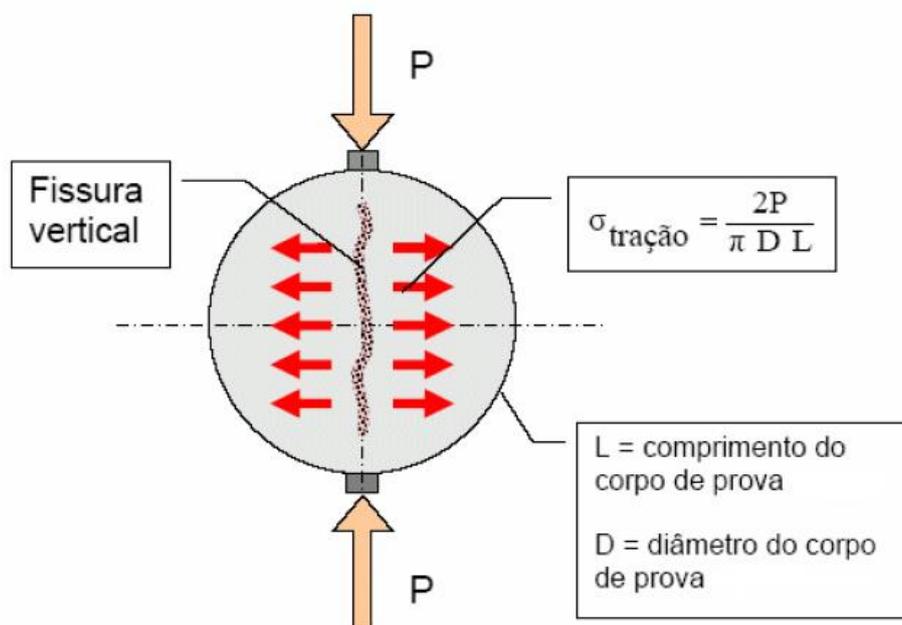


Figura 4 - Representação do rompimento por resistência à tração por compressão diametral. Fonte: Eduardo C. S. Thomaz (2009).

Segundo De Larrard (1992), a resistência à tração por compressão diametral consegue alcançar seu valor máximo próximo aos 14 dias, ao contrário da resistência à compressão axial que pode ainda aumentar de 10 a 20% após atingir os 14 dias. Deve-se levar em consideração que estes são valores estimados para concretos sem adições minerais, com isso, podem ocorrer alterações nesses percentuais conforme o tipo de concreto em análise.

Estudos realizados por Balbo (2013) a partir da consideração que as medidas de resistência à tração indireta não são normalmente cotejadas na dosagem ou no controle tecnológico de concretos em pavimentação; os resultados de ensaios de resistência à tração na flexão, em especial com dois cutelos, são empregados para tais finalidades, entretanto, nenhum de ambos os tipos de ensaio mede de fato a resistência real do concreto acabado na forma de placa por não representarem um componente estrutural que responde mecanicamente em estado plano de tensões.

O autor realizou uma revisão crítica da literatura que permitiu esclarecer que as medidas de resistência são afetadas pelo efeito escala, ou seja, pelo tamanho dos corpos de prova e ainda os estudos deixaram claro que formatos diferentes de corpos de prova e testes distintos impõem campos de tensões particulares para cada caso que implicam em resistências à tração diferentes

para um mesmo concreto. As resistências à tração em testes de resistência à tração por compressão diametral são inferiores àquelas aferidas em flexão de vigotas, sendo que este último teste é conservador em relação à resistência em estado plano de tensões.

### 2.3.8. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação dentro de um limite proporcional adotado (MEHTA e MONTEIRO,1994). No concreto, é dado pela inclinação da curva de tensão-deformação sob um carregamento uniaxial, segundo o que prescreve a ABNT NBR 8522 (2008) –*Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio*. A mesma determina três métodos de determinação dos módulos de deformação longitudinal, resumido segundo HELENE (1998):

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. Do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e  $0,3 f_c$  (tensão de ruptura) e ao módulo de elasticidade secante a  $0,3 f_c$ . Convenciona-se indicar este módulo de deformação por  $E_{ci}$ , geralmente expresso em GPa.

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de  $f_c$ . Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 MPa e  $0,4 f_c$ , que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a  $0,4 f_c$ , pois esta é geralmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Convenciona-se indicar este módulo de deformação por  $E_c$ , geralmente expresso em GPa.

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica. Metha e Monteiro (2008) complementa que o módulo cordal é dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação, inicia-se de uma deformação longitudinal de  $50 \mu\text{m/m}$  até o ponto que corresponda a 40% da carga última.

Mehta e Monteiro (2008) ainda contemplam em sua descrição dos diversos tipos de módulo de elasticidade, o módulo dinâmico, que corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial, sendo, geralmente, 20, 30 e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência respectivamente.

Na Figura 5 podem-se observar os três tipos de determinações do módulo de elasticidade para o ensaio de resistência à compressão axial (ABNT NBR 8522), sendo a declividade do segmento OD o módulo tangente inicial, a declividade da reta correspondente à tensão SO corresponde ao módulo secante e a declividade da reta TT' traçada tangente a qualquer ponto da curva tensão X deformação corresponde ao módulo tangente. Outros tipos de módulo podem ser estabelecidos, tais como módulo dinâmico, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto, etc., em geral todos de pouca utilização prática.

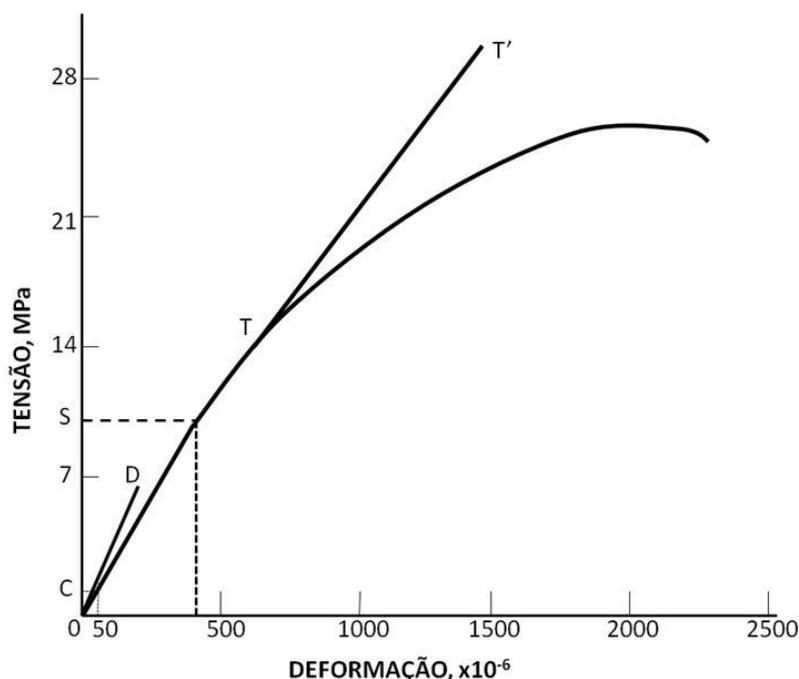
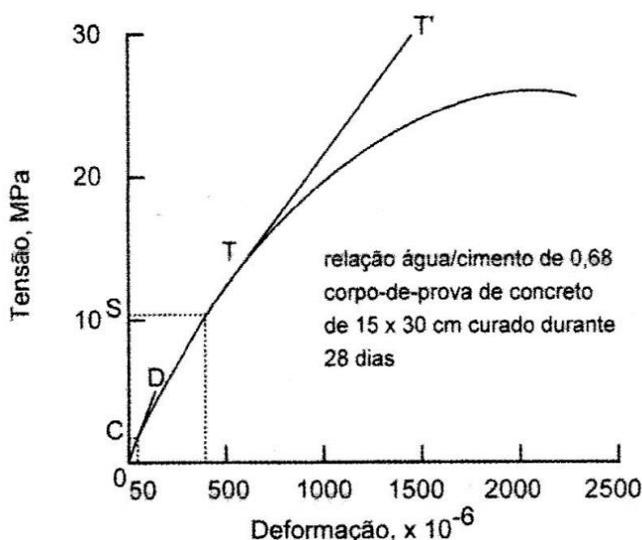


Figura 5 - Gráfico Tensão x Deformação. Fonte: MEHTA e MONTEIRO,1994

Na Figura 6, Mehta e Monteiro (2008) diferenciam os diversos módulos de elasticidade e os métodos de cálculo que os determinam.



#### Cálculo dos Módulos de Elasticidade

$$f_t = 26 \text{ MPa}$$

$$40\% f_t = 10,4 \text{ MPa} = S O$$

**Módulo Secante:** declividade da linha correspondente à tensão SO

$$10,4 / (417 \times 10^{-6}) = 24,9 \text{ GPa}$$

**Módulo Cordal:** declividade da linha correspondente à tensão SC (10,4 - 1,6) / (417 x 10<sup>-6</sup> - 50 x 10<sup>-6</sup>) = 24,0 GPa

**Módulo Tangente:** declividade da linha TT' traçada de forma tangente a qualquer ponto da curva  $\sigma$ - $\epsilon$  (30 - 14,6) / (1445 x 10<sup>-6</sup> - 625 x 10<sup>-6</sup>) = 18,8 GPa

**Módulo Dinâmico (Módulo Tangente Inicial):** declividade da linha OD da origem  $5 / 143 \times 10^{-6} = 34,9 \text{ GPa}$

Figura 6 - Diferentes Tipos de Módulo de Elasticidade e o Método que os Determina. Fonte: METHA e MONTEIRO, 2008.

O concreto é um material complexo, e apesar de os agregados graúdos e da pasta de cimento apresentarem-se lineares no gráfico tensão x deformação, o concreto quando submetido à compressão observa-se a não linearidade da curva. Alterações na microestrutura, como o aumento do volume de vazios ou da quantidade de microfissuras na zona de transição pode exercer grande influência nas suas propriedades principalmente de resistência e deformabilidade. A zona de transição é o elo entre a pasta e o agregado graúdo. A rigidez do concreto não reflete totalmente a rigidez de cada um dos seus componentes, tanto que a curva tensão-deformação do concreto fica entre os diagramas da pasta de cimento e do agregado, geralmente lineares (MEIRA, 2009).

A não-linearidade do diagrama do concreto é proveniente da existência da zona de transição e de suas microfissuras. De acordo com METHA e MONTEIRO (1994):

“a quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade ambiente e história térmica do concreto”.

Os concretos com baixa resistência apresentam maior capacidade de acomodação plástica, rompendo com deformações maiores, enquanto concretos de resistências elevadas têm uma curva tensão x deformação com maior inclinação na origem sendo relativamente frágeis. (MEHTA e

MONTEIRO, 1994)

Para uma análise mais detalhada das deformações elásticas ou visco-elásticas de estruturas de concreto é que faz necessário conhecer o módulo de elasticidade, que dependendo da sua aplicação poderá ser módulo tangente, secante, cordal ou dinâmico.

No concreto utilizado para pavimentação, onde a resistência à compressão não é o parâmetro básico no dimensionamento do material, mas sim, a resistência à tração na flexão, pode-se realizar a análise do módulo de elasticidade aparente (ou seja, relativo ao carregamento estático) através do módulo cordal, admitindo-se uma distribuição linear das tensões e deformações na amostra. Através do ensaio a flexão é possível verificar a deflexão vertical que ocorre no ponto central da amostra, ou seja, a flecha, que ocorre com a aplicação do carregamento e pode ser medida com auxílio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo Yoke, posicionado na altura média da amostra prismática (MARANGON, 2011).

Para obtenção do módulo de elasticidade se faz necessário à adoção de um método que possibilite a aquisição de dados, que pode não apenas gerar resultados para este, mas também, obter medidas de tenacidade e de resistência à tração na flexão, como no caso do método “Yoke”.

O método mais utilizado para medir a tenacidade e a resistência à tração na flexão é o ASTM C1018 (1997) proposto pela *American Society for Testing and Materials*, normalmente aplicado em conjunto com o método ASTM C78 (2010). Este método é muito similar ao método prescrito pela *Japan Society of Civil Engineers*(JSCE-SF4, 1984), sendo este, o de concepção mais simples e também, sendo um dos mais utilizado para determinação da tenacidade na flexão, no Brasil. Ambos são realizados em corpos de prova prismáticos carregados segundo quatro cutelos submetidos aos esforços de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000). Ainda existem outros métodos propostos pela *European Federation of Producers and Applicators of specialist Products for Structures* (EFNARC, 1996), *American Society for testing and Materials* (ASTM C1399-10) e pela *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM TC162-TDF (2002).

Ao se realizar o ensaio de tração na flexão a máquina confere duas cargas concentradas, cada uma delas à distância de  $L/3$  (um terço do vão livre)

até o apoio mais próximo. A deflexão vertical do ponto central da amostra, ou seja, a flecha será medida por meio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo tipo “Yoke” (JSCE-SF4, 1984) (Figura 7), posicionado à altura média da amostra prismática.

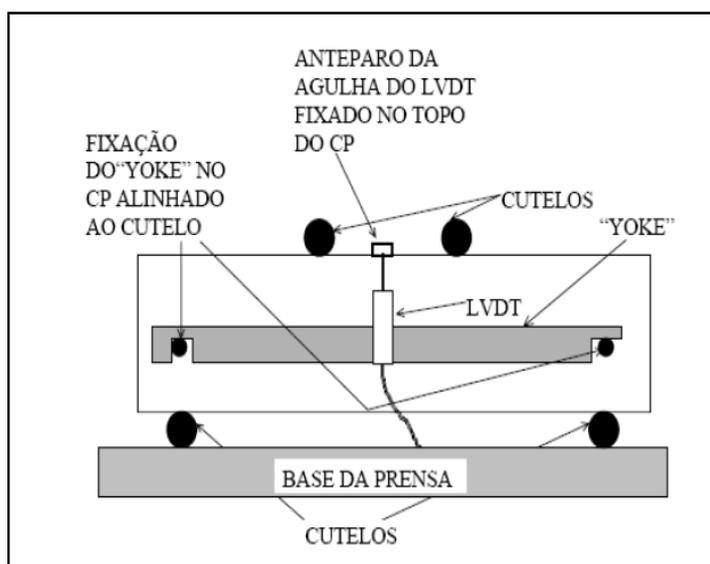
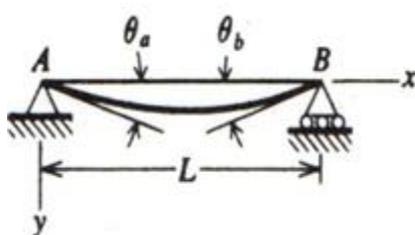


Figura 7 - Desenho esquemático do ensaio de tração na flexão com o suporte “Yoke” e LVDT para medida da deformação (JSCE-SF4, 1984).

Utilizando-se o método de Yoke, através das curvas de carga x deslocamento é possível obter a tenacidade do material, sendo muito utilizado em concretos reforçados com fibras, podendo-se também obter o módulo de elasticidade seguindo a dedução de Timoshenko/Gere (1994), para obtenção das deflexões e inclinações de Vigas Simplesmente Apoiadas, conforme se pode observar nas Figuras 2.8 (a) e (b).



$El = \text{constante}$

(a)

$v = \text{deflexão na direção } y$

$v' = \frac{dx}{dv} = \text{inclinação da linha elástica}$

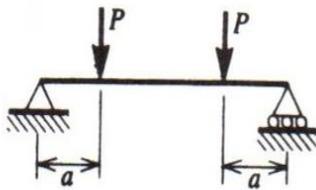
$\delta_c = v\left(\frac{L}{2}\right) = \text{deflexão no meio do vão}$

$x_1 = \text{distância de A ao ponto de deflexão máxima}$

$\delta_{máz} = v_{máz} = \text{deflexão máxima}$

$\theta_a = v'(0) = \text{ângulo na extremidade esquerda da viga}$

$\theta_b = -v'(L) = \text{ângulo na extremidade direita}$



(b)

$$v = \frac{Px}{6EI} (3aL - 3a^2 - x^2) \quad 0 \leq x \leq a$$

$$v' = \frac{P}{2EI} (aL - a^2 - x^2) \quad 0 \leq x \leq a$$

$$v = \frac{Pa}{6EI} (3Lx - 3x^2 - a^2) \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

$$v' = \frac{Pa}{2EI} (L - 2x) \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$$

$$\theta_a = \frac{Pa(L-a)}{2EI}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = v_{m\acute{a}x} = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2)$$

Figura 8 - Deflexões e Inclinações de Vigas Simplesmente apoiadas. Fonte: Timoshenko/Gere (1994).

Assim, através do isolamento do módulo de elasticidade “E”, tem-se a equação 10.

$$E = \frac{P \cdot a}{24 \cdot I \cdot u} (3 \cdot L^2 - 4a^2) \quad \text{Equação 10}$$

Sendo que,

P – carga de ruptura dividido por dois;

a – distância entre o apoio e o ponto de aplicação do carregamento;

I – momento de inércia da seção transversal da viga;

u – deslocamento vertical medido no meio da viga;

L – distância entre os apoios.

Para o cálculo do módulo de elasticidade aparente (ou seja, relativo ao carregamento estático) a expressão pode ser mais bem apresentada na

equação 11, onde se admite um carregamento máximo e mínimo, bem como, os respectivos deslocamentos.

$$E_{icp} = \frac{\frac{Pfc_{icp} - Pfi_{icp}}{24.I} \cdot a}{(\delta f_{icp} - \delta fi_{icp})} (3.Lm^2 - 4a^2) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$E_{icp}$  = módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão (GPa);

$Pfc_{icp}$  = Carga Máxima (KN);

$Pfi_{icp}$  = Carga Mínima (KN);

$a$  = Distância entre o apoio e o ponto de aplicação do carregamento (mm);

$I$  = Momento de inércia da seção transversal da viga ( $mm^4$ );

$\delta f_{icp}$  = Deslocamento final vertical medido no meio da viga (mm);

$\delta fi_{icp}$  = Deslocamento inicial vertical medido no meio da viga (mm);

$L$  = Distância entre os apoios (mm).

Utilizando-se a medida de flecha no centro da viga, com uso de LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), através do dispositivo “Yoke”, também é possível determinar o módulo de elasticidade, a partir do ensaio de tração na flexão por meio da analogia de Möhr.

A partir do valor da flecha obtido pelo LVDT se obtém o módulo de elasticidade estático de uma respectiva amostra, sendo necessário adotar um carregamento e deslocamento máximo, podendo variar entre 60 a 80% da carga de ruptura.

Assim, o cálculo se apresenta pela analogia de Möhr que resulta na equação 12 para o caso de um corpo de prova prismático em ensaio de tração na flexão com dois cutelos:

$$E = \frac{23.P.l^3}{108.b.h^3.f} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão (GPa);

$P$  = Carga máxima de ruptura (N);

$L$  = dimensão do vão (mm);

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

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

$f$  = flecha no meio do vão (mm).

Batezini (2013) realizou ensaios que avaliaram concretos permeáveis para o uso de revestimentos de pavimentos em áreas de veículos leves, por meio da realização de ensaios laboratoriais de caracterização mecânica e hidráulica para três diferentes misturas com variação do diâmetro máximo dos agregados, apresentando resistência à tração na flexão de aproximadamente 2,1 MPa e módulo de elasticidade estático, obtido pela Analogia de Möhr, na ordem de 15.000 MPa, sendo estes em média 50% inferiores às resistências características de concretos convencionais para pavimentação, ocorrendo o mesmo para o módulo de elasticidade.

Tseng (2010) também analisou em seu trabalho a influencia do módulo de elasticidade nas amostras estudadas onde se observou uma diminuição do módulo de elasticidade conforme se aumentou a absorção de água ponderada dos agregados produzidos através da britagem de antigas placas do Rodoanel Metropolitano Mário Covas.

Já Sachet (2012) realizou estudos sobre as propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para pavimentação

onde para o módulo de elasticidade obtido por meio da instrumentação dos corpos de prova com LVDT (linear variable differential transducer) e strainages, assim como o módulo de elasticidade dinâmico, obtido por pulso ultrassônico, apresentaram quedas significativas, quando comparados ao CCR (concreto compactado com rolo) de referência em todas as misturas com incorporação de fresados de revestimentos asfálticos, sendo que esta redução pode ser explicada pela presença dos agregados compostos (grumos) que contém fase asfáltica. Além disso, o agregado sofreu fratura mecânica pela fresagem que por consequência, reduziu o módulo.

Nos estudos de Marangon (2012) foram produzidos e caracterizados concretos autoadensáveis contendo agregados graúdos com diâmetros máximos de 9,5 mm e 19 mm reforçados com frações volumétricas de fibra de aço variando de 1 % a 1,5 % e comprimentos de 35 mm e 60 mm, onde se realizou ensaios para determinação das propriedades mecânicas das misturas analisadas e se obteve, para os módulos de elasticidade valor médio de 35 GPa, não tendo ocorrido variação significativa entre os resultados dos diversos concretos testados. Também as tensões de primeira fissura relativas a todos os concretos foram semelhantes.

### **2.3.9. Cura**

A cura do concreto é um dos principais procedimentos do controle tecnológico, devido a sua extensa área superficial, ou seja, grande relação área/volume. Assim como em qualquer estrutura de concreto, em pavimentos, apresenta-se como a ferramenta capaz de manter a continuidade das reações de hidratação do cimento pela preservação da umidade no material.

Cura é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e a entrada de umidade para o concreto (Neville, 1997).

Para Neville (1997) dá-se o nome de cura ao conjunto de medidas com a finalidade de evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento, que reage a pega e ao endurecimento e consiste em controlar a temperatura e saída e entrada de umidade para o concreto.

A umidade e a temperatura são de fundamental importância em todos os processos que envolvem o concreto que será utilizado em um pavimento. Desta forma, deve-se observar e conhecer os métodos de cura possíveis de serem empregados para obterem-se as propriedades do concreto de forma desejada e assim diminuir o potencial de fissuração que poderia ocorrer das retrações autógenas e de secagem que ocorrem nas idades iniciais do concreto.

Para Thomaz (2005), os processos de cura úmida visam garantir as reações de hidratação e evitar a retração dos concretos, de forma que o material possa desenvolver resistência razoável antes que manifestem as tensões de tração nas superfícies das peças.

Segundo Neville (1997), o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou mais próximo possível de saturado, até que os espaços presentes dentro da massa fresca, que inicialmente estão preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento até que seja alcançada a condição desejável.

O controle da perda de água no concreto é de fundamental importância, devendo ser impedido através dos processos de cura, para não prejudicar o ganho de resistência nas primeiras idades, bem como para evitar a retração plástica, que ocasiona um aumento na permeabilidade e, conseqüentemente, uma redução na resistência à abrasão (NEVILLE, 1997).

De forma mais generalizada, conforme Tomaz (2005), cerca de 50 a 70% da retração total de um concreto ocorre nas primeiras idades (até 7 dias de cura). Para concretos com adições minerais (materiais pozolânicos, cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa), devido à sua estrutura muito densa que provém da utilização de materiais mais finos que realiza o refinamento dos poros, a cura tem influência significativa nas primeiras idades, sendo crucial para que ocorram as reações de hidratação, uma vez que, alguns materiais de sua estrutura dependem da presença de água para a ocorrência das reações.

Os pavimentos de concreto têm uma característica peculiar: a área superficial exposta. Esta peculiaridade faz com que as condições de ventos, temperatura e umidade do ar, produzam contração plástica na superfície do concreto,

imediatamente após o adensamento final do mesmo, originando fissuras que irão influenciar negativamente em suas propriedades mecânicas.

Os processos de cura aplicados em laboratório, em corpos de prova, sendo eles cilíndricos ou prismáticos, são muito distintos daqueles empregados em placas de concreto moldadas em pista e suas intensidades de cura também se diferem (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Os concretos com diferentes aplicações de cura, materiais, relações água/cimento, porosidades, irão apresentar-se com microestruturas diferentes, gerando diferentes resistências à tração na flexão para um mesmo pavimento.

A cura do concreto envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, tais como tempo, temperatura e umidade, consideradas imediatamente depois do lançamento de uma mistura de concreto na fôrma (METHA e MONTEIRO, 2008).

Segundo os mesmos autores, a realização da cura úmida deve ser iniciada logo após o lançamento do concreto no pavimento, quando ocorre o surgimento das primeiras reações de hidratação do cimento, sendo melhores os resultados obtidos na resistência e durabilidade, quanto maior o período de cura do mesmo, gerando um concreto com uma estrutura interna mais refinada, densa e com melhores condições para formação dos cristais. Ainda existem divergências quanto ao tempo de cura, pois este período pode variar conforme o tipo de cura empregado, o tipo de concreto e sua composição, que por sua vez, dependerá da relação água/cimento e da utilização ou não de adições minerais. Porém, existe um consenso quanto ao prazo mínimo, que deve ser de 7 dias de cura, podendo variar, conforme citado acima, pelo coeficiente geométrico da peça (relação volume/área exposta), composição do concreto, tipo de cimento, condições climáticas, etc. A cura úmida deve ser o método preferencial quando for importante controlar a fissuração devido à retração autógena ou retração térmica.

A norma (ABNT NBR 5738: 2003), que especifica as condições de moldagem e cura de corpos de prova de concreto, recomenda que os mesmos permaneçam em cura úmida até a data do ensaio.

Em concretos usuais (convencionalmente aplicados em pavimentação), a retração final é essencialmente de origem térmica e devido à secagem, enquanto no concreto de alta resistência, uma retração severa pode se

desenvolver durante o estado plástico e no estado endurecido (Mehta e Monteiro, 2008).

As constatações dos autores citados acima mostram que a retração ocorre de maneira diferente em cada tipo de concreto empregado na pavimentação e como a cura tem como uma das suas principais funções amenizar os efeitos da retração, a mesma, tem grande importância nos concretos empregados em pavimentos, pois a sua aplicação de forma planejada e correta, condiciona resultados significativamente melhores nas propriedades mecânicas e na durabilidade destes concretos.

Segundo Isaia (1995) a porosidade do material também é sensivelmente afetada pelo modo de cura, podendo até duplicar se houver uma secagem prematura da superfície do concreto, gerando um gradiente de dessecação interna, enquanto as reações de hidratação que regem o grau de maturidade do material cimentante estiverem em um período inicial. A porosidade pode ser afetada de diversas formas, desde a elevação da relação água/cimento que amplifica a mesma ou através da incorporação de adições minerais e da diminuição do teor de cimento que agem benéficamente no concreto, diminuindo a permeabilidade. O autor conclui que a porosidade está ligada diretamente com a quantidade, tipo de aglomerante e adições minerais, relação a/c e condições de cura.

As avaliações dos diferentes métodos de cura em concretos, se estende a diversos autores, como Agostini e Nunes (1996) que utilizaram a adição de sílica ativa em porcentagens de 5, 10 e 15% para diferentes métodos de cura (imersão em água, câmara úmida, filme plástico e lona PVC) com cimento ARI (de alta resistência inicial) e CII – E 32 para obter uma análise de qual método de cura ocasionaria melhores resultados de resistência para concretos de alta resistência à resistência à compressão axial, isto é, acima de 70 MPa.

Os autores verificaram que a cura por imersão em concretos de alta resistência tem sua eficiência reduzida devido à formação de uma zona superficial de baixa permeabilidade que dificulta o acesso de água às regiões mais internas, assim a cura com cobertores impermeáveis ou pelo envolvimento da peça por uma membrana tem realmente uma eficiência equivalente ou até melhor que a cura por imersão por água.

Para a realização dos ensaios, os autores utilizaram um traço piloto com relação a/c 0,32, consumo de 600 kg de cimento, relação agregado graúdo/agregado miúdo 1,5 e teor de água/ materiais secos de 8,5% e a partir do mesmo realizaram quatro concretos de alta resistência com adição de superplastificante e variações de sílica ativa ao cimento.

Para estes traços foram realizados diferentes procedimentos de cura IA 1 (desmoldagem – imersão em água- até data do ensaio), AI 4 (desmoldagem em um dia – câmara úmida por 3 dias e imersão no 4 dia – permanecendo até o ensaio), AI 7 (desmoldagem – câmara úmida por 6 dias e imersão no 7 dia- permanecendo até o ensaio), C (desmoldagem – permanência em câmara úmida até o ensaio), PL (desmoldagem e envolvimento do cp's em lona plástica, câmara úmida até ensaio), AL (desmoldagem e permanência em meio ambiente externo até a data de ensaio).

Foram denominadas “curas secas”, sem imersão em água, sendo enquadrado neste grupo às curas em câmara úmida (C), lona plástica (PL), em filme de PVC (PVC) e cura ao ar livre (AL) e as curas úmidas (IA 1), (IA 4) e (IA 7), sendo os últimos feitos CP II –E 32. Os cp's foram moldados para as seguintes idades de ensaio: 8, 28 e 91 dias. Foram elaborados diagramas de resistência x percentual de sílica para cada tipo de cura e idade e diagramas de resistência x tipo de cura para comparação entre o desempenho de cada tipo de cura.

Segundo Algostini e Nunes (1996) com aumento da sílica ativa, aumenta a compacidade do concreto, dificultando o acesso da água a regiões mais internas, verificando-se assim um bom desempenho das curas secas em comparação com as úmidas, porém até um teor de 10% de sílica, pois acima disso o desempenho das curas secas também cai.

Conforme o autor os melhores resultados para concreto sem sílica ativa ou pequena adição desta, apresentaram-se, aos 28 e 91 dias para cura por imersão em água, tão melhores quanto mais cedo foram colocados na imersão. Em concretos com mais de 10% de adição de sílica a membrana (filme de PVC) e a lona plástica apresentam eficiência equivalente às curas por imersão com água, mostrando que a utilização destes processos de curas in loco, na obra, ocasiona melhores resultados que a pulverização intermitente com água.

Avaliando o efeito das condições de cura na resistência à compressão e na permeabilidade do concreto, Tan e Gjørv (1996) estudaram quatro diferentes métodos de cura: (1) zero dia em água e 48 ou 66 dias ao ar; (2) dois dias em água e 46 ou 64 ao ar; (3) seis dias em água e 42 ou 60 ao ar; e, (4) 27 dias em água e 21 ou 39 ao ar. Observaram que os concretos curados pelos métodos (2) e (3) apresentaram resultados de resistência mais elevados se comparados com (4), considerado cura padrão.

Esta ocorrência, segundo os autores, deve-se pela diferença de umidade relativa do concreto que, sob condição de cura (2) e (3), foram até certo ponto secos e apresentaram menor umidade relativa. Quando existe a remoção da umidade da camada do gel do cimento, pode ocorrer a redução da pressão interna e ocasionar uma elevação na ligação das partículas dos produtos que constituem a hidratação, gerando um aumento de resistência.

Ainda observaram que para a penetração de água, nas curas (2) e (3) dos concretos com relação a/c menor ou igual a 0,4, os resultados mostraram-se coerentes.

No trabalho realizado por Ewertson e Petersson (1993) foi analisada a influência das condições de cura na permeabilidade e durabilidade do concreto empregando duas relações a/c: 0,35 e 0,50. As amostras de concreto foram expostas a três condições distintas de umidade: (a) em campo exposto a chuva; (b) em campo protegido da chuva; e (c) em laboratório. Os valores de penetração de água obtidos após um ano de exposição mostraram-se baixos, sendo mais notório nas amostras expostas à chuva.

A utilização da cura com água ou protegida por filme plástico se apresentou insignificante para a/c = 0,35, sendo o concreto mais permeável quando curado ao ar. O autor conclui que a após uma história de exposição, o conteúdo de umidade, depende da estrutura do material e de forma indireta depende das condições de cura, tendo em visto que a cura com água e a proteção com filme plástico, não produziram resultados discrepantes, ou seja, foram aproximadamente equivalentes, enquanto a inexistência de cura gerou um estrutura de material diferente.

Raithby e Galloway (1974) avaliaram as condições de umidade e idade na resistência à tração na flexão e na fadiga em flexão do concreto simples. Para a execução dos ensaios, os corpos de prova foram curados em água por

28 dias até três anos. Em etapa posterior os corpos de prova foram submetidos a quatro diferentes métodos de cura: (1) saturadas durante os ensaios; (2) secas por uma semana em condições de laboratório anteriormente ao início dos testes; (3) retiradas do tanque de cura e então secas ao forno a 105 °C por uma semana e, (4) secas ao forno e então, recolocadas na água por três semanas anteriormente ao início dos ensaios em condições saturadas. Os resultados mostraram que as amostras secas em condições de laboratório, obtiveram maiores resistências à tração na flexão estática se comparadas com as amostras secas em laboratório, sendo que as completamente saturadas apresentaram resistências medianas e em comparação as outras duas condições. A condição de teste (4) apresentou valores intermediários às condições (2) e (3).

Segundo os autores não existe uma explicação direta para as diferenças apresentadas nos ensaios para os diversos estados de umidade, porém acredita-se que provavelmente esteja ocorrendo uma pressão diferencial gerada pelo gradiente de umidade. Sendo esta constatação verdadeira, poderia explicar porque as amostras secas em laboratório foram menos resistentes que aquelas completamente saturadas. A maior resistência das amostras secas em forno pode ser atribuída pelo tempo acelerado em uma semana de secagem, lembrando que a amostra havia sido curada, anteriormente, em água por 28 dias. A resistência mais elevada pode ser atribuída pelo atrito interno gerado pela contração durante a secagem.

Cervo e Balbo (2004) avaliaram a resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação, em um trabalho de pesquisa, determinando a resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos submetidos a diferentes métodos de cura para o concreto de alta resistência (CAR). Foram empregados três traços distintos para o CAR que foram submetidos a uma mesma condição de cura. Posteriormente, amostras foram submetidas a diferentes condições de cura com o objetivo de avaliar as alterações nos resultados da resistência à tração na flexão com a utilização de diferentes métodos e idades de cura para um mesmo traço de CAR.

As constatações obtidas pelos autores possibilitaram concluir que o concreto de alta resistência empregado, moldado e curado nas condições de

laboratório, apresentou resistência à tração na flexão mais elevada do que a real condição de campo.

Assim, torna-se evidente que a resistência do CAR obtida em laboratório superestima as condições reais obtidas em campo, o que pode acarretar num erro de dimensionamento com a utilização de resultados (laboratoriais) que diferem da realidade, produzindo uma possível ruptura precoce no pavimento em suas primeiras idades.

Cervo *et al.* (2007) avaliaram a resistência à tração na flexão de concretos de alta resistência submetidos a diferentes métodos de cura, incluindo a cura química, sendo esta largamente empregada na pavimentação. Os resultados evidenciaram que existe a influência do método de cura na resistência à tração na flexão de concretos de alta resistência, onde observaram que o concreto no estado seco apresentou menor resistência que o concreto no estado saturado e o concreto saturado por 7 dias, mostrou-se com resistência mais elevada que o concreto com 28 dias no estado seco.

O ensaio de tração na flexão deve ser utilizado para avaliar a resistência do concreto empregado na pavimentação, porém ainda existem poucos estudos considerando este tema e correlacionando com os métodos de cura tipicamente empregados em pavimentação, sendo que, até a norma brasileira toma como padrão os métodos e tempos de cura empregados em ensaios de resistência à compressão axial, o que pode ser errôneo, uma vez que esses métodos e tempos de cura se diferem muito dos empregados em pista.

#### **2.3.10. Concreto convencional para pavimentos**

Entre os diversos tipos de concretos empregados na pavimentação se destacam: o CC e o CAR, que são empregados em pavimentos como PCS, WT, WTUD, CCR e CRF. Sabendo-se deste vasto emprego na pavimentação, é imprescindível o controle destas misturas a fim de obter as condições necessárias para cada tipo de pavimento.

O concreto convencional (CC) difere-se do concreto de alta resistência (CAR) não apenas na resistência, inexistência de adições minerais ou na

permeabilidade elevada, mas também, por apresentar características diferentes sob condições iguais de umidade, o que acarreta em uma série de circunstâncias que poderão ser benéficas ou não para cada um dos concretos.

Os concretos convencionais são tipicamente utilizados em pavimentação, sendo o material básico para Pavimentos de Concreto Simples (PCS) e Whitetopping (WT) necessitando serem dosados para a resistência à tração na flexão e não apenas para compressão como os concretos estruturais e se apresentam em proporções que não tangem a alta durabilidade, mas sim, a boas condições de todas as propriedades de maneira proporcional. (BALBO, 2009)

### **2.3.11. Concreto de Alta Resistência para pavimentos**

De acordo com ACI (1998):

“Define-se concreto de alto desempenho como um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida sempre rotineiramente com o uso de componentes e práticas normais de mistura, lançamento e cura”.

O Concreto de Alta Resistência (CAR) é utilizado em condições onde se espera uma vida útil do concreto longa mesmo com a exposição a agentes agressivos; para tanto é necessário que o concreto seja superplastificado, com sua composição em cimento Portland e adições minerais com taxas baixas de permeabilidade, esta é a propriedade principal para a obtenção da durabilidade (AÏTCIN, 2000).

O Concreto de Alta Resistência (CAR), algumas vezes é denominado, na literatura, como concreto de Alto desempenho (CAD). Em estudos realizados por Cervo (2004) sobre a resistência à fadiga dos concretos convencionais (CC) e dos CAD no Brasil mostraram que a resistência aos esforços repetidos em CAD apresentou-se inferior aos encontrados em CC. Esta constatação deve-se pela maior facilidade e fragilidade que o CAD apresenta em sua microestrutura quanto à fissuração, sendo passível de controle no dimensionamento do mesmo.

Neste estudo também foi observado que as resistências estáticas e dinâmicas do CAD eram diretamente proporcionais ao estado de saturação, porém esta constatação torna-se um contraponto frente ao CC, que apresentou menor resistência quanto mais elevado o grau de saturação, evidenciando que o estado de umidade tem influência nos dois concretos em questão, o que pode acarretar problemas de permeabilidade e conseqüentemente de durabilidade e resistência conforme a cura empregada nos mesmos.

Assim, o CAD por não se apresentar como um concreto completo, realmente sendo de alto desempenho, será tratado como um CAR neste trabalho.

Outro fator que contribui para utilização do CAR está ligado com a rápida liberação para o tráfego na pavimentação, pois a sua composição que é constituída por cimento de alta resistência inicial combinado com as adições minerais ocasiona uma mistura de ganho rápido de resistência, sendo de fundamental importância quando a questão é *fast track*, locais com tráfego intenso não podendo ser interrompido por um elevado tempo, geralmente sua liberação se dá com 3 dias. (OLIVEIRA *et al.*, 2008)

As presentes constatações revelam a importância da realização do ensaio de resistência à tração na flexão, para não sub ou superdimensionar os pavimentos de concreto, sendo que estes, no Brasil, têm, normalmente, sua resistência conferida através do ensaio de resistência à compressão axial e a partir dele se faz uma correlação para chegar aos resultados de resistência à tração na flexão, condicionando o pavimento a erros de dimensionamento devido a não realização do ensaio específico. Também deve ser observado com cuidado, os métodos de cura empregados nos concretos para pavimentação, uma vez que, o estado de umidade, pode interferir nas propriedades mecânicas dos mesmos.

### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Para o desenvolvimento do procedimento experimental foram estudados três tipos de concreto, tendo como base os estudos realizados por Cervo (2004), sendo um convencionalmente aplicado em pavimentação, denominado concreto convencional (CC), também chamado de referência (REF), que possui as mesmas características do concreto empregado na Pista Experimental da Universidade São Paulo; outro com a adição de fibras de polipropileno (REF + FIBRAS) e um concreto de alta resistência (CAR).

Para as moldagens do CC, foram utilizados como agregados graúdos a brita 1 e a brita 2, cimento CII - Z, sendo necessário a utilização de plastificante e superplastificante para o estudo de dosagem, bem como, para o concreto com fibras, que utilizou a adição de fibras de polipropileno nas proporções indicadas pelo fabricante.

Já para o CAR, seguiu-se o traço utilizado na Rodovia Castelo Branco, em 1997, com o emprego apenas da brita 1, sendo necessário a utilização da sílica ativa com 10% em substituição do cimento CP V - ARI e de superplastificantes para o estudo de dosagem e para moldagens definitivas.

Realizaram-se ensaios de caracterização dos materiais empregados e, para os concretos estudados, foram analisadas suas propriedades mecânicas por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão, à resistência à compressão axial, à resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) e módulo de elasticidade estático por dois métodos, analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica, admitindo uma distribuição linear de tensões, segundo TIMOSHENKO/GERE (1994).

Diferentes métodos de cura foram analisados, como o recomendado por norma (cura em câmara úmida) e os tipicamente utilizados em campo, cura química e cura química seguida da colocação de sacos de anagem úmidos.

As idades adotadas para a execução dos ensaios foram 7 dias, seguindo a necessidade de pavimentos com rápida liberação de tráfego (*fast track*), 28 dias, sendo esta idade preconizada por norma e 91 dias, devido a obras de grande porte onde se faz necessário um maior período de cura para liberação do pavimento.

Para a realização dos estudos das propriedades dos concretos desta pesquisa (REF, REF+fibras e CAR), foram preparadas amostras prismáticas e cilíndricas. A caracterização dos materiais, moldagens preliminares e definitivas, bem como os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria(UFSM).

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), que disponibilizou suas instalações e mão de obra auxiliar para a realização dos ensaios.

### **3.1 Caracterização dos Materiais**

Para o desenvolvimento dos ensaios realizados neste estudo, foram coletados, preparados e caracterizados os materiais a serem utilizados, buscando-se determinar propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados, a fim de elucidar possíveis questões relacionadas aos resultados desta pesquisa.

#### **3.1.1. Cimentos**

Para as misturas em concreto convencional (REF) (referência com e sem fibras) foi utilizado um cimento Portland CP II - Z (cimento Portland composto pozolânico), que possui a sua caracterização físico-química apresentada na Tabela 1. Para o concreto de alta resistência (CAR), utilizou-se o cimento Portland CP V – ARI, cimento Portland de Alta Resistência Inicial, segundo ABNT NBR 5733:1991, (Tabela 2), por este apresentar menores quantidades de adições minerais e elevado teor de  $C_3S$ , gerando uma maior disponibilidade de CH para as reações pozolânicas, nas idades iniciais.

Tabela 1 - Caracterização do Cimento CP II-Z

Caracterização do Cimento CP II-Z		
Características Químicas		
Características	Unidade	Valor
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,62
SiO <sub>2</sub>	%	22,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,18
CaO	%	53,52
MgO	%	3,89
SO <sub>3</sub>	%	2,52
Perda ao Fogo	%	4,97
CaO Livre	%	1,25
Resíduo Insolúvel	%	11,72
Equivalente Alcalino	%	0,92
Características Físicas		
Expansibilidade a quente	mm	0,44
Tempo de Pega (h:min)	Início	03:20
	Fim	03:59
Consistência Normal	%	27,4
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3,668
#200	%	2,43
#325	%	11,22
Resistência a compressão da argamassa normal (MPa)	1 dia	13,2
	3 dias	25,9
	7 dias	32,4
	28 dias	40,5

Fonte: Itambé Cimentos (2014)

Tabela 2 - Caracterização do Cimento CP V ARI

Caracterização do Cimento CP V-ARI		
Características Químicas		
Características	Unidade	Valor
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,37
SiO <sub>2</sub>	%	19,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,77
CaO	%	60,36
MgO	%	4,93
SO <sub>3</sub>	%	2,75
Perda ao Fogo	%	2,93
CaO Livre	%	1,47
Resíduo Insolúvel	%	0,73
Equivalente Alcalino	%	0,70
Características Físicas		
Expansibilidade a quente	mm	0,47
Tempo de Pega (h:min)	Início	02:34
	Fim	0,13
Consistência Normal	%	29,10
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4,27
#200	%	0,30
#325	%	2,16
Resistência a compressão (Mpa)	1 dia	22,00
	3 dias	36,50
	7 dias	42,50
	28 dias	50,30

Fonte: Itambé Cimentos (2014)

### 3.1.2. Agregados

Para o emprego dos agregados foi utilizado como agregado miúdo uma areia quartzosa natural, com origem da região do rio Arenal, Santa Maria/RS, onde a mesma passou pelos processos de lavagem e peneiramento na # 4,8 mm, sendo posteriormente seca e devidamente armazenada. A distribuição granulométrica ficou dentro dos limites propostos pela ABNT NBR 7211:2009 para a zona 3 como pode ser observado na Tabela 3 e na Figura 9.

Tabela 3 - Granulometria do Agregado Miúdo (Areia)

Ensaio de Granulometria do Agregado Miúdo			
Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
N	9.5	0,0%	0,0%
I	6.3	0,5%	0,5%
N	4.8	0,6%	1,1%
N	2.4	1,9%	3,0%
N	1.2	3,9%	7,0%
N	0.6	17,8%	24,7%
N	0.3	50,2%	74,9%
N	0.15	20,3%	95,2%
	0.075	4,4%	99,5%
Fundo	<0,075	0,5%	100,0%

Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM)

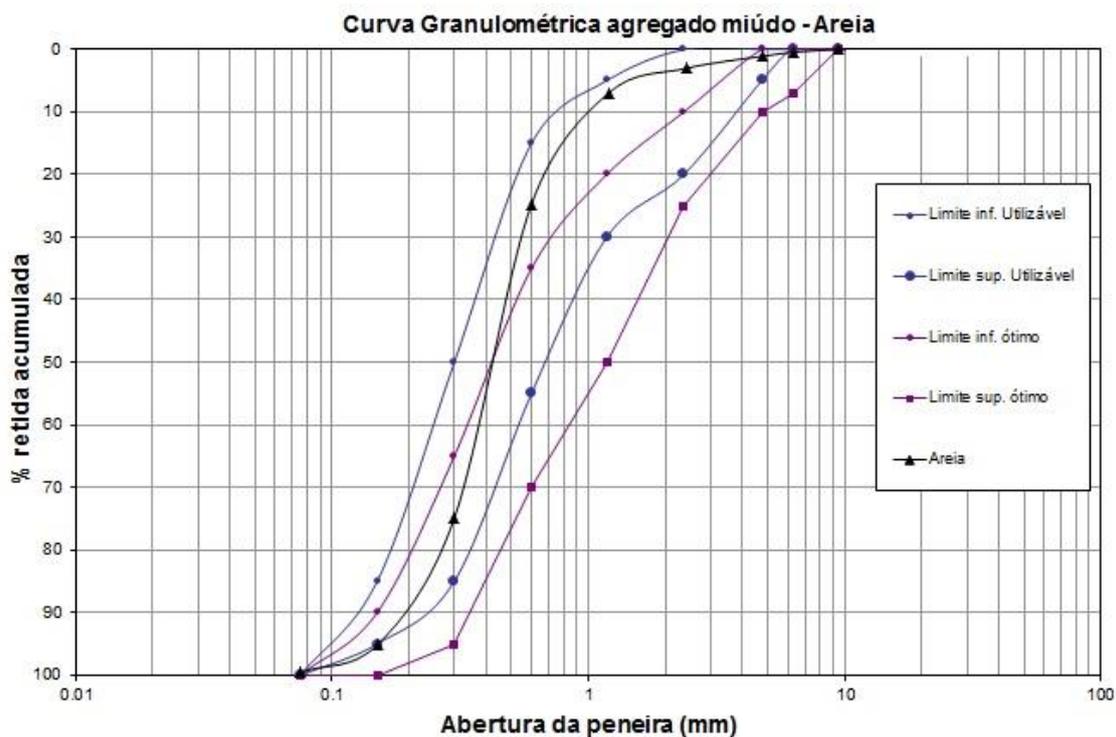


Figura 9 - Curva Granulométrica do agregado miúdo. Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM).

O agregado graúdo deste trabalho foi de pedra britada de rocha diabásica, tendo sua origem na região de Itaara/RS, apresentando dimensão máxima característica de # 19 mm, sendo seca e armazenada em local apropriado. As características da Brita 1 e Brita 2 podem ser observadas nas

tabelas 4 e 5, respectivamente. A Figura 10 apresenta a curva granulométrica da Brita 1 e Brita 2.

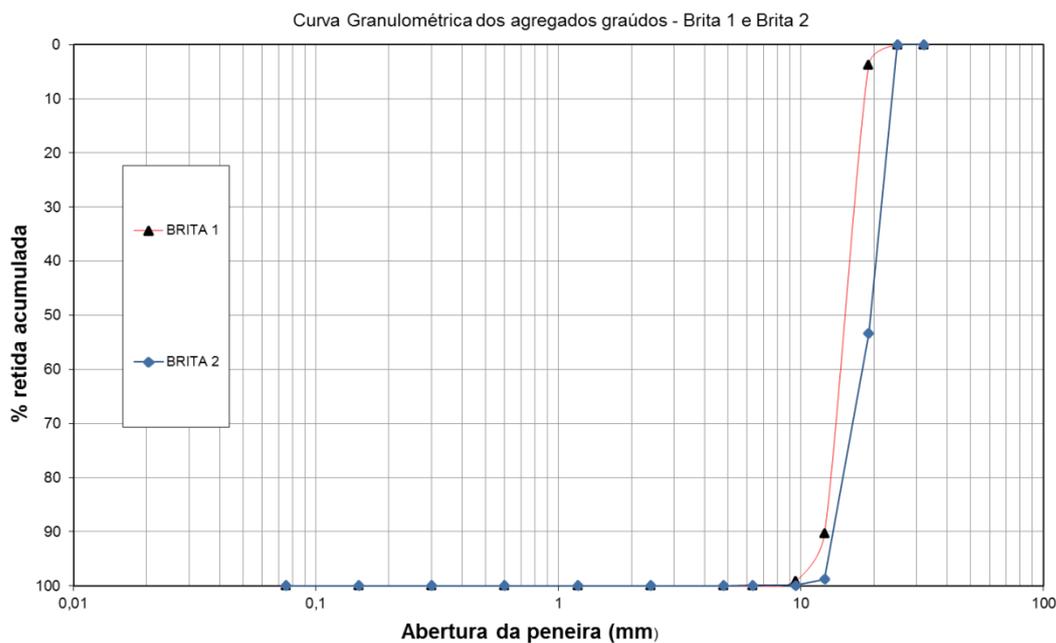


Figura 10 - Curva Granulométrica do Agregado Graúdo – Brita 1 e Brita 2. Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM).

Tabela 4 - Características do Agregado Graúdo – Brita 1

Características do Agregado Graúdo			
Brita 1			
Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
N	19	3.8%	3.8%
I	12.5	86.6%	90.4%
N	9.5	8.7%	99.1%
I	6.3	0.9%	100.0%
Massa Específica do Agregado Seco			2.49
Massa Específica do Agregado Saturado			2.56
Massa Específica Aparente do Agregado			2.66
Absorção do Agregado			2.51%
Massa unitária			1.2012 kg/m <sup>3</sup>
Perda Abrasão Los Angeles			11%
Índice de Forma			2.8 – Lamelar

Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM)

Tabela 5 - Características do Agregado Graúdo – Brita 2

Características do Agregado Graúdo			
Brita 2			
Peneiras		% Retida Média	%Retida Acumulada
nº	mm		
I	25	0,0%	0,0%
N	19	53,36%	53,36%
I	12.5	45,39%	98,75%
N	9.5	1,14%	99,89%
I	6.3	0,05%	99,95%
	4.8	0,02%	99,97%
	2.4	-	99,97%
	1.2	-	99,97%
	0.6	-	99,97%
	0.3	-	99,97%
	0.15	-	99,97%
	<0.15	0,03%	100,0%
Massa Específica Absoluta			2,496
Absorção do Agregado			2,59%
Massa unitária			1,325 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM)

### 3.1.3. Plastificante e Superplastificante

Para alcançar a resistência à tração na flexão aos 28 dias nos traços dos concretos estudados bem como para obter o concreto de alta resistência (CAR) foi necessário a utilização de aditivos químicos em sua composição, a fim de obter melhores resultados em sua trabalhabilidade que poderia ser prejudicada pela baixa relação água/cimento.

Para a obtenção dos teores iniciais de plastificante e superplastificante, foram realizados ensaios de trabalhabilidade para cada mistura aglomerante e relação a/ag. Estes parâmetros serviram como base para as moldagens definitivas, devendo obedecer às condições impostas pelos ensaios de determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR NM 67:1998).

As tabelas 6 e 7 apresentam os dados técnicos obtidos através de seu fabricante para o plastificante e para o superplastificante respectivamente.

**Tabela 6 - Dados Técnicos do Plastificante**

Dados Técnicos – Plastificante Muraplast FK 100			
Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,20	
Dosagem	%	0,2 a 1,0	do peso do cimento

Fonte: MC- Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda

**Tabela 7 - Dados Técnicos – Superplastificantes**

Dados Técnicos – Superplastificante - MC - PowerFlow 1180			
Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1.09 ± 0.02	
pH		6,7	
Dosagem	%	0,2 a 0,5	sobre o peso do cimento
Teor de Cloretos	%	<0,1	
Teor de Álcalis	%	<1,0	

Fonte: MC- Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda (2014)

#### 3.1.4. Sílica Ativa

Para a obtenção de valores elevados de resistência a resistência à compressão axial e tração na flexão se fez necessário à substituição de cimento por alguma adição que proporcionasse melhorias nas características e nas propriedades do concreto. Assim, para o CAR foi usado, em substituição ao cimento, à sílica ativa, na proporção de 10 % em substituição, sendo nesta proporção devido à busca pela reprodução do concreto de alta resistência utilizado na construção do primeiro *Whitetopping* Ultradelgado na Rodovia Castello Branco, em 1997 e estudado por Cervo (2004) em que ocorreu uma ruptura precoce das placas de concreto.

As propriedades físico-químicas da sílica ativa utilizada constam na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades Físico – Químicas da Sílica Ativa

Propriedades Físico-Químicas da Sílica Ativa	
Estado Físico (CNTF)	Sólido
Massa específica	2,220 kg/m <sup>3</sup>
Diâmetro Médio	0,4 µm
Resíduo na peneira 45 µm	≤10,0%
Aparência	Pó de dimensões micrométricas
Cor	Cinza Claro e Cinza Escuro dependendo do teor de sílica
Odor	Sem odor
pH	≤10,0
Ponto de Fusão	1550 - 1570 °C
Ponto de Fulgor	Não Aplicável
Perda de Fogo	3,32%
Densidade Aparente	150 - 700 Kg/m <sup>3</sup>
Solubilidade	Insolúvel em água; Solúvel em HF e KOH ou NaOH
Área específica B.E.T.	19,000 m <sup>2</sup> /Kg
Limite de explosividade	Não Aplicável

Fonte: Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda (2010) – fornecedor do material utilizado na pesquisa.

### 3.1.5. Fibras de polipropileno

Para os concretos convencionais com adição de fibras, foram empregadas as fibras de polipropileno. Estas fibras foram utilizadas para reforçar o concreto nas primeiras idades, atuando no controle de fissuração do material ainda no estado plástico, entretanto seu emprego não tem função estrutural.

A dosagem seguiu as recomendações do fabricante que é de 0,6 kg/ m<sup>3</sup> de concreto.

As fibras foram adicionadas, no momento da mistura dos agregados. O tempo de mistura recomendado é de 1 minuto.

Os dados técnicos da fibra de polipropileno utilizada na pesquisa estão sendo apresentados na tabela 9.

**Tabela 9 - Dados Técnicos – Fibras de Polipropileno**

Dados Técnicos - Fibras de Polipropileno	
Formato	Monofilamento
Peso Específico	0,91g/cm <sup>3</sup>
Resistência a Tração	4 MPa
Comprimento	12 mm
Resistência Alcalina	Alta
Módulo de Deformação	4 GPa

Fonte: REPARCON – Soluções para Reparo e Proteção do Concreto Ltda (2014)

### 3.1.6. Agente de cura

Nesta pesquisa foi utilizado o agente de cura química Emcoril S, que é uma membrana líquida de cura baseada no princípio de que o concreto tenha água suficiente para uma hidratação ininterrupta. Esta membrana permite a respiração do concreto ao mesmo tempo em que previne a evaporação da água.

A tabela 10 apresenta as características técnicas do agente de cura química a base de parafina que foi utilizado.

**Tabela 10 - Dados Técnicos – Cura Química**

Dados Técnicos - Cura Química Emcoril S			
Característica	Unidade	Quantidade	Observações
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0,99	
Condições de Aplicação	°C	> 5 e < 35	Temperatura do ar e substrato
Consumo	g/m <sup>2</sup>	300 a 400	
Tempo de secagem	H	3	20°C e 50% de umidade relativa

Fonte: MC- Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda (2104)

## 3.2 Dosagem dos Concretos

Para a execução dos procedimentos experimentais foram moldados corpos de prova prismáticos e corpos de prova cilíndricos nas dimensões 100x100x400 mm e 100x200mm, respectivamente, sendo empregado para o concreto convencional, denominado nesta pesquisa como referência com ou

sem adição de fibras de polipropileno e para os concretos de alta resistência com adição de sílica ativa.

Os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para a realização dos ensaios a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial e os corpos prismáticos para os ensaios de tração na flexão e módulo de elasticidade. Foram realizados estudos dos traços do concreto de cimento Portland para a obtenção do Concreto Convencional (REF) e de alta resistência (CAR).

### 3.1.7. Concreto Convencional (CC) – Referência (REF)

Primeiramente, para a obtenção do traço do concreto convencionalmente empregado em pavimentação, buscou-se a igualdade de resistência à tração na flexão obtida na Pista Experimental da Universidade de São Paulo (USP), tendo o traço daquele antigo concreto como referência. Essa etapa foi realizada junto ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM. A Tabela 11 apresenta as características do concreto utilizado na pista experimental da USP.

**Tabela 11 - Características do concreto empregado na Pista Experimental EPUSP (Severi, 2002)**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	396
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	620
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	483
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	724
Relação a/c	0,458
Plastificante (l/m <sup>3</sup> )	1,388
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 500mm	4,76 a 5,31

Faz-se necessário lembrar que a resistência à tração na flexão determinada na época da construção da pista experimental da USP foi obtida por meio da moldagem e cura de corpos de prova de 150 x 150 x 500 mm em condições reais de campo.

Como já observado por CERVO (2004), é possível o emprego de corpos de prova de dimensões reduzidas, para a realização do ensaio à tração na flexão, sem necessidades de fatores de correção, assim optou-se nesta pesquisa pela utilização dos corpos de prova de 100 x 100 x 400 mm, dimensões já permitidas pela ABNT NBR 12.142 (2010).

A preparação dos concretos obedeceu a uma sequência de colocação dos materiais conforme estabelecido pelo procedimento da ABCP (1998). Primeiramente, a betoneira teve sua cuba e pás umedecidas, sendo adicionado todo o agregado graúdo e parte da água de amassamento ( $\pm 1/3$  de água), com o acionamento da betoneira por 15 segundos. Em seguida foram adicionados o cimento e outra parte da água de amassamento ( $\pm 1/3$  de água), e a betoneira acionada por mais 45 segundos. Por último foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 3 minutos. O aditivo foi colocado logo após a última porção da água de amassamento, na dosagem prescrita. A Figura 11 mostra a betoneira com capacidade de 300 L de concreto que foi utilizada para a mistura.

Logo após a mistura de cada um dos concretos realizou-se o ensaio para determinação do abatimento do tronco de cone. A Figura 12 ilustra o ensaio do abatimento do tronco de cone para determinação do abatimento (slump).



Figura 11 - Betoneira utilizada para mistura. Fonte: Ensaio realizado no LMCC (UFSM).



Figura 12 - Ensaio do Tronco de cone. Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM).

Em seguida foram moldados corpos de prova prismáticos e cilíndricos para que fosse determinada a resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias. A moldagem foi realizada segundo os critérios da norma ABNT NBR 5738:2003. Todos os corpos de prova foram moldados em uma única camada e vibrados em mesa vibratória por 30 segundos; posteriormente as amostras foram niveladas. A Figura 13 mostra os corpos de prova prismáticos na mesa vibratória.



Figura 13 - Corpos de prova prismáticos sendo adensados na mesa vibratória. Fonte: Ensaios realizados no LMCC (UFSM)

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram mantidos nos moldes por um período de 24 a 36 horas, sendo desmoldados e colocados em cura em câmara úmida até a idade de ruptura.

Para este primeiro estudo realizado do traço do concreto, foram moldados 3 corpos de prova (cp) prismáticos nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm para cada idade (7 e 28 dias) para o ensaio de tração na flexão. A Tabela 12 apresenta detalhes do primeiro concreto moldado no dia 07 de setembro de 2013 na tentativa de atingir a mesma resistência alcançada na pista experimental construída na USP.

Assim realizaram-se ensaios de caracterização dos materiais a serem utilizados no traço a ser reproduzido e verificou-se que para o agregado graúdo utilizado na pesquisa, a massa unitária que obteve o melhor resultado, foi quando se utilizou a proporção de 50% de brita 01 e 50% de brita 02.

Assim optou-se pela continuidade nos estudos de traço do concreto convencional (REF) com a relação de 50% de brita 1 e 50% de brita 2 nos traços avaliados.

Todos os traços estudados foram baseados nos estudos realizados por CERVO (2004), tendo os seus traços como base, apenas sendo reproduzidos com teores de argamassa e materiais diferentes, obtidos da região central do Rio Grande do Sul.

**Tabela 12 – Proporções e características do primeiro concreto REF analisado**

<b>Materiais ou Propriedades</b>	<b>Valores Obtidos</b>
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	396
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	620
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,458
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,388
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp400mm	5,70 a 6,11

Buscou-se um concreto que atingisse uma resistência à tração na flexão entre 4,0 MPa e 5,3 MPa aos 28 dias, conforme utilizado na Pista da USP.

Desta forma o traço, apresentado na tabela 12, foi descartado, uma vez que o concreto atingiu valores de resistência bastante superiores ao exigido, apresentando características de concreto de alta resistência.

Dois traços ainda foram produzidos, alterando-se as características da mistura e a relação a/c de 0,458 para 0,483 e também para 0,503. Para estes traços também se moldou três corpos de prova para os novos traços. As quantidades de materiais empregados e os resultados obtidos nestes dois novos concretos estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

**Tabela 13 - Características do segundo concreto REF analisado**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	377
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	644
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,483
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,319
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 400mm	5,38 a 5,55

**Tabela 14 - Características do terceiro concreto REF analisado**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	362
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	658
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,503
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,267
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 400mm	4,67 a 5,51

Os dois traços determinados e apresentados nas Tabelas 13 e 14, da mesma forma que o primeiro concreto estudado, não atingiram a resistência à tração na flexão desejada, ficando com valores superiores, sendo necessário

moldar um quarto concreto que foi aquele que alcançou as expectativas de resistência desejada para a pesquisa.

As características do concreto definitivo empregado no experimento estão apresentadas na tabela 15.

**Tabela 15 - Características do quarto concreto REF analisado, sendo este o traço definitivo**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	328
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	691
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,553
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,148
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 400mm	4,47 a 5,16

Posteriormente ao estudo de dosagem, realizou-se a análise da cura de Abrams e para enfim, realizar a moldagem definitiva dos 432 corpos de prova, sendo que para cada ensaio (tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) moldou-se 108 corpos de provas.

Através do estudo de dosagem constatou-se que os concretos estudados apresentavam um teor de argamassa inferior ao usualmente utilizado para os materiais adotados (provenientes da região de Santa Maria/RS), assim após a análise optou-se pela elevação do teor de argamassa para no mínimo 0,49 ou 49%, obtendo assim novos valores para o cimento e para o agregado miúdo (areia) em todos os traços estudados.

Também foi evidenciado que ao reproduzirmos os traços obteve-se uma diminuição na relação água/cimento, pois não foi necessária a utilização de toda água prevista nos traços de CERVO (2004).

A Figura 14 apresenta os valores médios obtidos para as relação água/cimento das misturas avaliadas, após o estudo de dosagem, onde montou-se o gráfico com as correções da relação água/cimento a fim de elucidar qual seria a relação definitiva a ser empregada.

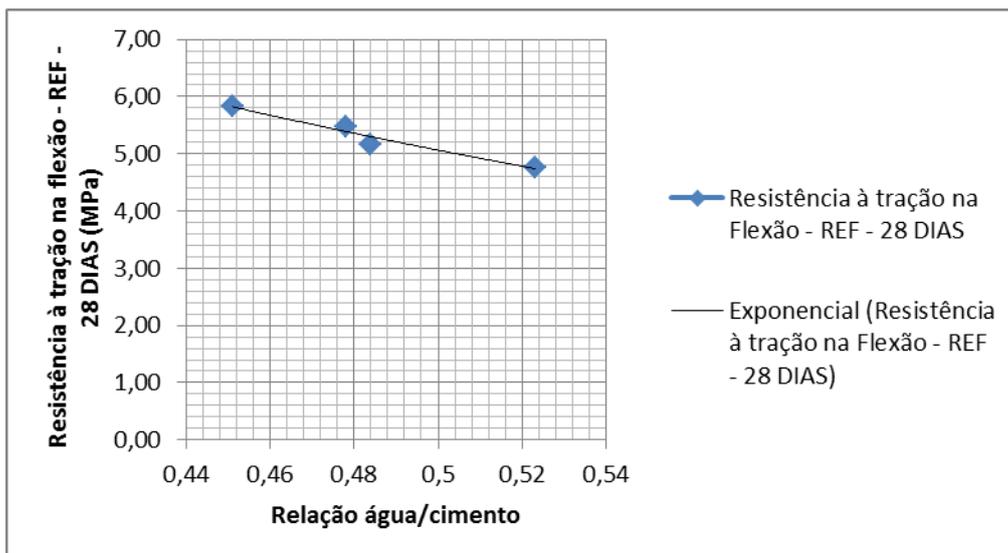


Figura 14 - Resultados obtidos para o ensaio de tração na flexão – concreto REF – Estudo de dosagem. Fonte: Ensaio realizado no LMCC (UFSM)

Com a finalização do estudo de dosagem foi possível obter o traço definitivo com teor de argamassa de 49% e relação água/cimento de 0,523, sem a necessidade do uso de plastificante, conforme tabela 16.

Tabela 16 - Concreto REF definitivo após estudo de dosagem

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	348,74
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	810,47
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,523
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	-
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 400mm	≥4,00

Após a definição do traço do concreto convencional (REF), definiu-se o concreto referência com a adição de fibras de polipropileno no qual se utilizou o mesmo traço com a adição de 0,6 kg/m<sup>3</sup>, conforme recomendação do fabricante.

O traço empregado para o concreto (referência) mais a adição de fibras, está sendo apresentado na tabela 17.

Tabela 17 - Concreto REF definitivo após estudo de dosagem

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	348,74
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	810,47
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> )	603,5
Relação a/c	0,523
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	-
Fibras de Polipropileno (Kg/m <sup>3</sup> )	0,60
Abatimento (mm)	60±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 400mm	≥4,00

### 3.1.8. Concreto de Alta resistência

Os materiais empregados no concreto de alta resistência foram os mesmos utilizados na construção do primeiro *Whitetopping* Ultradelgado na Rodovia Castello Branco, uma vez que se desejava reproduzir o mesmo traço utilizado naquela época, a fim de elucidar o comportamento obtido em pista deste concreto com a realização dos ensaios de suas propriedades mecânicas, sendo este um dos pontos de partida desta pesquisa.

O cimento Portland utilizado foi um cimento de alta resistência inicial do tipo CP V - ARI. Procedeu-se adotar a adição de sílica ativa em teor de 10% de substituição ao cimento, conforme empregado em pista na Rodovia Castello Branco. Para a reprodução do concreto buscou-se utilizar materiais com características comuns, porém foram necessárias adaptações para alguns materiais provenientes da região sul do Brasil.

Conforme empregado na rodovia Castello Branco, o concreto de alta resistência estudado neste trabalho teve a adição de aditivo plastificante e de aditivo superplastificante. Como superplastificante, utilizou-se um aditivo de alto desempenho e como plastificante, utilizou-se um aditivo multifuncional de pega normal.

Os agregados, cimento e aditivos apresentados neste item e utilizados no preparo do concreto de alta resistência tiveram suas características físicas,

mecânicas e químicas determinadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria, na ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland e através de seus fabricantes.

Conforme determinado previamente, o concreto de alta resistência (CAR) que seria empregado nos ensaios de tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade deveria ter a mesma resistência à tração na flexão que o concreto empregado no *Whitetopping* Ultradelado da rodovia Castello Branco em 1997. Para que fosse possível alcançar, em laboratório, uma mesma resistência obtida em campo, assim, se fez necessário alguns estudos de traço de concreto.

Primeiramente, optou-se por utilizar o mesmo traço empregado em campo.

A Tabela 18 apresenta as proporções e características do concreto de alta resistência utilizado no *Whitetopping Ultradelado* da rodovia Castello Branco.

**Tabela 18 - Características do concreto empregado no Whitetopping Ultradelado da rodovia Castello Branco (BALBO, 1999)**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	440
Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	44
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	493
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	1194
Relação a/c	0,365
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,65
Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	3,846
Abatimento (mm)	70±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp 500mm	5,7 a 6,1

Para a preparação do concreto de alta resistência e moldagem dos corpos de prova, procedeu-se da mesma forma que no CC, descrito no item 3.1.7.

Após a moldagem dos corpos-de-prova, estes foram mantidos nos moldes por um período de 24 a 36 horas, posteriormente, os corpos de prova

foram desmoldados e levados à cura em câmara úmida por 7 e 28 dias, com o intuito de chegar o mais próximo possível da resistência à tração na flexão média atingida em campo (5,7 a 6,1 MPa) da pista experimental de WTUD em 1997.

Todos os traços estudados para o concreto de alta resistência também foram baseados nos estudos realizados por CERVO (2004), tendo os seus traços como base, apenas sendo reproduzidos com teores de argamassa e materiais diferentes, obtidos da região central do Rio Grande do Sul.

A tabela 19 apresenta as proporções e características das misturas dos concretos estudadas.

**Tabela 19 - Proporções e características dos traços analisados do concreto de alta resistência (CAR)**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos		
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	440	420	393
Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	44	42	39
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	493	514	544
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	1194	1194	1194
Relação a/c	0,365	0,385	0,409
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,65	-	-
Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	3,846	3,5	3,0
Abatimento (mm)	70±10	70±10	70±10
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp400mm	7,69 a 8,16	6,23 a 7,72	7,38 a 8,69

Através do estudo de dosagem do concreto de alta resistência também se observou que os traços estudados apresentavam um teor de argamassa inferior ao usualmente utilizado para os materiais adotados (provenientes da região de Santa Maria/RS), assim após a análise optou-se pela elevação do teor de argamassa para no mínimo 0,49 ou 49%, obtendo assim novos valores para o cimento e para o agregado miúdo (areia) em todos os concretos.

Com a finalização do estudo de dosagem foi possível obter o traço definitivo com teor de argamassa de 49% e menor quantidade de superplastificante, sem a necessidade do uso de plastificante, conforme tabela 20.

**Tabela 20 - Características do concreto de alta resistência definitivo (CAR)**

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	462
Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	46,21
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	684
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	1194
Relação a/c	0,385
Plastificante (L/m <sup>3</sup> )	-
Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	1,42
Água (Kg/m <sup>3</sup> )	177,89
Abatimento (mm)	70±10
Resistência média à tração na flexão (MPa) – 28 dias – cp400mm	7,05

### 3.1.9. Moldagem e Métodos de cura

Para a execução dos procedimentos experimentais foram moldados corpos de prova prismáticos e corpos de prova cilíndricos nas dimensões 100x100x400 mm e 100x200mm, respectivamente, sendo empregadas para o concreto convencionalmente utilizado na pavimentação com ou sem adição de fibras de polipropileno e para os concretos de alta resistência com adição de sílica ativa.

Para a moldagem dos 432 corpos de prova necessários nesta pesquisa, foi utilizado os traços definidos nos estudos de dosagem para o concreto convencional (REF) e para o concreto de alta resistência (CAR).

Os corpos cilíndricos foram utilizados para a realização dos ensaios a resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial e os corpos prismáticos para os ensaios de tração na flexão e módulo de elasticidade.

Muitos trabalhos, conforme visto na revisão da literatura, têm discutido sobre as questões que relacionam os métodos de cura a serem empregados nos concretos para pavimentação, onde alguns pesquisadores defendem a cura úmida do CAR por imersão em água, outros a cura em câmara úmida, em

que o concreto recebe o vapor de água, mas não fica imerso na mesma; ainda outros defendem a cura por meio da selagem dos concretos com a utilização de alguma membrana plástica ou impermeabilizante, através da cura química.

As normas do Brasil, que abordam a moldagem e cura de corpos de prova de concreto (ABNT NBR 5738:2003), indicam que os corpos de prova permaneçam em condições de cura até a data de ensaio. Sob este ponto de vista, alguns pesquisadores têm observado que em muitos casos, para o CAR um tempo menor de cura úmida apresenta resultados vantajosos quando se analisa a resistência à compressão do concreto (Agostini e Nunes, 1996).

Apoiado nos estudos anteriormente realizados por diferentes pesquisadores, o estudo em laboratório buscou simular distintas condições resultantes de diferentes métodos de cura a fim de verificar as implicações do processo de cura na resistência à tração na flexão dos concretos.

CERVO (2004) chegou-se as conclusões que o concreto de alta resistência no estado saturado apresentou resistência à tração na flexão estática superior à do concreto no estado seco, para todos os métodos de cura úmida analisados no trabalho; concretos saturados ensaiados aos 7 dias apresentaram resistências superiores àqueles secos ensaiados aos 28 dias. Já em idades mais avançadas (56 e 91 dias), as amostras de CAR secas apresentaram praticamente as mesmas resistências dos corpos de prova saturados, com 7 dias.

Ainda segundo o mesmo autor, quando o CAR estiver plenamente saturado (difícil condição de ocorrência em pista), supõe-se a hipótese de haver ocorrência de tensão de sucção negativa nos micro-poros, que agiria se opondo ao esforço de tração que surge nos limites dos poros saturados, o que resultaria na necessidade de maior tensão para ruptura do concreto; sendo que esta constatação não foi verificada para os corpos de prova moldados com um concreto convencional de pavimentação quando o consumo de cimento é menor e apresenta uma estrutura granular sutilmente mais aberta e sem adição de sílica ativa na mistura.

Através destas conclusões obtidas por CERVO (2004), verificou-se que ainda deverão ser estudados procedimentos de cura adequados durante o controle tecnológico em obras de pavimentação com emprego do CAR, pois os métodos de cura atualmente prescritos na norma brasileira induziriam que os

valores de resistência estatísticos não possuem equivalência com os reais resultados atingidos pelo concreto na pista durante seu complexo e comprometido processo de hidratação. Estas verificações se devem não pelas condições do controle tecnológico, mas sim, das condições ambientais e de cura.

A Figura 15 apresenta um fluxograma dos concretos estudados com as respectivas curas, ensaios e idades dos ensaios propostos para este estudo.

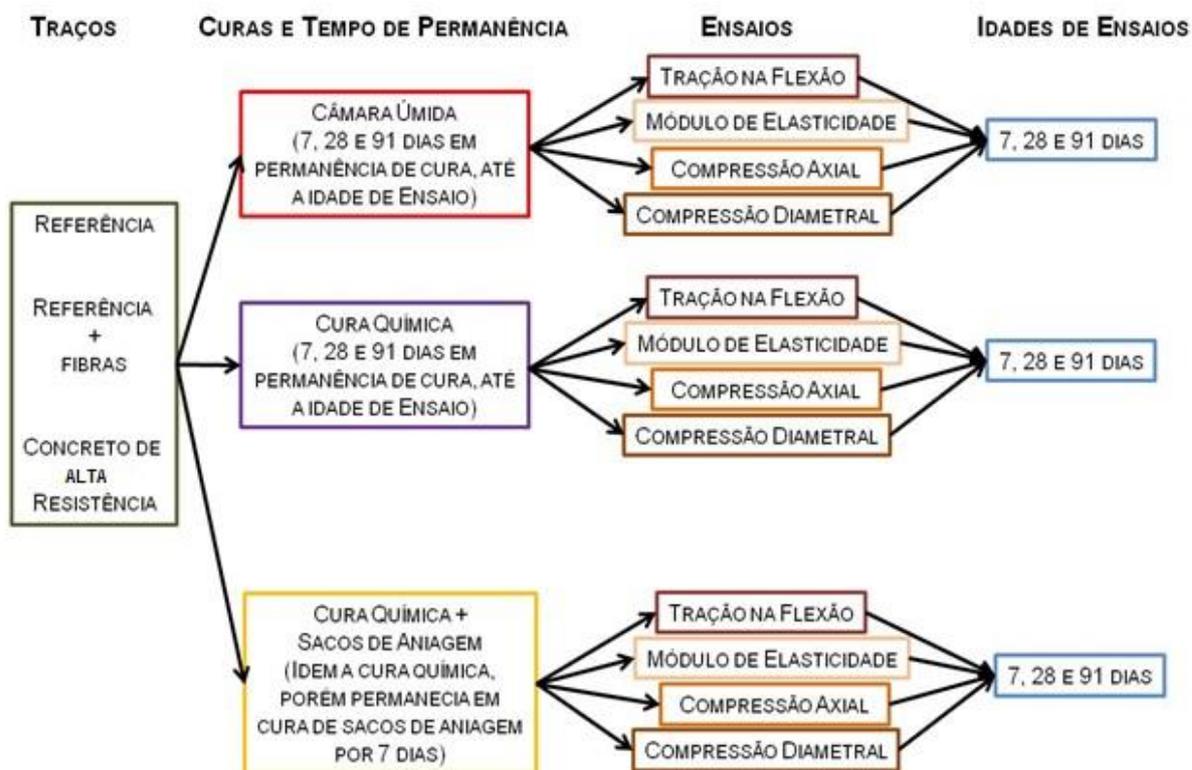


Figura 15 - Fluxograma apresentando o resumo da pesquisa.

Para todos os ensaios foram moldados corpos de prova, sendo estes, ensaiados aos 7, 28 e 91 dias, para os diferentes processos de cura, sendo estes apresentados na tabela 21.

**Tabela 21 - Métodos e idades de cura empregados nos corpos de prova prismáticos e cilíndricos**

Método de Cura	Tempo de Permanência em Cura (dias)	Idade de Ensaio (dias)
Câmara úmida	7 em câmara úmida	7
	28 em câmara úmida	28
	91 em câmara úmida	91
Cura química	7 ao ar	7
	28 ao ar	28
	91 ao ar	91
Cura química + Sacos de Aniagem	7 com sacos, após ao ar	7
	7 com sacos, após ao ar	28
	7 com sacos, após ao ar	91

As idades de ensaio foram baseadas em função do tempo de cura úmida e que se aproximassem das condições reais ocorridas em campo. As idades levam em consideração que, para a maioria das obras de pavimentação, é comum esperar-se para liberação do tráfego o período de 7 dias.

A idade de 28 dias foi determinada, por ser a idade padrão considerada em projetos e por norma, e sabendo que em obras de grande porte, como portos e aeroportos, a liberação do tráfego em um período inferior ao estabelecido por norma, pode ocasionar em perda de resistência e durabilidade do pavimento. Pelos motivos apresentados, optou-se por determinar a resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos nas idades de 7 e 28 e aos 91 dias, sendo esta para obras especiais onde se necessita de um controle de cura mais específico.

Na realização dos ensaios, empregando cura em câmara úmida, foram medidas as resistências dos concretos permanecendo em cura úmida até a idade de ensaio, conforme recomendado por norma.

Os corpos de prova ficaram nas curas em câmara úmida e cura química até a idade do ensaio, porém na cura química com posterior colocação de sacos de aniagem, seguiu o seguinte processo: primeiro, após 24 horas depois da moldagem dos corpos de prova, ocorreu a aspersão da cura química que

ficou por 24 horas até que a mesma se incorporasse no concreto formando uma película na superfície, após foram colocados os sacos de aniagem úmidos que permaneceram nas amostras até a idade de 7 dias (sempre ocorrendo ciclos de molhagem periódicos), após este período os sacos de aniagem foram retirados e as amostras foram curadas ao ar, permanecendo assim até a idade dos ensaios aos 28 e 91 dias de cura.

O procedimento para amostras curadas com cura química foi realizado através da aplicação do agente de cura logo após a desmoldagem, sendo esta cura aspergida sobre à superfície externa do concreto (adotando-se aplicar o agente em todas as extremidades das amostras). A cura química tem grande notoriedade na pavimentação, devido à sua larga utilização como método de cura dos pavimentos de concreto.

O agente de cura utilizado neste trabalho é composto à base de parafina que atua como barreira contra a evaporação, tendo sido utilizado em uma dosagem de  $400 \text{ g/m}^2$ , conforme recomendação do fabricante.

Abaixo, verificam-se os corpos de prova em cura na câmara úmida, conforme Figura 16. Nas Figuras 17 e 18 observam-se os corpos de prova em cura química e em cura química com a utilização posterior de sacos de aniagem, respectivamente.



Figura 16 - Cura em Câmara Úmida



Figura 17 - Aplicação da Cura Química



Figura 18 - Cura com Sacos de Aniagem (Estopas Úmidas)

Para cada traço, idade, processo de cura e ensaio foram moldados quatro corpos de prova (prismáticos ou cilíndricos).

Os ensaios realizados foram os seguintes:

- a) Resistência à tração na flexão: a execução dos ensaios ocorreu com corpos de prova prismáticos ensaiados segundo a norma ABNT NBR 12142:2010 e pela NM 55:1996.
- b) Resistência à resistência à compressão axial: a análise da evolução da resistência dos diversos traços foi realizada conforme preconiza a ABNT NBR 5739:2007;
- c) Resistência à tração por compressão diametral: os corpos de prova foram ensaiados conforme a norma ABNT NBR 7222:2011.
- d) Determinação do módulo de elasticidade: a execução dos ensaios foi realizado através de corpos de prova prismáticos ensaiados segundo a norma NM 55:1996. A flecha vertical do ponto central da amostra, ou seja, a flecha foi medida por meio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo tipo Yoke, posicionado à altura média da amostra prismática.

Para alcançar as dosagens requeridas, foi empregado o método de dosagem proposto por HELENE e TERZIAN (1992), para um correto proporcionamento dos materiais e para uma devida utilização do cimento e materiais aglomerantes.

### **3.3 Ensaio em concreto no estado endurecido**

#### **3.3.1 Ensaio de tração na Flexão**

É um ensaio realizado em vigotas, onde a carga aplicada é situada em dois pontos no terço médio do vão, sendo caracterizada assim de flexão a quatro pontos, apresentando na região entre os pontos de aplicação de carga uma flexão pura.

Neste ensaio foram moldados quatro corpos de prova prismáticos para cada tipo de concreto, para as idades de 7, 28 e 91 dias, para cada método de cura (cura em câmara úmida, cura química e cura química seguida de sacos de aniagem úmidos), nas dimensões 100x100x400 mm, após foram ensaiados

segundo a norma NBR 12142/2010, que preconiza os ensaios de tração na flexão em vigotas prismáticas.

A Figura 19 apresenta um ensaio de tração na flexão sendo realizado.



Figura 19 - Ensaio de Tração na Flexão

Para este ensaio deve-se:

- assegurar a aplicação da carga ao corpo de prova perpendicularmente;
- articular somente no sentido longitudinal do ensaio;
- distribuir uniformemente a carga ao longo do comprimento do corpo de prova.

Para a obtenção da resistência à tração na flexão seguem-se duas expressões:

- a) caso a ruptura ocorra no terço médio da distância entre os elementos de apoio.

$$F_{ct,f} = \frac{Pl}{bd^2}$$

Equação 13 idem Equação 1, página 47.

Em que:

$F_{ctM}$  : Resistência da Tração na Flexão (MPa);

p: Carga Máxima Aplicada (kg);

l: Distância entre os cutelos de suporte (cm);

b: Largura Média do Corpo de Prova na seção de ruptura (cm);

d: Altura Média do Corpo de Prova na Seção de Ruptura (cm).

b) Caso a ruptura ocorra fora do Terço Médio

$$F_{ct,f} = \frac{3Pa}{bd^2}$$

**Equação 14 idem Equação 2, página 47.**

Em que:

a: distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, mediante a tomada de, pelo menos, três medidas ( $a \geq 0,283 \ell$ ). Caso a ruptura ocorra além dos 5% de  $\ell$  ( $a < 0,283 \ell$ ), o ensaio não tem validade.

### 3.3.2 Ensaio de Resistência à compressão axial

Para o ensaio de resistência à compressão axial o corpo de prova cilíndrico deve ser posicionado na prensa de modo que, quando centrado, seu eixo coincida com o plano de aplicação da carga, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro.

As faces de aplicação de carga do corpo de prova devem ser rematadas – realização de capeamentos com solução de pedra e enxofre – de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2003. A carga de ensaio deve ser aplicada continuamente e sem choques, devendo cessar quando houver uma queda de força que indique sua ruptura.

A resistência à compressão deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2}$$

**Equação 15**

Em que:

$f_c$ : resistência à compressão (MPa);

F: força máxima alcançada (N);

D: diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.3.3 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio é determinado pela ação de duas forças concentradas de compressão no cilindro diametralmente opostas. Essas ações são fornecidas por uma prensa mecânica, gerando ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro do corpo de prova. As forças são aplicadas até que ocorra a ruptura do corpo de prova por tração indireta.

Para isso, o corpo de prova deve ficar posicionado na prensa de modo que fique em repouso ao longo de uma diretriz sobre o prato da máquina de compressão.

Entre os pratos da prensa e o corpo de prova em ensaio, colocam-se duas tiras de chapa dura, de comprimento igual à geratriz do corpo de prova e a seção transversal. Ajusta-se a prensa de maneira que os pratos da máquina obtenham uma compressão mínima capaz de manter em posição exata os corpos de prova para o ensaio.

A Figura 20 a mostra a disposição que o CP deve ficar na prensa:

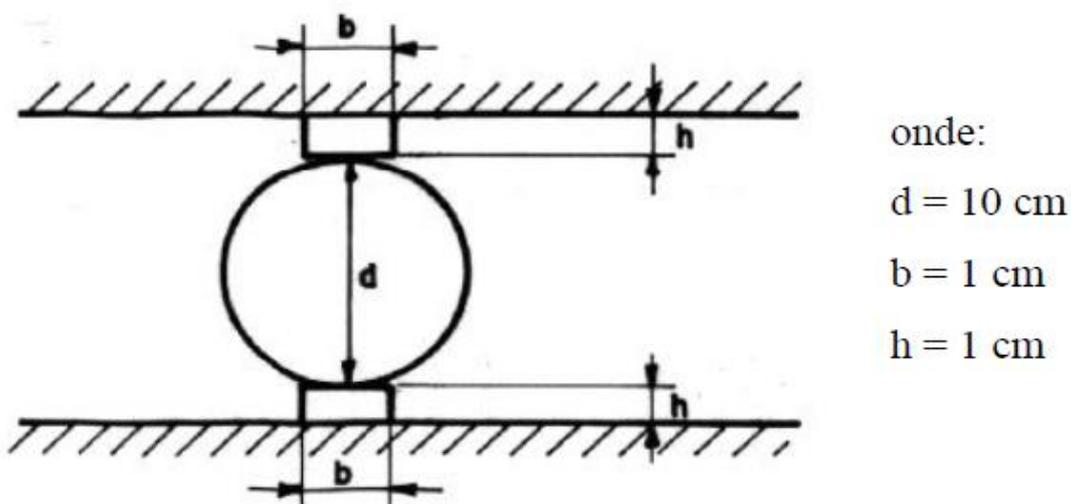


Figura 20 - Dispositivo do corpo de prova (ABNT NBR 7222:1994).

A carga deve ser aplicada continuamente, sem choque, com um crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02$  MPa/s), até a ruptura do corpo de prova.

Anota-se que, a resistência à tração por resistência à tração por compressão diametral foi obtida segundo a norma ABNT 7222:2011 pela seguinte expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$f_{t,D}$ : Resistência à tração por resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F: Carga máxima obtida no ensaio (Kg);

d: diâmetro do corpo de prova (cm);

L: altura do corpo de prova (cm)

### 3.3.4 Determinação do Módulo de Elasticidade através do Ensaio de Tração na flexão (NM 55:1996)

No ensaio de tração na flexão pela NM 55:1996, buscou a obtenção do módulo de elasticidade das amostras, utilizando a ferramenta de aquisição de dados, o Spyder 8, em conjunto ao programa Catman Easy, além de uma célula de carga Kratos de 30 toneladas, uma máquina de ensaios uniaxiais da EMIC para 20 toneladas e o LVDT da marca HBM de 10mm de deslocamento.

O ensaio foi realizado com controle de deslocamento do travessão da máquina a uma taxa de aplicação de carga de 0,5 mm/min. A distância entre apoios (vão livre) foi de 300 mm. Assim, foi possível obter uma relação entre vão livre e altura da amostra igual a 3, conforme prescreve a norma NM 55/1996.

As descrições mais detalhadas sobre este ensaio encontram-se na revisão da literatura no item 2.3.8, onde apresentam os métodos que podem ser utilizados para obtenção do módulo de elasticidade e como Timoshenko/Gere (1994) deduziram a equação da linha elástica, considerando a distribuição linear de tensões para uma vigota prismática biapoada para o ensaio de tração na flexão em dois cutelos.

Na Figura 21, é apresentada a instrumentação dos corpos de prova utilizados no ensaio de módulo em flexão.



Figura 21 - Ensaio de tração na flexão com o suporte “Yoke” e um LVDT para medida do deslocamento.

A partir das curvas carga x deslocamento, foi calculado o módulo de elasticidade aparente (ou seja, relativo ao carregamento estático). Esta expressão é apresentada na equação.

$$E = \frac{P.a}{24.I.u} (3.L^2 - 4a^2)$$

Equação 17 idem Equação 10, página 59.

Considerando que se tem um carregamento mínimo e um carregamento máximo e por consequência obtém-se um deslocamento inicial e final, pode-se reescrever a equação 3.6 da seguinte maneira:

$$E_{icp} = \frac{\frac{Pfc_{icp} - Pfi_{icp}}{2} \cdot a}{24 \cdot I \cdot (\delta f_{icp} - \delta fi_{icp})} (3 \cdot Lm^2 - 4a^2) \quad \text{Equação 18 idem Equação 11, página 60.}$$

Onde:

$E_{icp}$  = módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão (GPa);

$Pfc_{icp}$  = Carga Máxima (N);

$Pfi_{icp}$  = Carga Mínima (N);

a = Distância entre o apoio e o ponto de aplicação do carregamento (mm);

I = Momento de inércia da seção transversal da viga;

$\delta f_{icp}$  = Deslocamento final vertical medido no meio da viga (mm);

$\delta fi_{icp}$  = Deslocamento inicial vertical medido no meio da viga (mm);

L = Distância entre os apoios (mm).

Para a obtenção do módulo de elasticidade, no ensaio a flexão, foi considerado o carregamento máximo variando de 65 a 80% e carregamento mínimo variado entre 5% até 40% da carga de ruptura, respectivamente, para os diferentes concretos e métodos de cura.

Marangon (2011) também calculou o módulo de elasticidade a partir das curvas carga x deslocamento, porém no seu trabalho o módulo de elasticidade calculado foi cíclico residual para cada ciclo, através da mesma expressão utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade aparente (ou seja, relativo ao carregamento estático).

### 3.3.5 Determinação do Módulo de Elasticidade pela Analogia de Möhr

A determinação do módulo de elasticidade estático também pode ser obtida com a utilização de *strain gages*, porém nessa pesquisa esta técnica não se apresenta como uma boa solução, tendo em vista que se houver uma colagem inadequada dos *strain gages* obtém-se resultados com uma grande dispersão.

Utilizando-se a medida de flecha no centro da viga, com uso de LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), foi possível determinar o módulo de elasticidade das misturas estudadas, a partir do ensaio de tração na flexão por meio da analogia de Möhr.

Essa técnica já foi realizada em outros estudos, em diferentes materiais e quando se compara com as médias obtidas por *strain gages*, mostram resultados coerentes (TSENG, 2009).

Adotaram-se os mesmos carregamentos utilizados pelo método proveniente das deduções de Timoshenko/Gere (1994), onde a flecha foi medida no instante em que a carga aplicada correspondia entre 65 a 80% conforme cada traço e cura empregada.

Assim, o cálculo se deu pela analogia de Möhr que resulta na equação 3.7 para o caso de um corpo de prova prismático em ensaio de tração na flexão com dois cutelos:

$$E = \frac{23.P.l^3}{108.b.h^3.f}$$

**Equação 19 idem Equação 12, página 61.**

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão (GPa);

$P$  = Carga de ruptura (N);

$L$  = dimensão do vão (mm);

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

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

$f$  = flecha no meio do vão (mm).

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência mencionados no programa experimental da pesquisa, sendo que, a partir desses dados executa-se a avaliação quantitativa e qualitativa das propriedades mecânicas dos concretos estudados.

Como forma de analisar o desempenho das propriedades mecânicas aos ensaios de tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dos três concretos estudados (REF, REF + FIBRAS e CAR), verificou-se, primeiramente os acréscimos de resistência proporcionados aos concretos devido à utilização dos diferentes métodos de cura. Também se avaliou o concreto referência (REF) com ou sem adição das fibras no interior da matriz cimentícia e o concreto de alta resistência (CAR) com adição de sílica ativa. Desse modo, comparando os diferentes traços de concreto, foi possível verificar como estes, com suas propriedades específicas, se comportam frente aos diferentes métodos de cura estudados.

Outro fator relevante analisado no estudo das propriedades mecânicas dos concretos foram as correlações entre a resistência à compressão axial com a resistência à tração na flexão e com a resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados, desta forma, verificando os percentuais obtidos nos traços com adição de fibras de polipropileno no concreto referência (REF) ou com adição de sílica ativa no concreto de alta resistência (CAR).

Foi possível ainda realizar o ensaio de tração na flexão para obtenção do módulo de elasticidade dos concretos, a partir das curvas carga *versus* deslocamento, através de dois métodos (analogia de Möhr e pela equação da linha elástica seguindo a dedução de Timoshenko/Gere). Com a obtenção dos resultados, realizou-se uma comparação entre os mesmos, avaliando todos os gráficos de carga x deslocamento para obtenção do módulo para cada traço específico.

Para uma melhor elucidação e discussão dos resultados, comparou-se com outros trabalhos publicados nesta linha de pesquisa, os fatores que podem ou não ter influenciado nos resultados apresentados nesta pesquisa.

## **4.1 Resistência à tração na flexão**

Os resultados obtidos para o ensaio de tração na flexão foram encontrados através de duas normas, pela ABNT NBR 12142:2010 e pela NM 55/1996, sendo que a segunda norma foi utilizada devido ao equipamento usado na Universidade Federal do Pampa (Unipampa) para aquisição dos dados, que estava adaptado a NM 55/1996, que posteriormente foram empregados para encontrar os valores do módulo de elasticidade estático.

### **4.1.1 Ensaio à tração na flexão (ABNT NBR 12142: 2010)**

Os resultados obtidos para o ensaio de tração na flexão pela NBR 12142 são apresentados na tabela 22, foram realizados ensaios de tração na flexão para 4 corpos de prova para uma mesma idade e método de cura, sendo apresentado os valores médios obtidos destas amostras.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios à Tração na Flexão

TRAÇÃO NA FLEXÃO - ABNT NBR 12142:2010									
TRAÇO	REF			REF			REF		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
<b>MEDIA</b>	3,20	2,78	3,04	3,97	3,23	3,10	4,87	3,60	3,89
<b>Sd</b>	0,09	0,33	0,12	0,09	0,14	0,15	0,29	0,27	0,11
<b>CV</b>	2,80	12,04	3,95	2,23	4,32	4,82	6,01	7,63	2,93
TRAÇO	REF + FIBRAS			REF + FIBRAS			REF + FIBRAS		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
<b>MEDIA</b>	3,60	2,21	3,02	4,09	3,01	3,67	5,15	3,28	3,54
<b>Sd</b>	0,20	0,08	0,19	0,30	0,09	0,09	0,27	0,08	0,07
<b>CV</b>	5,60	3,50	6,42	7,24	3,11	2,34	5,22	2,55	1,87
TRAÇO	CAR			CAR			CAR		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
<b>MEDIA</b>	5,29	4,00	5,03	7,34	4,82	5,42	7,87	5,24	5,09
<b>Sd</b>	0,31	0,34	0,35	0,22	0,13	0,27	0,32	0,25	0,28
<b>CV</b>	5,85	8,50	7,04	2,98	2,71	5,00	4,02	4,70	5,45

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os resultados obtidos para o concreto referência, referência mais fibras e de alta resistência, respectivamente.

Apresentam-se, em todos os gráficos, a linha de referência da resistência requerida nos estudos de dosagem, sendo 4,0 MPa para os concretos REF e 7,0 MPa para o CAR.

Na Figura 22 pode-se verificar um ganho de resistência em todas as idades, sendo mais pronunciada no concreto referência curado em câmara úmida aos 91 dias, com uma resistência 4,87 MPa, sendo esta 20% maior que o segundo melhor resultado obtido, de 3,89 MPa, em cura química seguido da colocação de sacos de aniagem.

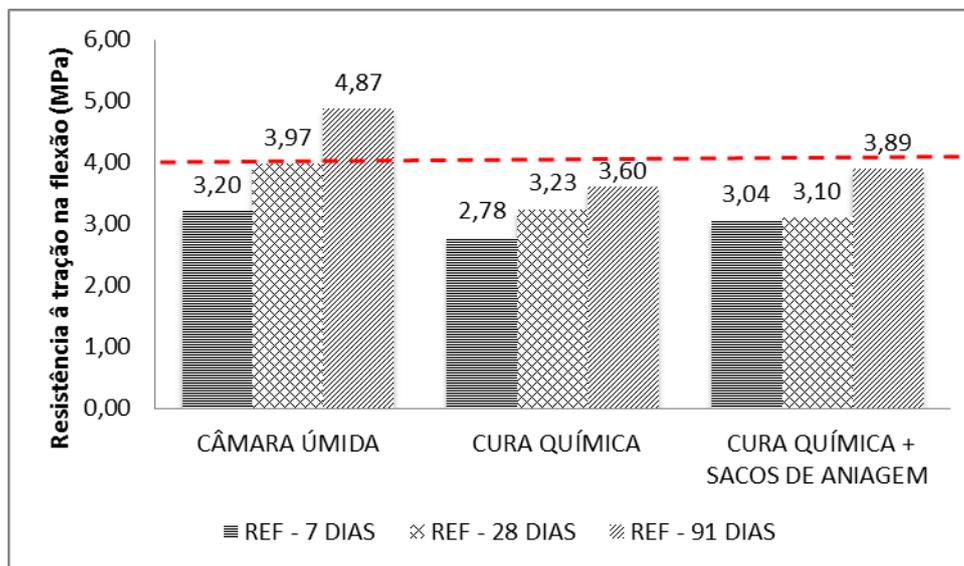


Figura 22 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço de referência.

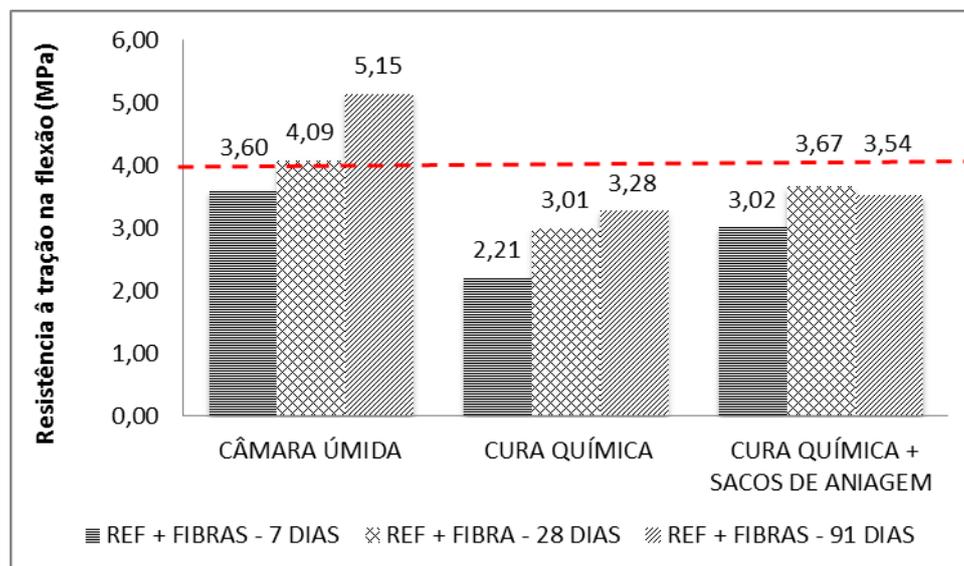


Figura 23 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço referência mais fibras.

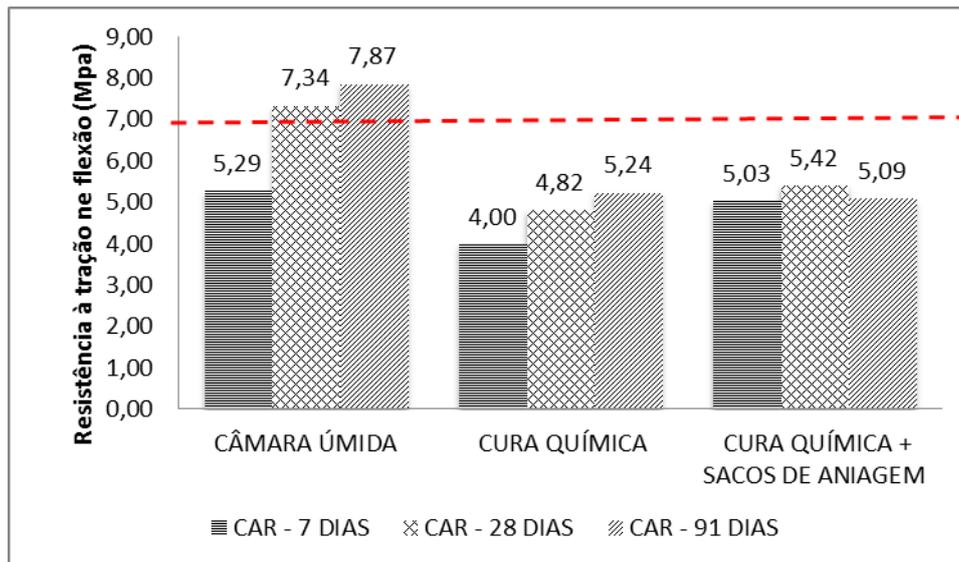


Figura 24 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço do concreto de alta resistência.

Na Figura 23 é possível observar os resultados obtidos para o concreto referência com a adição de fibras de polipropileno, onde aos 91 dias, a cura em câmara úmida apresentou a maior resistência, de 5,15 MPa, sendo que os valores obtidos para o concreto referência com a adição de fibras de polipropileno foram 5% maiores do que o concreto referência. Entretanto, ainda aos 91 dias de permanência em cura, o concreto (REF + FIBRAS), para os outros dois métodos de cura (cura química seguida ou não da colocação de sacos de aniagem úmidos) houve uma redução de 10% da resistência se comparado ao concreto referência.

Nas amostras curadas em cura química seguida de sacos de aniagem houve uma pequena redução na resistência aos 91 dias em relação aos 28 dias, que se acredita estar relacionado com a umidade relativa do ar mais seca no período de 28 para 91 dias.

Na Figura 24 observa-se que o comportamento dos resultados do concreto de alta resistência foram semelhantes ao concreto referência mais fibras, onde houve a mesma redução na resistência à tração na flexão aos 91 dias em relação aos 28 dias para a cura química seguida de sacos de aniagem.

Na maioria dos concretos estudados, conforme cada amostra, foi possível observar que os valores obtidos para cura química seguida de sacos de aniagem foram maiores que as amostras apenas curadas com cura química,

sendo esta constatação relacionada a introdução dos sacos de aniagem que conseguem e mantem a hidratação dos concretos.

Segundo a ABNT NBR 5738:2003, recomenda-se que na realização de ensaios de resistência dos concretos cilíndricos ou prismáticos, os mesmos sejam submetidos a cura em câmara úmida até a data de ensaio, o que poderia estar gerando o subdimensionamento do pavimento, acarretando em uma menor vida para o mesmo, uma vez que os resultados dos ensaios em câmara úmida, para todos os concretos, foram superiores ao métodos de cura comumente aplicados em campo (cura química com ou sem sacos de aniagem).

Esta verificação fica explícita quando um concreto curado em câmara úmida por 28 dias, idade de projeto, apresenta resistência à tração na flexão, para o concreto de alta resistência, de 7,34 MPa e para o mesmo concreto em pista, curado com cura química e sacos de aniagem saturados por 7 dias, obtém-se uma resistência de 5,42 MPa, evidenciando perda de resistência de 26% em condições de cura em pista, para as condições de cura em laboratório.

#### 4.1.2 Ensaio de tração na flexão (ABNT NM 55, 1996)

Os resultados obtidos para os ensaios em tração na flexão empregando a ABNT NM 55:1996 são apresentados na tabela 23 para uma análise mais detalhada.

Para este ensaio também apresenta-se, em todos os gráficos, a linha de referência da resistência requerida nos estudos de dosagem, sendo 4,0 MPa para o concretos REF e 7,0 MPa para o CAR.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de tração na flexão para a obtenção do módulo de elasticidade.

TRAÇÃO NA FLEXÃO - ABNT NM 55:1996									
TRAÇO	REF			REF			REF		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,t (MPa)		
<b>MEDIA</b>	2,64	2,50	2,43	4,26	2,36	2,48	4,07	3,27	3,56
<b>Sd</b>	0,28	0,35	0,01	0,41	0,03	0,01	0,05	0,08	0,40
<b>CV</b>	10,73	14,11	0,59	9,63	1,36	0,58	1,34	2,31	11,20
TRAÇO	REF + FIBRAS			REF + FIBRAS			REF + FIBRAS		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,t (MPa)		
<b>MEDIA</b>	3,20	2,61	3,01	3,86	2,37	2,66	3,40	3,77	3,88
<b>Sd</b>	0,21	0,41	0,32	0,26	0,06	0,09	0,20	0,02	0,38
<b>CV</b>	6,51	15,56	10,72	6,86	2,55	3,30	5,89	0,64	9,93
TRAÇO	CAR			CAR			CAR		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,t (MPa)		
<b>MEDIA</b>	5,93	4,51	5,46	6,79	4,04	5,06	6,65	5,79	5,34
<b>Sd</b>	0,36	0,38	0,15	0,14	0,29	0,19	0,10	0,68	0,45
<b>CV</b>	6,07	8,48	2,75	2,06	7,15	3,69	1,44	11,73	8,49

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação

As Figuras 25, 26 e 27 apresentam os resultados de tração na flexão para todas as misturas, idades e métodos de cura, onde se verifica que para o concreto referência e para o concreto de alta resistência, as maiores resistências obtidas foram para os corpos de prova curados em câmara úmida, como já era previsto, tendo em vista as condições ideais de umidade e

temperatura que a cura em câmara úmida consegue proporcionar para as amostras.

Na Figura 26 verifica-se que o concreto referência mais fibras apresentou ganhos maiores de resistência, com o aumento do período de cura, aos 91 dias, nas amostras curadas com cura química com ou sem sacos de aniagem do que nas amostras curadas em câmara úmida.

Para as figuras 25 e 27 verifica-se que a cura em câmara úmida apresentou os maiores valores de resistência à tração na flexão para todas as idades de ensaio (7, 28 e 91 dias); acredita-se que a cura úmida (câmara úmida) tenha apresentado maiores resultados, nos concretos de referência e de alta resistência, por estar nas condições ideais de saturação e hidratação.

Já nos dois tipos de cura utilizados em pista (cura química e cura química seguida da colocação de sacos de aniagem) observa-se que os valores obtidos, aos 7 aos 28 dias, foram próximos, para os dois métodos de cura, porém verifica-se um ganho acentuado de resistência dos 28 aos 91 dias, que se estende a todos os traços, evidenciando que, aos 91 dias, pode ter ocorrido uma recuperação na resistência, com uma reidratação dos concretos através da película formada pela cura química e pela colocação por 7 dias dos sacos de aniagem, que úmidos, deram condições para que estes pudessem reabsorver a água necessária para a hidratação do cimento e apresentassem ganhos de resistências em maiores idades.

As mesmas considerações observadas para o concreto referência mais fibras, pode-se obter na Figura 27 para o concreto de alta resistência.

Os valores obtidos para cura química seguida ou não de sacos de aniagem para todos os traços de concreto se mantiveram próximas, sendo o ganho de resistência mais acentuado nos corpos de prova com a cura química seguida dos sacos de aniagem.

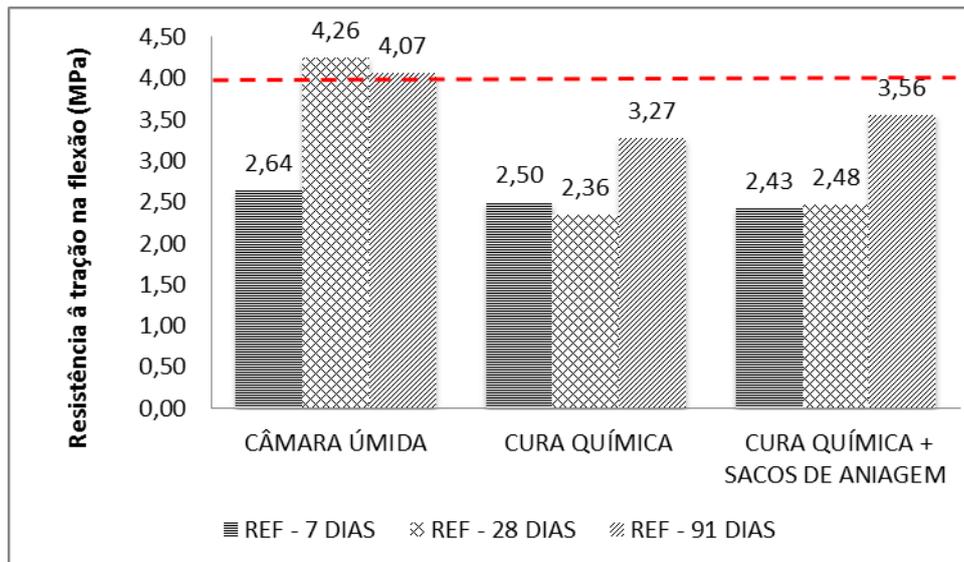


Figura 25 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço de referência.

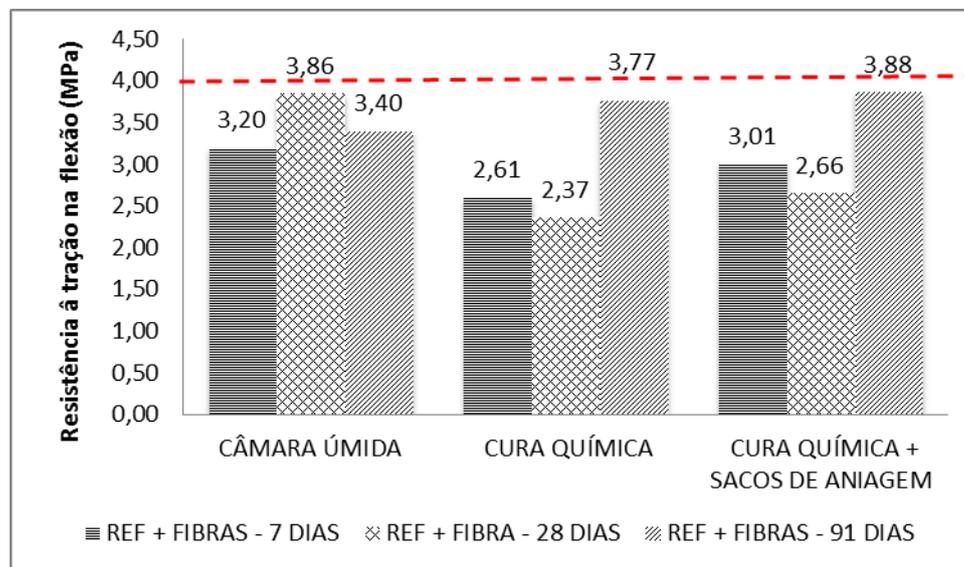


Figura 26 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço de referência mais fibras.

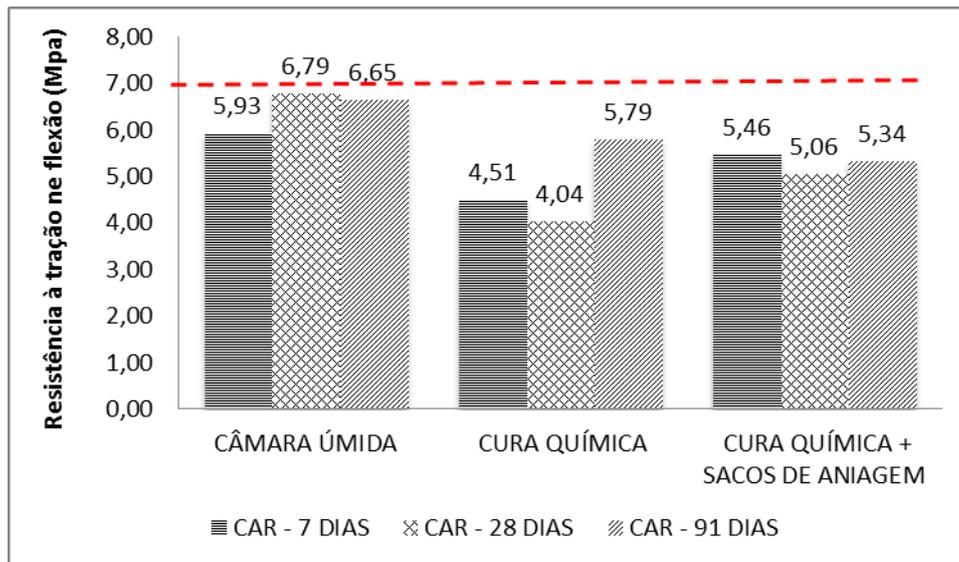


Figura 27 - Resistência à tração na flexão para os diferentes métodos de cura no traço do concreto de alta resistência.

## 4.2 Resistência à compressão axial

4.2.1 Ensaios de resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739: 2007)

Os resultados obtidos para os concretos estudados na resistência à compressão axial se apresentam na tabela 24.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL</b>									
<b>TRAÇO</b>	<b>REF</b>			<b>REF</b>			<b>REF</b>		
<b>IDADE</b>	<b>7 DIAS</b>			<b>28 DIAS</b>			<b>91 DIAS</b>		
<b>MÉTODO DE CURA</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>
	<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>		
<b>MEDIA</b>	16,71	21,51	20,07	30,85	27,78	27,04	32,14	28,64	28,26
<b>Sd</b>	0,44	1,20	1,32	1,15	0,43	0,23	0,31	1,37	1,48
<b>CV</b>	2,62	5,59	6,57	3,73	1,56	0,84	0,97	4,77	5,24
<b>TRAÇO</b>	<b>REF + FIBRAS</b>			<b>REF + FIBRAS</b>			<b>REF + FIBRAS</b>		
<b>IDADE</b>	<b>7 DIAS</b>			<b>28 DIAS</b>			<b>91 DIAS</b>		
<b>MÉTODO DE CURA</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>
	<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>		
<b>MEDIA</b>	24,30	17,80	21,16	30,01	25,10	26,49	34,42	27,95	29,58
<b>Sd</b>	1,74	0,07	0,81	0,30	0,85	0,50	1,28	0,38	2,10
<b>CV</b>	7,15	0,41	3,82	0,99	3,39	1,87	3,71	1,37	7,09
<b>TRAÇO</b>	<b>CAR</b>			<b>CAR</b>			<b>CAR</b>		
<b>IDADE</b>	<b>7 DIAS</b>			<b>28 DIAS</b>			<b>91 DIAS</b>		
<b>MÉTODO DE CURA</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>	<b>CÂMARA ÚMIDA</b>	<b>CURA QUÍMICA</b>	<b>CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM</b>
	<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>			<b>fc (MPa)</b>		
<b>MEDIA</b>	34,83	56,30	59,78	69,86	57,72	67,24	61,42	61,82	72,68
<b>Sd</b>	6,32	2,89	0,71	1,13	2,51	0,90	2,28	2,35	5,08
<b>CV</b>	18,16	5,14	1,18	1,61	4,35	1,34	3,72	3,79	6,98

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os resultados obtidos na Tabela 24 para os ensaios de resistência à compressão axial nas misturas propostas.

A Figura 28 apresenta um ganho de resistência em todas as idades com o aumento do período de cura, sendo este mais pronunciado em câmara úmida, com resistência 11% superior aos demais métodos de cura para o traço Referência aos 91 dias e com uma variação de 15 MPa em relação aos resultados aos 7 dias de cura úmida. Também é possível observar que os

valores obtidos para cura química e cura química mais sacos de aniagem foram similares.

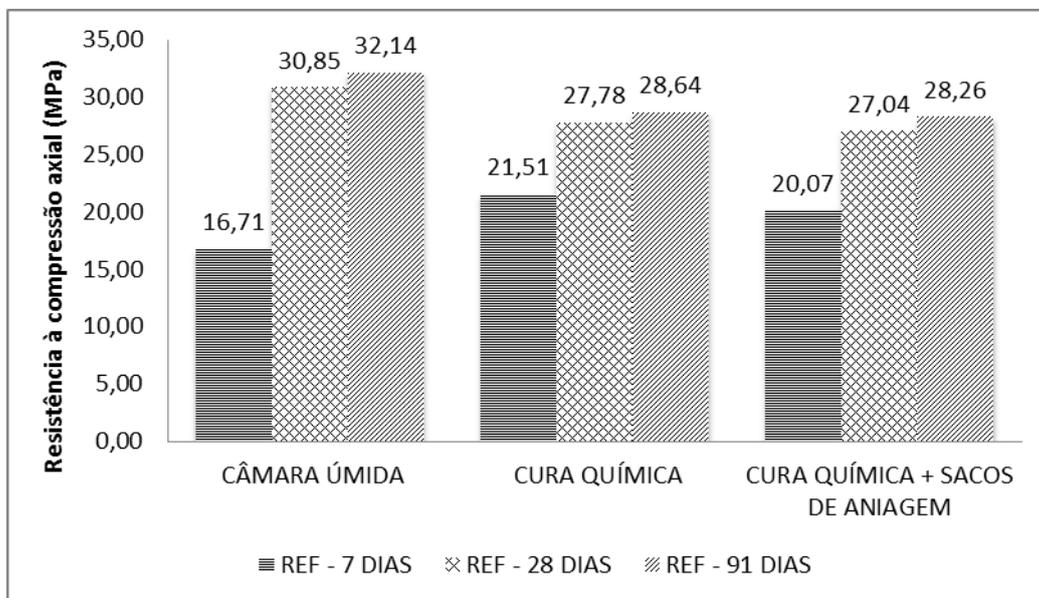


Figura 28 - Resistência à resistência à compressão axial para os diferentes métodos de cura no traço de referência.

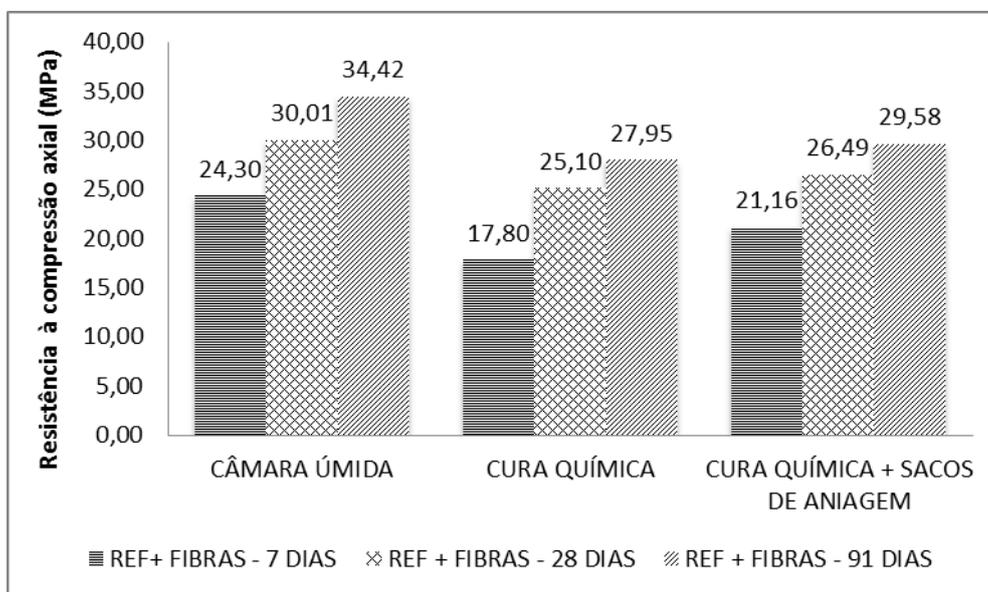


Figura 29 - Resistência à resistência à compressão axial para os diferentes métodos de cura no traço referência mais fibras.

Na Figura 30 também é possível verificar um ganho de resistência em todas as idades de ensaio para todos os métodos de cura propostos, onde

como já era de se esperar os resultados obtidos em cura em câmara úmida foram maiores que as demais curas para todas as idades, sendo 14% maior do que a cura química mais sacos de aniagem aos 91 dias.

Com a utilização das fibras de polipropileno no concreto referência, foi possível verificar que houve um ganho de 4 a 6% de resistência média para cura química seguida de sacos de aniagem e cura em câmara úmida se comparados ao concreto referência sem fibras, respectivamente.

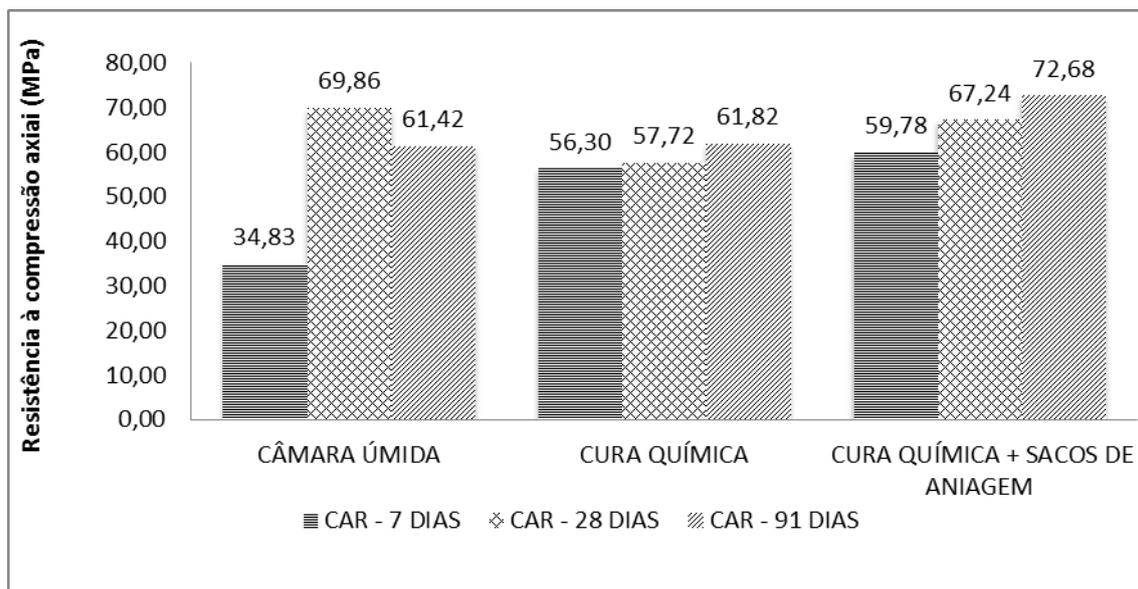


Figura 30 - Resistência à resistência à compressão axial para os diferentes métodos de cura no traço do Concreto de alta resistência.

Podem-se notar através da Figura 31 os resultados obtidos para o concreto de alta resistência, onde houve uma redução da resistência em câmara úmida aos 91 dias em relação aos 28 dias. Acredita-se que o CAR é muito mais sensível aos efeitos de sorção (desorção e absorção) assim como a defeitos na realização dos ensaios, pois é um material muito mais frágil com deformações elásticas muito pequenas e plásticas quase nulas, resultando em variações entre os corpos de prova maiores do que no CC.

### 4.3 Resistência à tração por compressão diametral

#### 4.3.1 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011)

Os resultados obtidos para os concretos estudados na resistência à tração por compressão diametral se apresentam na tabela 25.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL									
TRAÇO	REF			REF			REF		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)		
MEDIA	2,04	2,48	2,01	2,91	2,78	2,82	3,36	2,86	2,84
Sd	0,24	0,15	0,16	0,19	0,15	0,11	0,19	0,39	0,15
CV	11,62	5,97	7,74	6,67	5,29	4,08	5,68	13,72	5,14
TRAÇO	REF + FIBRAS			REF + FIBRAS			REF + FIBRAS		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)		
MEDIA	2,58	2,48	2,35	3,22	3,19	3,31	3,58	3,24	3,32
Sd	0,21	0,26	0,10	0,34	0,08	0,16	0,17	0,18	0,25
CV	8,01	10,59	4,22	10,50	2,66	4,95	4,66	5,53	7,40
TRAÇO	CAR			CAR			CAR		
IDADE	7 DIAS			28 DIAS			91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)			fct,sp (MPa)		
MEDIA	5,01	4,87	4,98	6,26	5,61	5,75	6,10	5,69	5,40
Sd	0,08	0,29	0,25	0,26	0,32	0,35	0,55	0,29	0,03
CV	1,54	6,02	4,92	4,22	5,78	6,01	9,03	5,14	0,46

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os resultados obtidos na Tabela 25 para os ensaios nos concretos de referência, de referência mais fibras e de alta

resistência respectivamente, sendo estes, submetidos aos diferentes métodos de cura propostos na pesquisa.

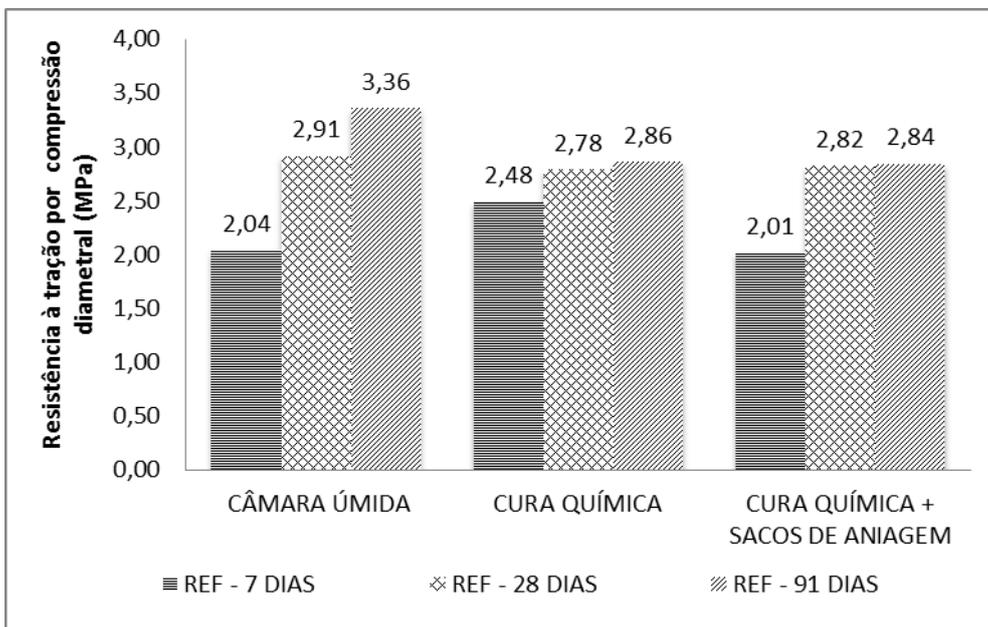


Figura 31 - Resistência à resistência à tração por compressão diametral para os diferentes métodos de cura no traço referência.

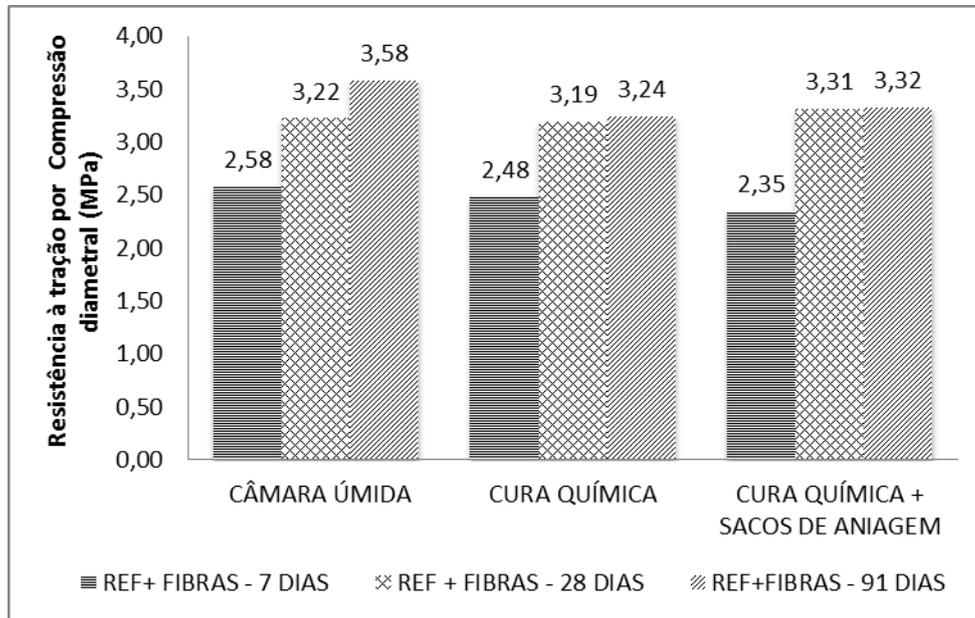


Figura 32 - Resistência à resistência à tração por compressão diametral para os diferentes métodos de cura no traço referência mais fibras.

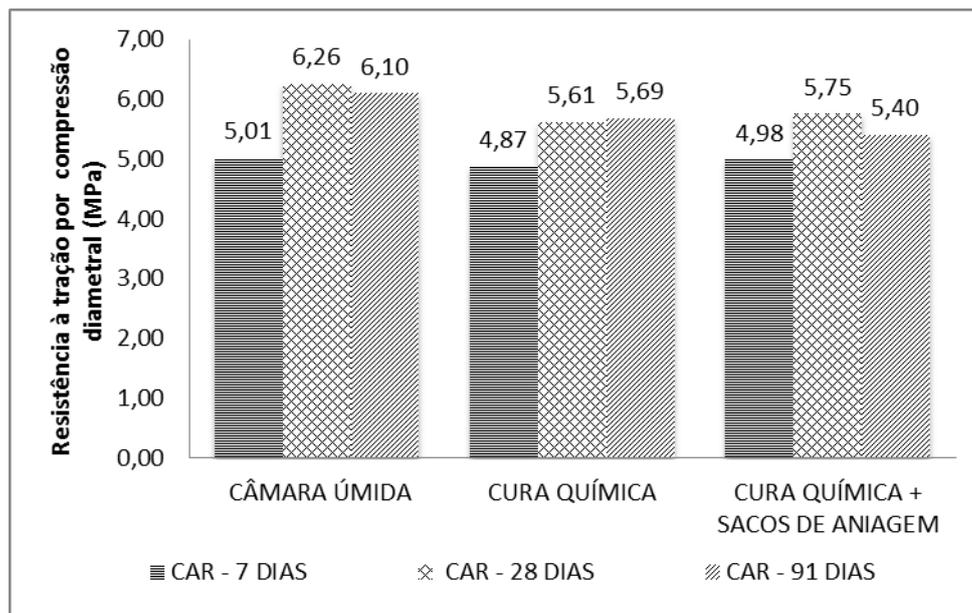


Figura 33 - Resistência à resistência à tração por compressão diametral para os diferentes métodos de cura no traço do concreto de alta resistência.

Pode-se notar através da Figura 31, que para o concreto referência ocorreu um crescimento na resistência à tração por compressão diametral com o aumento do período de cura em todos os métodos de cura analisados, sendo este mais expressivo para a cura em câmara úmida que obteve um ganho de resistência de 15 % em relação aos demais métodos estudados (cura química e cura química mais sacos de aniagem). Os valores obtidos para cura química e cura química seguida da colocação de sacos de aniagem apresentaram valores muito próximos.

Na Figura 32 observa-se um ganho de resistência com o aumento do período de permanência em cura nos diferentes métodos. Visualiza-se que o concreto curado em câmara úmida obteve os melhores resultados de resistência com valor médio de 3,58 MPa, seguido pela cura química mais sacos de aniagem que apresentou valor médio de 3,32 MPa, ambos, aos 91 dias de permanência de cura.

Para o concreto referência com adição de fibras de polipropileno, foi possível verificar um ganho de 6 a 15% de resistência, aos 28 e 91 dias, para todos os métodos de cura, em relação ao concreto referência sem fibras.

A Figura 33 apresenta os valores obtidos para o concreto de alta resistência onde também se observou os melhores resultados para a cura em câmara úmida, sendo esta constatação válida, tendo em vista que em câmara

úmida obtiveram-se as condições mais propícias para hidratação do cimento e ganho de resistência com o tempo, com a temperatura e a umidade controladas.

Porém, verifica-se uma queda na resistência, aos 91 dias na cura em câmara úmida e na cura química seguida com sacos de aniagem.

Os valores obtidos para os concretos curados em cura química ou em cura química seguida de sacos de aniagem para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 91 dias, verificou-se que a resistência diminuiu com o aumento do período de ensaio. Observa-se que as diferenças da cura química mais sacos de aniagem quanto a resistência à tração por compressão diametral, evoluem muito pouco ou quase sem representatividade de 28 para 91 dias para o concreto referência com ou sem adição de fibras.

Na cura química seguida da colocação de sacos de aniagem é possível visualizar que os valores obtidos para o concreto com ou sem adição de fibras de polipropileno, aos 28 e 91 dias, são equivalentes. Observa-se também que após os 7 dias de permanência em cura, ocorre um ganho expressivo de resistência na ordem de 30%, demonstrando que a cura com sacos de aniagem úmidos pode ter atuado para a reidratação do concreto, absorvendo novamente a água que havia sido perdida nas primeiras 24 horas, antes da aspersão da cura química.

Nota-se que o CAR é mais suscetível à eventual perda de água neste período, entre 28 até os 91 dias, mesmo utilizando sacos de aniagem que, apesar de seu uso, não neutralizam eventual perda de água no interior do concreto. No CAR os efeitos de desorção, conforme já apresentado no item 4.2.1, são mais intensos que os de absorção, devido a menor dimensão dos poros internos e, logo, maior capilaridade nos efeitos de sucção do interior mais úmido para as partes externas menos úmidas, ou seja, a perda real de água. Entretanto, esses fenômenos são muito pequenos.

Outro fator que pode ter influenciado a redução na resistência com o aumento do período de cura, são as variações dos próprios ensaios que estão sendo apresentados, com valores em torno 3% a 6% (na presente situação).

#### 4.4 Correlações entre os ensaios de resistência mecânica

Com intuito de analisar mais detalhadamente os dados obtidos nos ensaios realizados, foram estudadas algumas correlações de equivalência dos resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 e pela NM 55, primeiramente, realizando uma correlação entre as duas normas e posteriormente, entre os ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 em relação aos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, como forma de verificar os percentuais de equivalentes a resistência à compressão do concreto. Ainda realizou-se as correlações entre os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial a fim de elucidar as questões relacionadas a resistência dos concretos estudados.

##### 4.4.1 Correlação entre tração na flexão obtida pelo ensaio ABNT NBR 12142 (2010) e pela aquisição de dados para o módulo de elasticidade pela NM 55 (1996).

As Figuras 34, 35 e 36 apresentam as correlações obtidas através dos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142/2010 e pela NM 55/1996, onde foi possível avaliar qual foi o ganho ou perda de resistência quando se adotou uma ou a outra norma para a execução dos ensaios.

Na Figura 34 observa-se que os valores obtidos tanto pela NBR 12142, quanto pela NM 55 para obtenção da flecha no meio do vão e posterior análise do módulo de elasticidade estático, não foram próximos no traço referência, para todos os métodos de cura e em todas as idades de ensaio, com variações de resistência, quando comparadas, entre 8 a 20%, sendo que as maiores variações ocorreram, em todos os métodos de cura, aos 28 dias.

Assim como foi constatado no ensaio de tração na flexão pela ABNT NBR 12142, houve um ganho de resistência com a adição das fibras de polipropileno, na Figura 35, pela NBR NM 55, sendo mais pronunciado para as curas química seguida ou não da colocação de sacos de aniagem.

Observa-se que os valores encontrados para o concreto referência mais fibras apresentaram a maior diferença nos resultados, com variação passando de 35% se comparados os valores obtidos pela NBR 12142 e a NM 55, principalmente para a cura em câmara úmida aos 91 dias, onde para a NBR 12142 se obteve 5,15 MPa e para NM 55 apenas 3,40 MPa.

Na Figura 36, nota-se que os valores obtidos pelas duas normas foram as que mais se aproximaram para todos os concretos estudados com variações entre 5 a 12%, onde ainda se observa que os valores obtidos pela NM 55 para algumas idades (7 e 91 dias) apresentaram resultados superiores aos encontrados pela ABNT NBR 12142.

De uma forma geral acredita-se que as maiores dispersões encontradas pela NBR NM 55 estão relacionadas com a aquisição de dados através do programa Spyder, uma vez que este se apresenta muito sensível na realização dos ensaios, gerando resultados bem distintos para amostras de um mesmo concreto estudado.

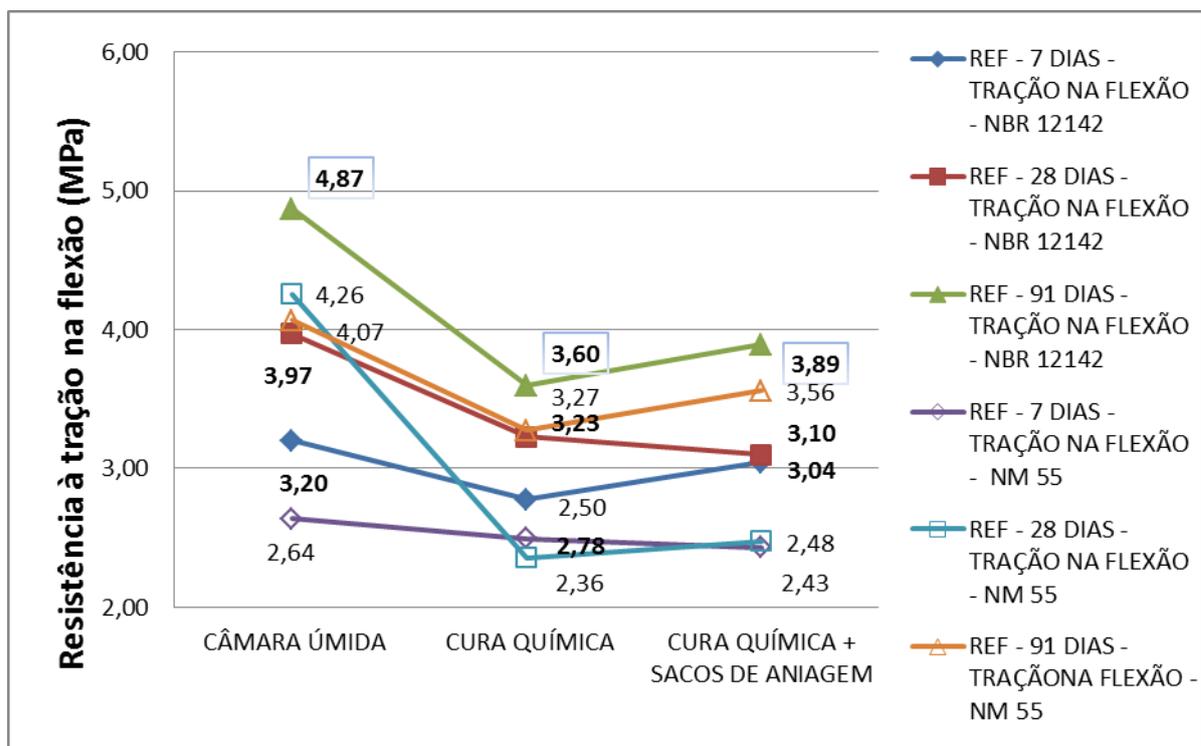


Figura 34 - Correlação entre os resultados de Tração na Flexão obtidos para o traço Referência.

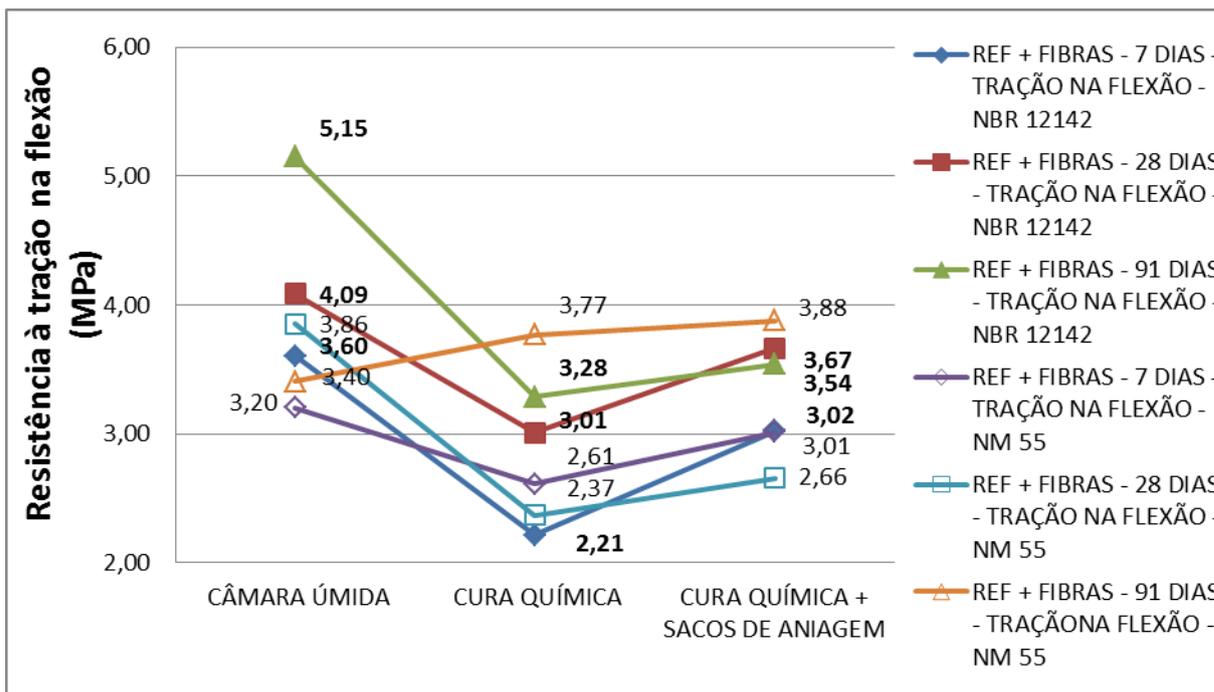


Figura 35 - Correlação entre os resultados de tração na flexão obtidos para o traço referência mais fibras.

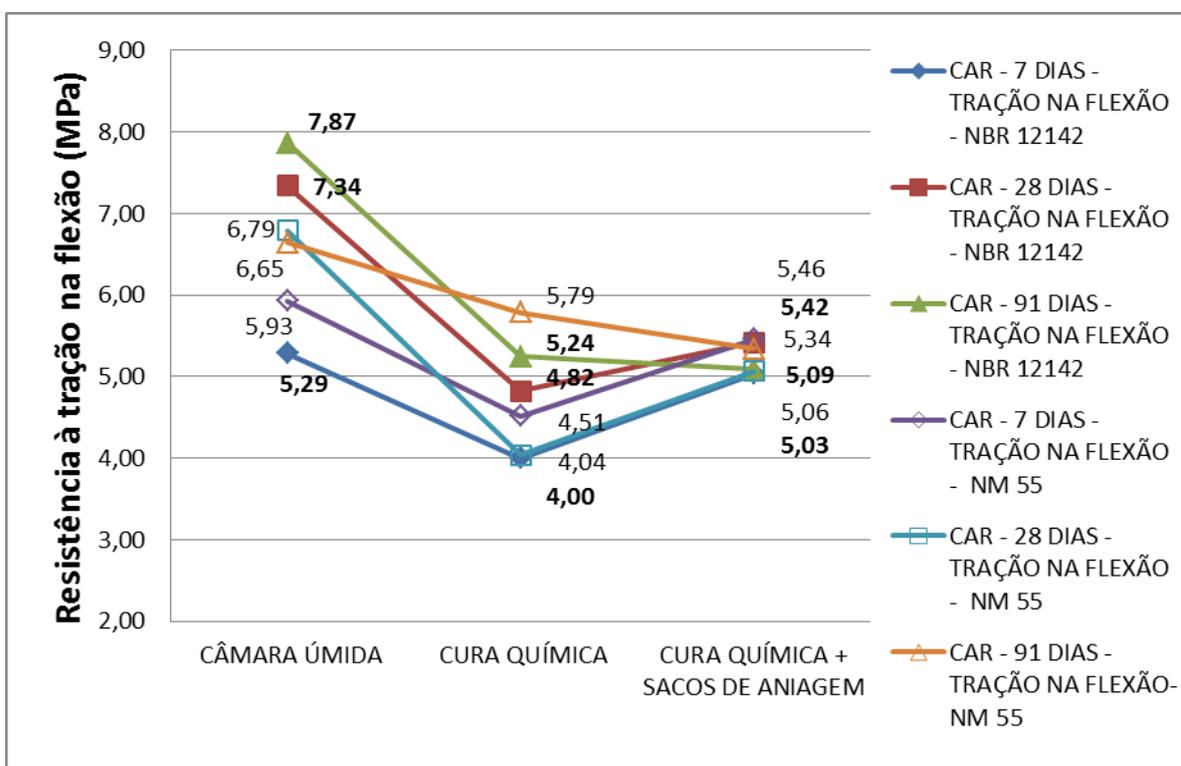


Figura 36 - Correlação entre os resultados de tração na flexão obtidos para o traço do concreto de alta resistência.

Para uma análise mais detalhada está sendo mostrando nas Figuras 37, 38 e 39 a comparação dos valores obtidos para todos os concretos, em todos os métodos de cura estudados para a idade de projeto (28 dias).

Através desta análise é possível verificar que existe variação nos valores encontrados pelas duas normas sendo estes inferiores pela NM 55 com exceção da cura em câmara úmida que obteve valores mais próximos.

As menores variações de resistência ocorreram para o concreto de alta resistência com variação em torno de 7%, porém para os demais concretos (referência e referência mais fibras) e métodos de cura (cura química e cura química mais sacos de aniagem) os valores alcançados apresentaram variações acentuadas entre 25 a 35%.

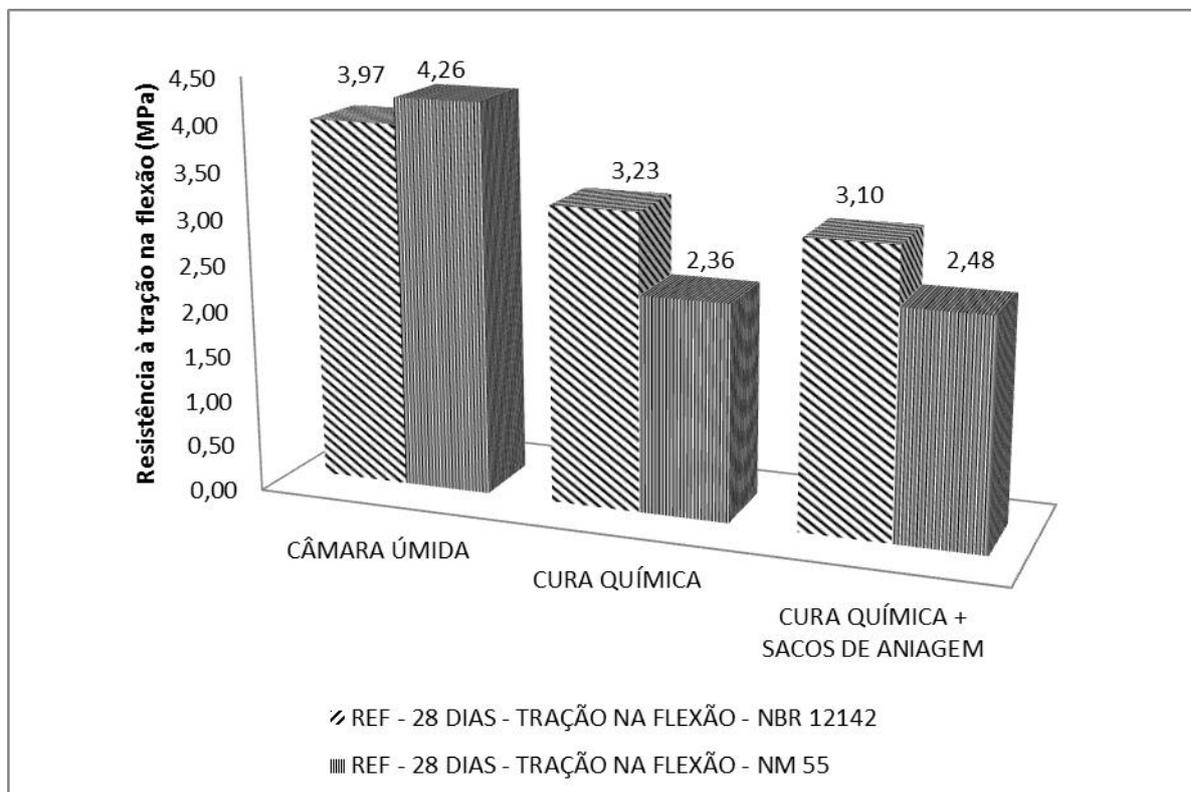


Figura 37 - Resultados dos ensaios de tração na flexão obtidos para o concreto referência aos 28 dias.

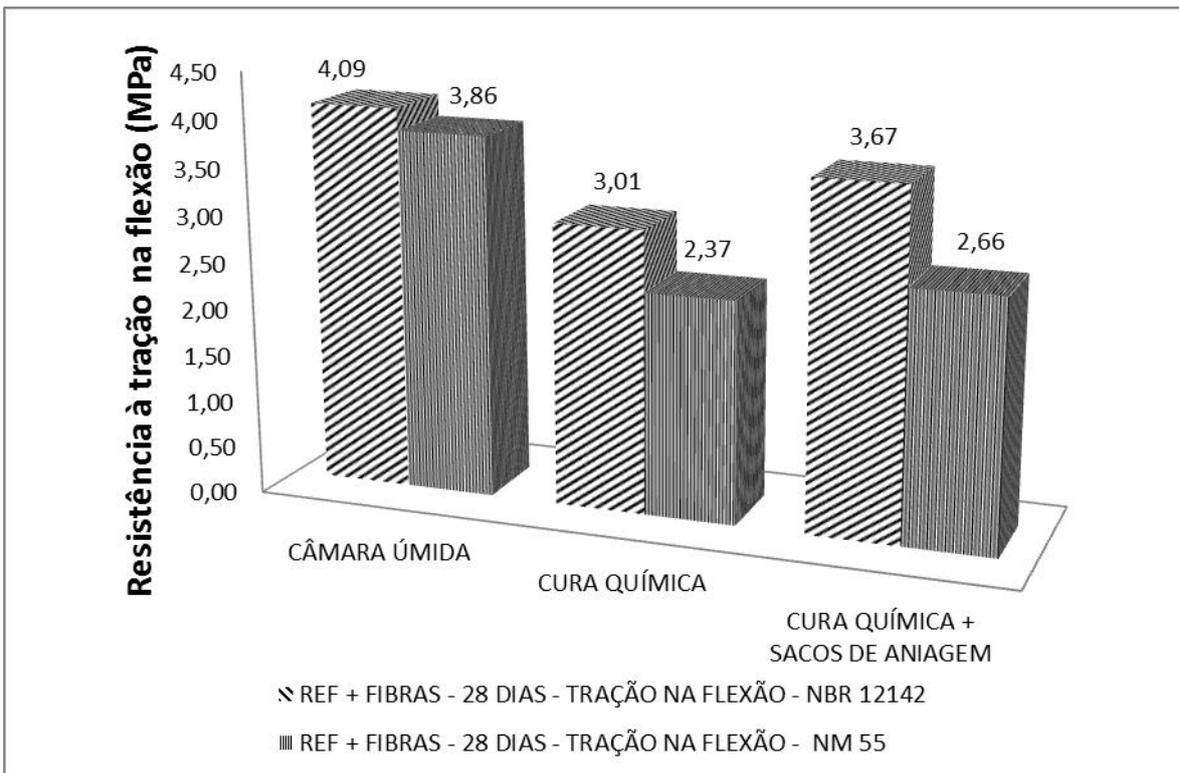


Figura 38 - Resultados dos ensaios de tração na flexão obtidos para o concreto referência mais fibras aos 28 dias.

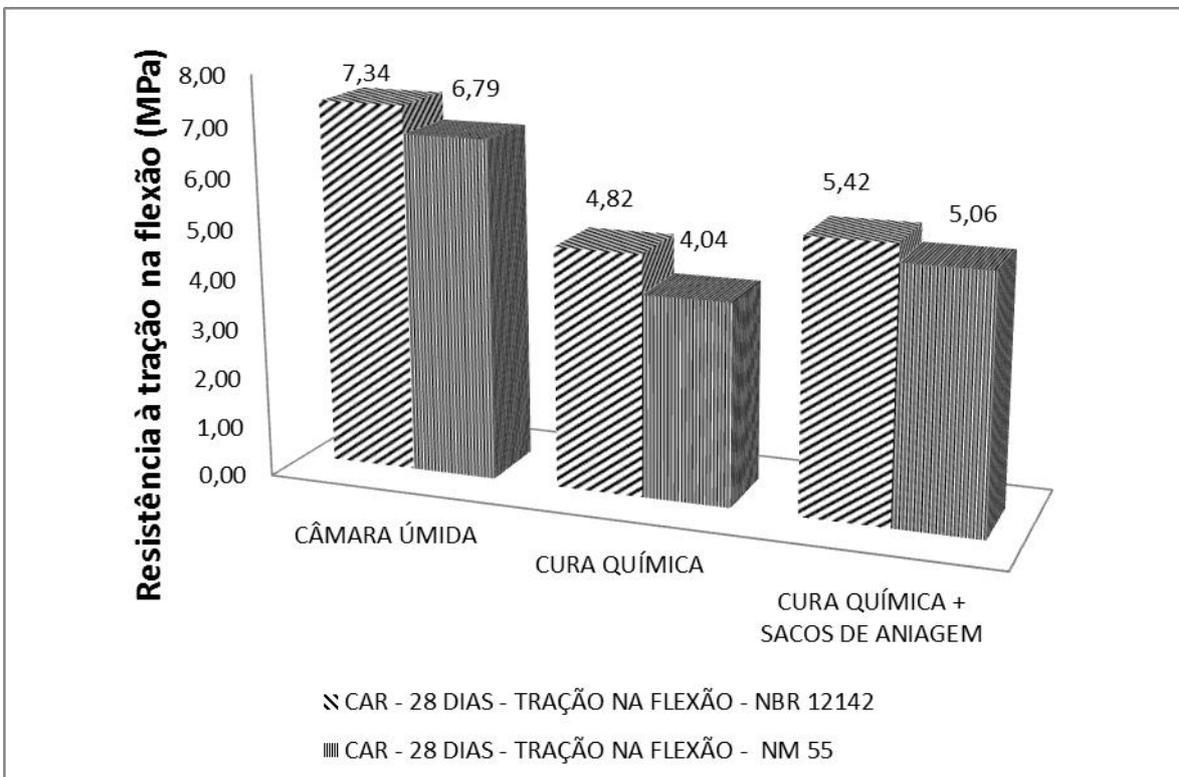


Figura 39 - Resultados dos ensaios de tração na flexão obtidos para o concreto de alta resistência aos 28 dias.

Também se acredita que a variação das resistências esteja relacionada com o efeito escala, devido à diferença entre os apoios conforme cada norma, gerando assim resultados menores para NM 55, que apresenta uma menor distância entre os apoios se comparado com ABNT NBR 12142, o que pode ainda estar gerando um aumento de rigidez relativa nestas amostras.

#### 4.4.2 Correlação entre a resistência à compressão axial com a resistência à tração na flexão

Através dos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 foi possível avaliar em conjunto com os ensaios à resistência à compressão axial como se comportaram os valores obtidos a fim de elucidar e validar os mesmos.

As correlações entre os valores obtidos pela tração na flexão e resistência à compressão axial são mostrados nas Figuras 40, 41 e 42 para todos os métodos de cura e idades de ensaio, nos concretos referência, referência mais fibras e de alta resistência, respectivamente.

Observando o gráfico da Figura 40 é possível visualizar que a resistência à tração na flexão, para o traço referência em câmara úmida, foi 15% da resistência à resistência à compressão axial, enquanto para cura química, foi de 12% e para cura química seguida de sacos de aniagem foi 13%, sendo o valor médio para todos os métodos de cura e idades de 13,6%.

Já para o concreto referência mais fibras, na Figura 41, o valor médio obtido de resistência à tração na flexão também foi de 13,4%, mostrando a coerência nos resultados obtidos para as mesmas relações.

No concreto de elevada de resistência, na Figura 42, o valor médio foi de 9,3% da resistência à resistência à compressão axial na relação com a resistência à tração na flexão.

Segundo Mehta (2008), à medida que a resistência à resistência à compressão axial do concreto aumenta a resistência à tração na flexão também aumenta, mas em uma taxa decrescente, ou seja, a razão resistência à compressão pela resistência a tração depende do nível geral da resistência à compressão, quanto mais alta à resistência à compressão, menor a razão,

sendo esta constatação evidenciada nos valores médios obtidos para os concretos estudados, que no concreto de alta resistência, apresentou uma razão 9,3%, devido a sua maior resistência e para os concretos referência e referência mais fibras, essa razão foi de 13,4%.

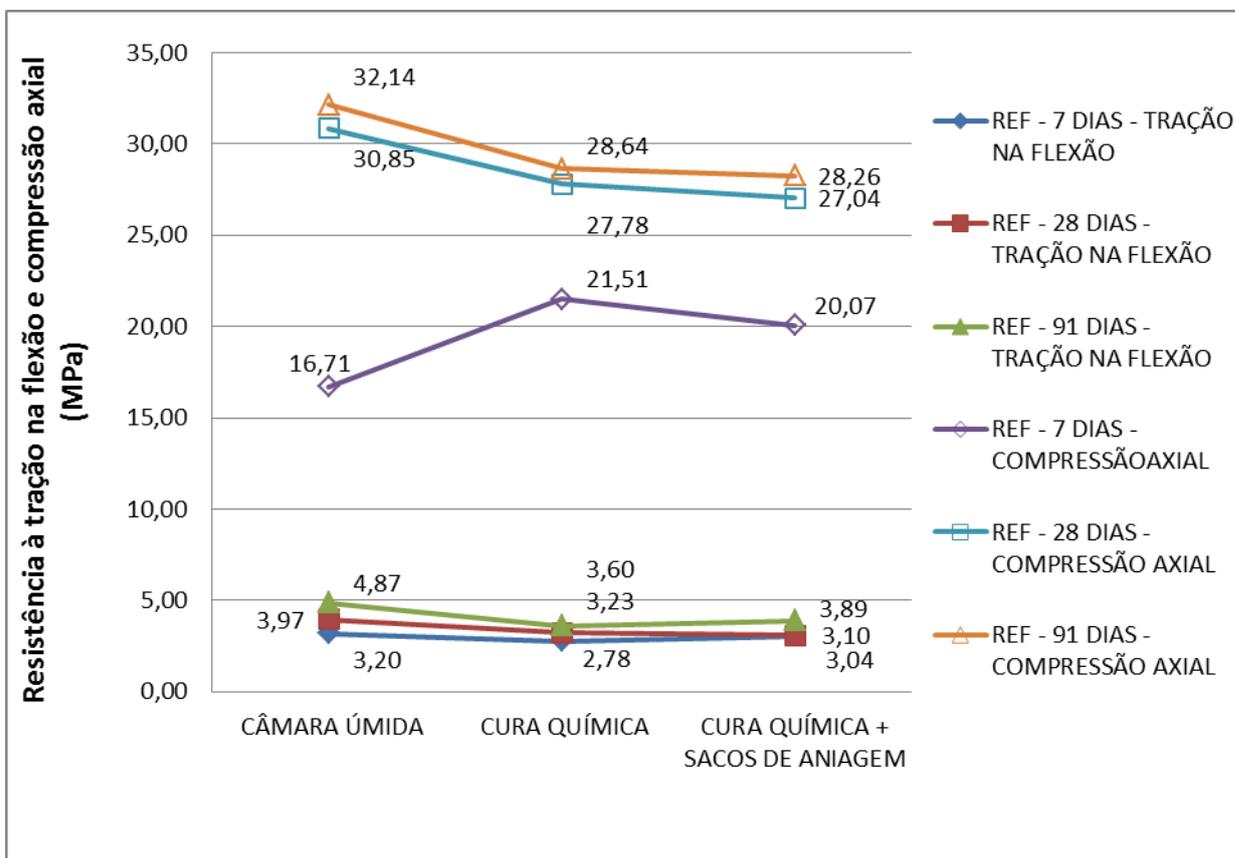


Figura 40 - Correlação entre os resultados obtidos para o concreto referência nos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 e resistência à compressão axial.1

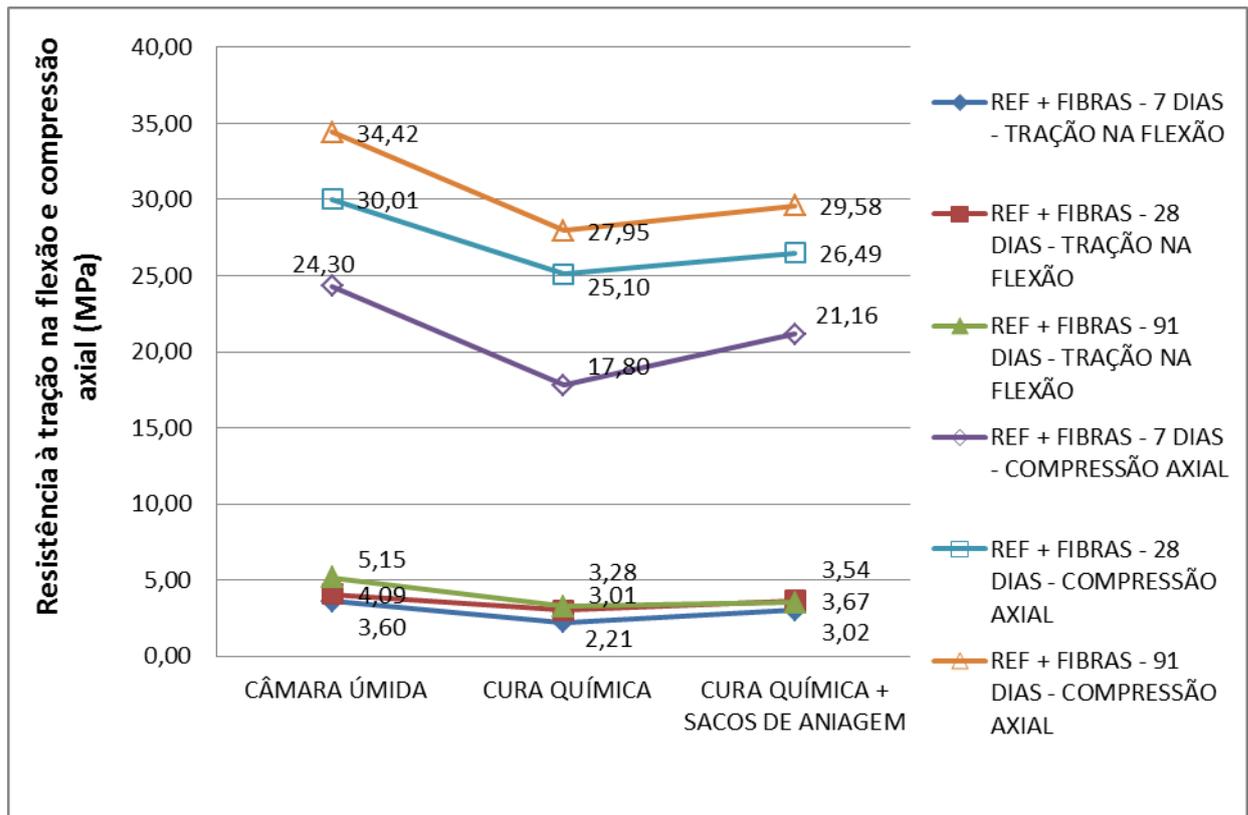


Figura 41 - Correlação entre os resultados obtidos para o concreto referencial mais fibras nos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 e resistência à compressão axial.

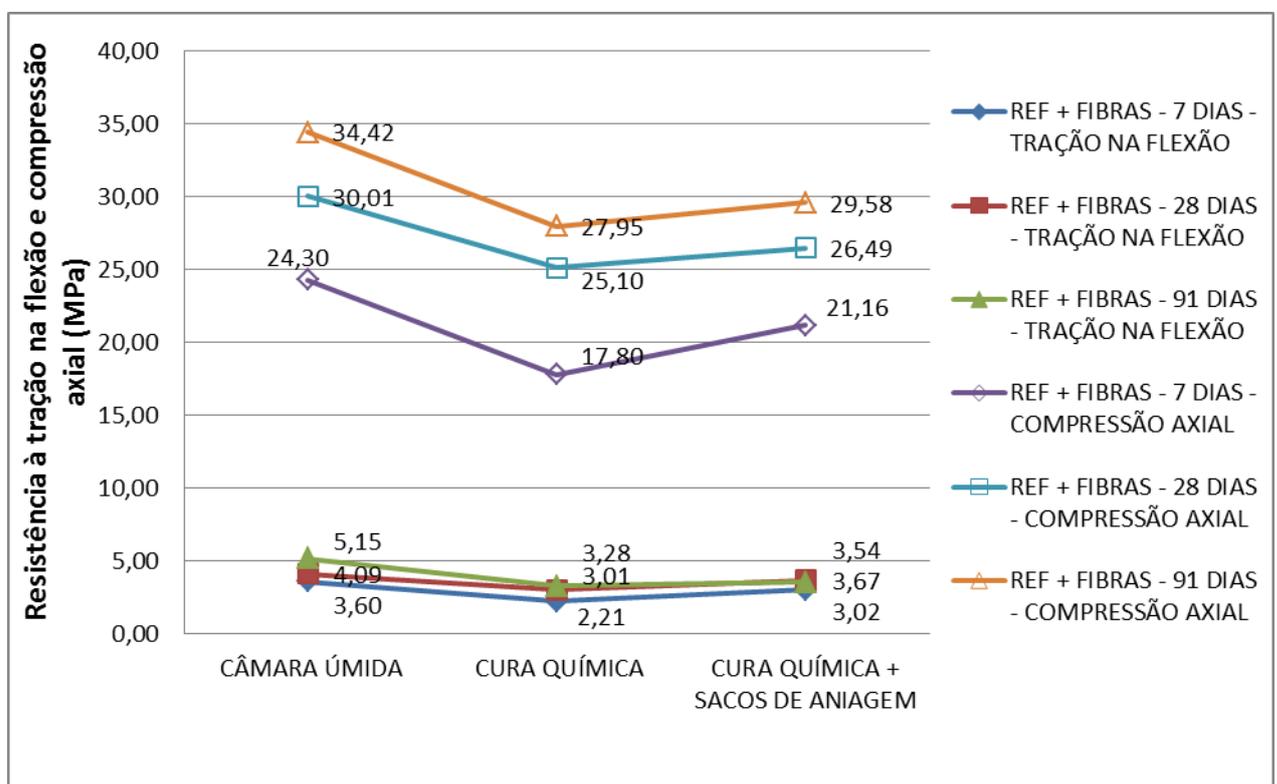


Figura 42 - Correlação entre os resultados obtidos para o concreto de alta resistência nos ensaios de tração na flexão pela ABNT NBR 12142 e resistência à compressão axial.

As correlações entre a resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial ficam ainda mais evidentes nas Figuras 43, 44 e 45 onde apresentam-se os valores obtidos na idade de projeto, aos 28 dias, para todos os concretos, métodos de cura e idades estudados.

Para o concreto referência a razão entre a resistência à tração pela resistência à compressão ficou entre 11 e 12%, aos 28 dias, enquanto para o concreto referência mais fibras esta relação variou entre 11 a 14% e para o concreto de alta resistência a variação foi de 8 a 10%, mostrando mais uma vez que os resultados a resistência à compressão axial encontrados em conjunto com os resultados da tração na flexão se apresentaram de forma coerente aos apresentados na literatura.

Tseng (2010) avaliou a resistência à tração na flexão e a resistência a compressão para agregados recicláveis em concretos para reutilização em pavimentos novos, onde observou que não é possível obter uma relação direta entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão em concretos contendo agregados recicláveis, pois torna-se necessário considerar outros fatores, tais como, absorção e o tamanho máximo do agregado reciclado utilizado.

Oliveira *et al.*(2008) realizou um estudo comparativo entre a resistência à tração na flexão e resistência à resistência à compressão axial aplicando diferentes métodos de cura, para um concreto convencionalmente empregado em pavimentação, onde obteve-se valores médios de resistência à resistência à compressão axial de 25 a 35 MPa, aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Os valores obtidos de resistência à resistência à compressão axial para cura química e cura química seguida de sacos de aniagem se elevaram com o aumento do período de cura e idades de ensaio, sendo que o maior valor obtido ocorreu aos 91 dias em cura química seguida de sacos de aniagem com resistência média de 72,68 MPa.

Os ganhos de resistência foram mais pronunciados na cura em câmara úmida, sendo estes elevados em até 50%, com o aumento do período de permanência em cura. Já a cura química apresentou, para o concreto referência, valores de resistência à resistência à compressão axial equivalentes

em todas as idades, entretanto, no concreto referência mais fibras e de alta resistência, a cura química seguida da colocação de sacos de aniagem úmidos atuou de forma benéfica na estrutura dos concretos, gerando valores mais elevados.

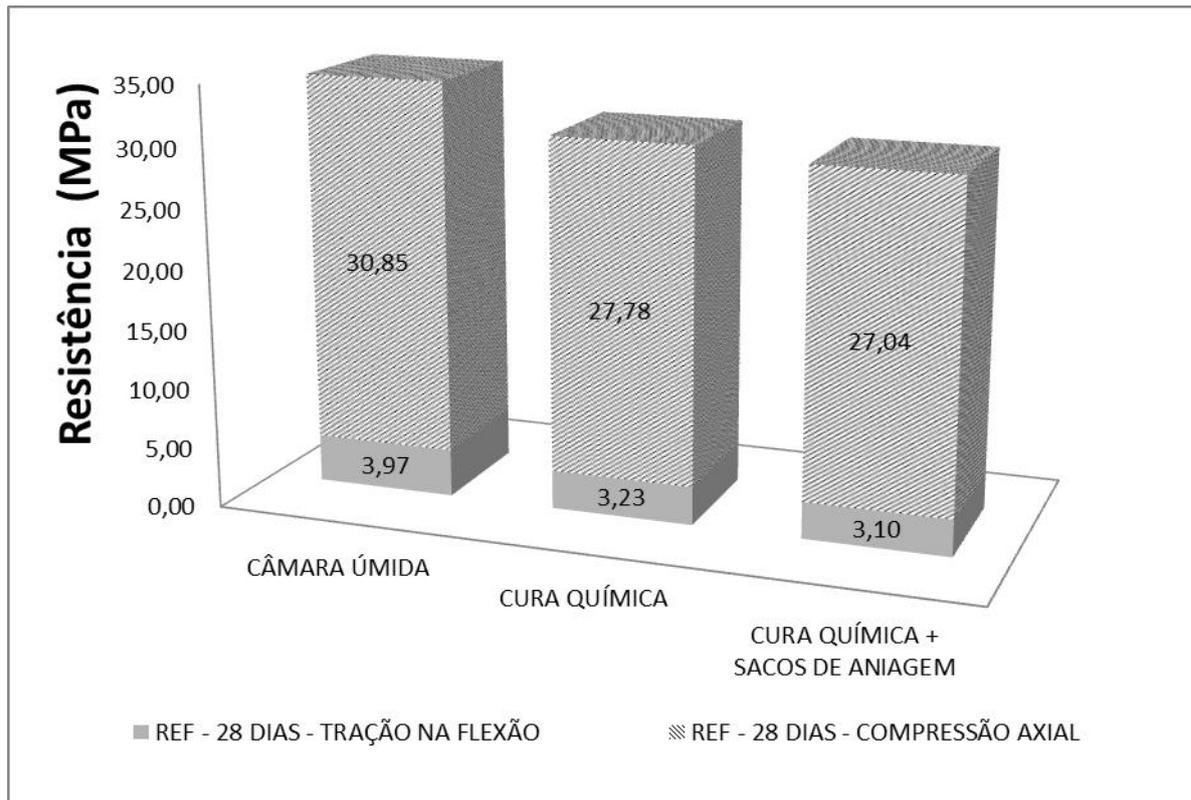


Figura 43 - Resultados dos ensaios de tração na flexão e resistência à compressão axial, obtidos para o concreto referência aos 28 dias.

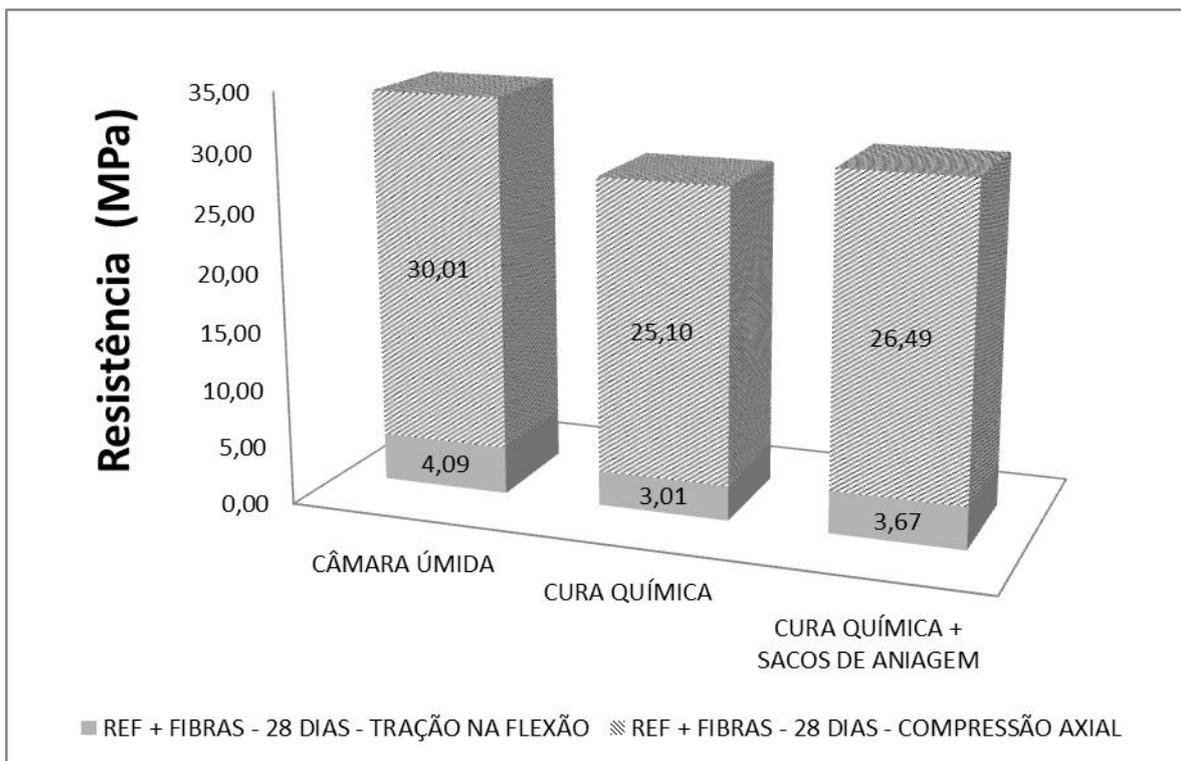


Figura 44 - Resultados dos ensaios de tração na flexão e resistência à compressão axial, obtidos para o concreto referência mais fibras aos 28 dias.

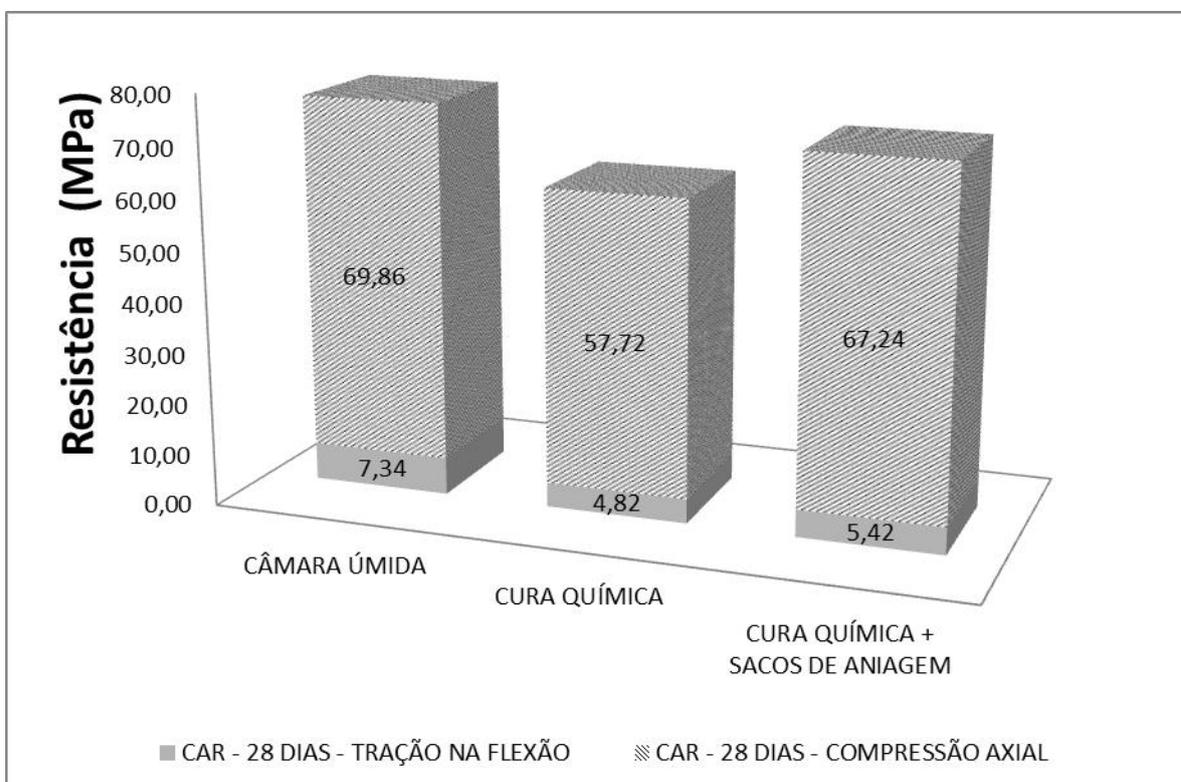


Figura 45 - Resultados dos ensaios de tração na flexão e resistência à compressão axial, obtidos para o concreto de alta resistência aos 28 dias.

#### 4.4.3 Correlação entre a resistência à compressão axial com a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta)

Nos ensaios de resistência à compressão axial também se pode avaliar em conjunto com os ensaios a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) como se comportaram os valores obtidos.

As correlações entre os valores obtidos pela resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral se apresentam nas Figuras 46, 47 e 48 para todos os métodos de cura e idades de ensaio, no concreto referência, referência mais fibras e de alta resistência, respectivamente.

Ao analisar a Figura 46 verifica-se que a razão entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão axial fica entre 10,2 a 10,4% dependendo do método de cura, assim tem-se como valor médio 10,3%.

Já para o concreto referência mais fibras, na Figura 47, o valor médio obtido foi de 11,5% e para o concreto de alta de resistência, na Figura 49, o valor médio foi de 9,2% da resistência à resistência à compressão axial na relação com a resistência a resistência à tração por compressão diametral.

Ainda seguindo os conceitos de Mehta e Monteiro (2008) em que os valores obtidos para resistência à compressão axial na razão com a resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) ou na tração na flexão se apresentam menores, quanto maior for a resistência, pode-se notar coerência nos resultados encontrados nesta pesquisa.

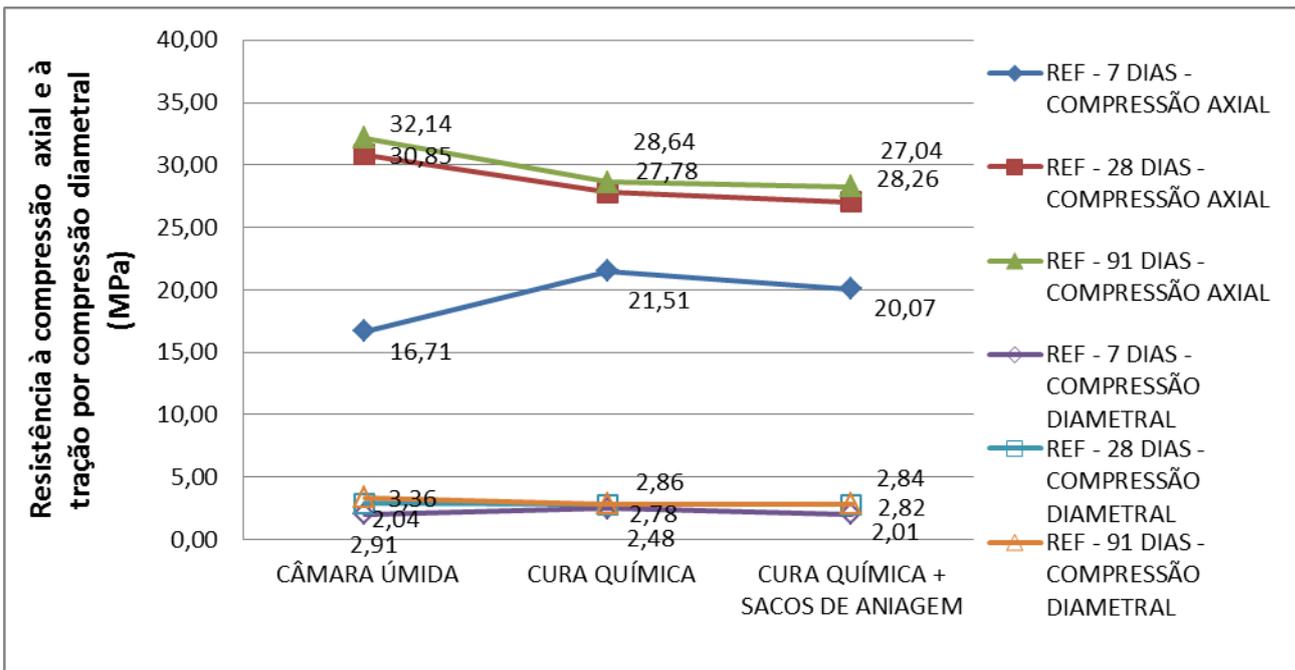


Figura 46 - Correlação entre os resultados da resistência a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral no traço de referência.

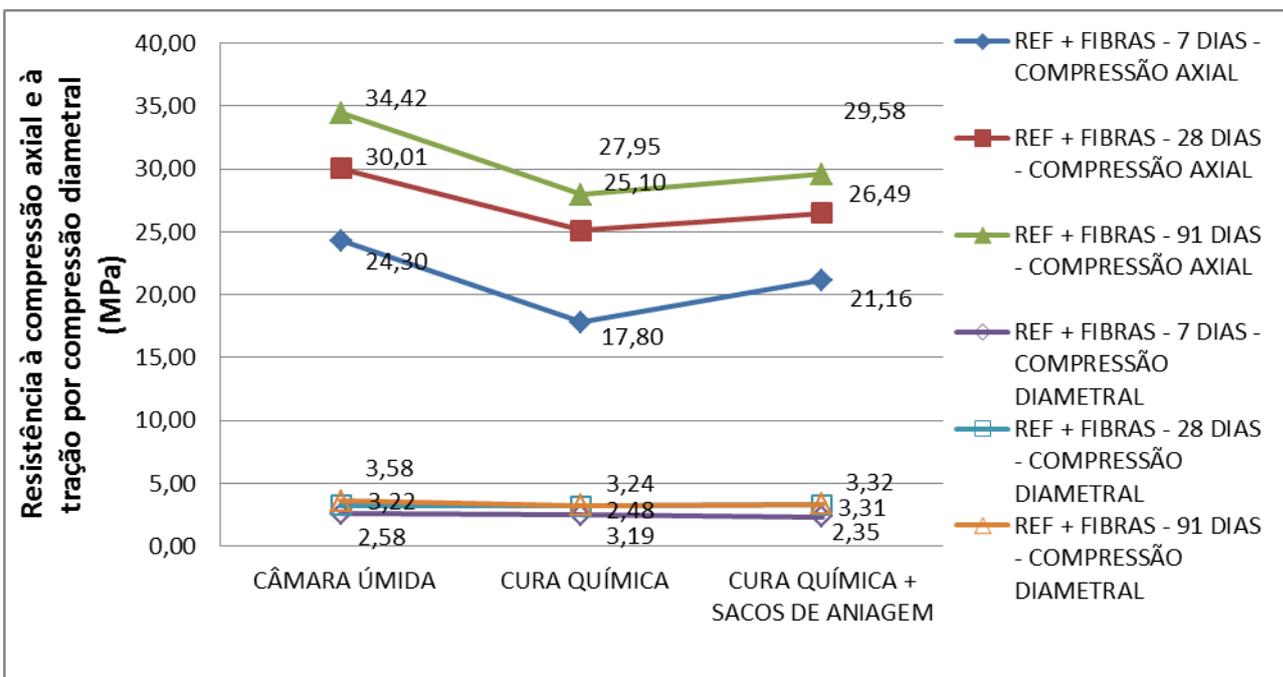


Figura 47 - Correlação entre os resultados da resistência a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral no traço referência mais fibras.

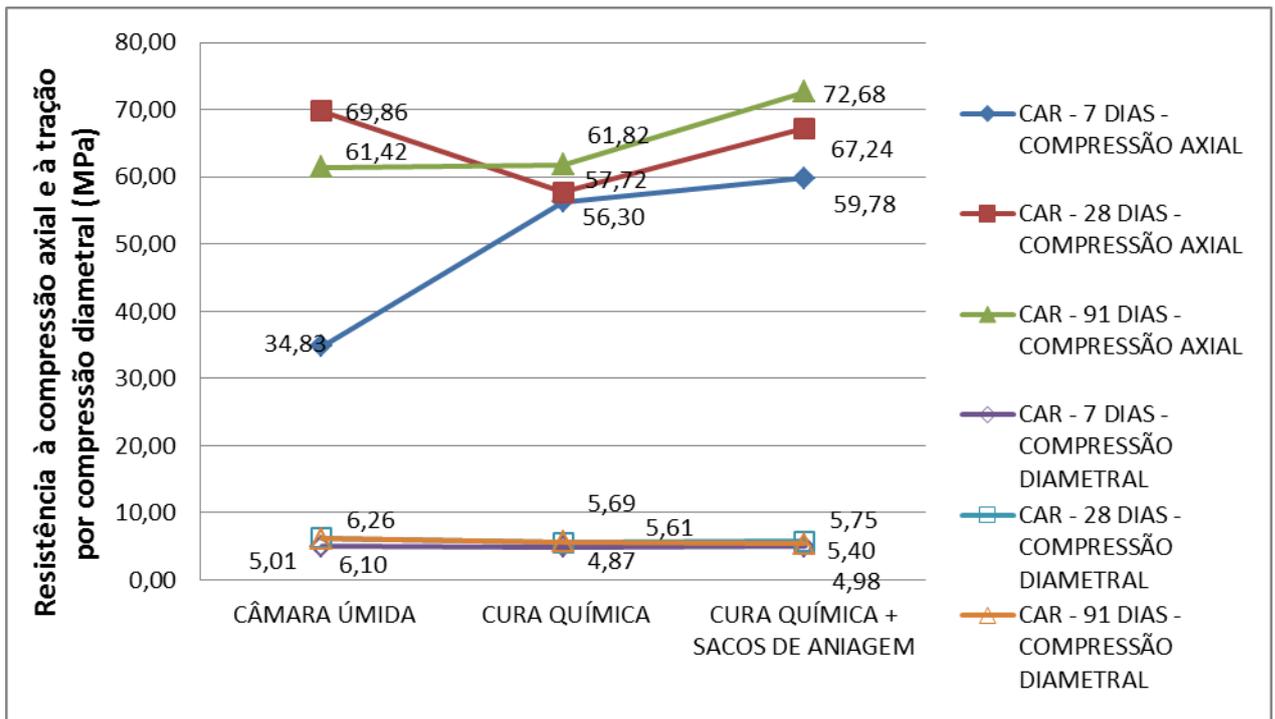


Figura 48 - Correlação entre os resultados da resistência a resistência à compressão axial e a resistência a resistência à tração por compressão diametral no traço do concreto de alta resistência.

As correlações entre a resistência à resistência à tração por compressão diametral e à resistência à compressão axial são melhores exemplificadas nas Figuras 49, 50 e 51 onde se apresentam os valores obtidos na idade de projeto, aos 28 dias, para todos os concretos, métodos de cura e idades estudados.

Para o concreto referência a razão entre a resistência à resistência à tração por compressão diametral pela resistência à resistência à compressão axial ficou entre 9,4 a 10,4%, aos 28 dias, enquanto para o concreto referência mais fibras esta relação variou entre 10,7 e 12,5% e para o concreto de alta resistência a variação foi de 8,6 a 11,2%, mostrando mais uma vez que os resultados de resistência à compressão axial encontrados em conjunto com os resultados da resistência à tração por compressão diametral apresentam correlações decrescentes, com o aumento da resistência a resistência à compressão axial.

Segundo a *American Society for Testing of Materials* (ASTM), a resistência à tração medida pelo ensaio brasileiro (ou *split test*) é geralmente maior do que a resistência à tração direta do material (ASTM, 2004).

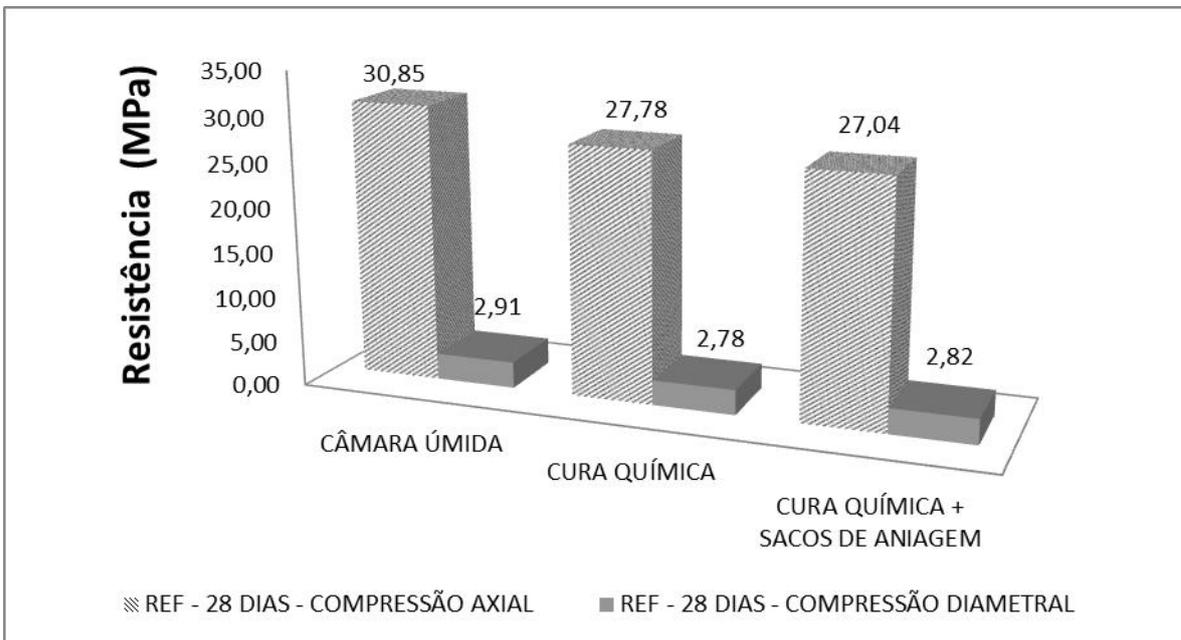


Figura 49 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, obtidos para o concreto referência aos 28 dias.

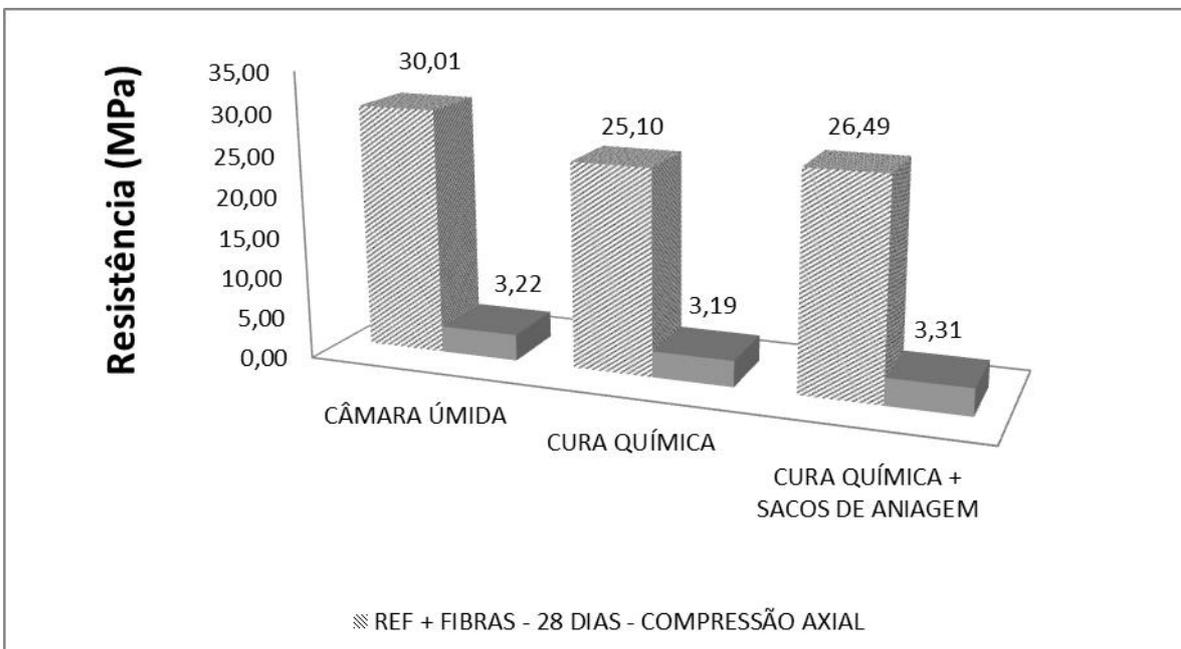


Figura 50 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, obtidos para o concreto referência aos 28 dias.

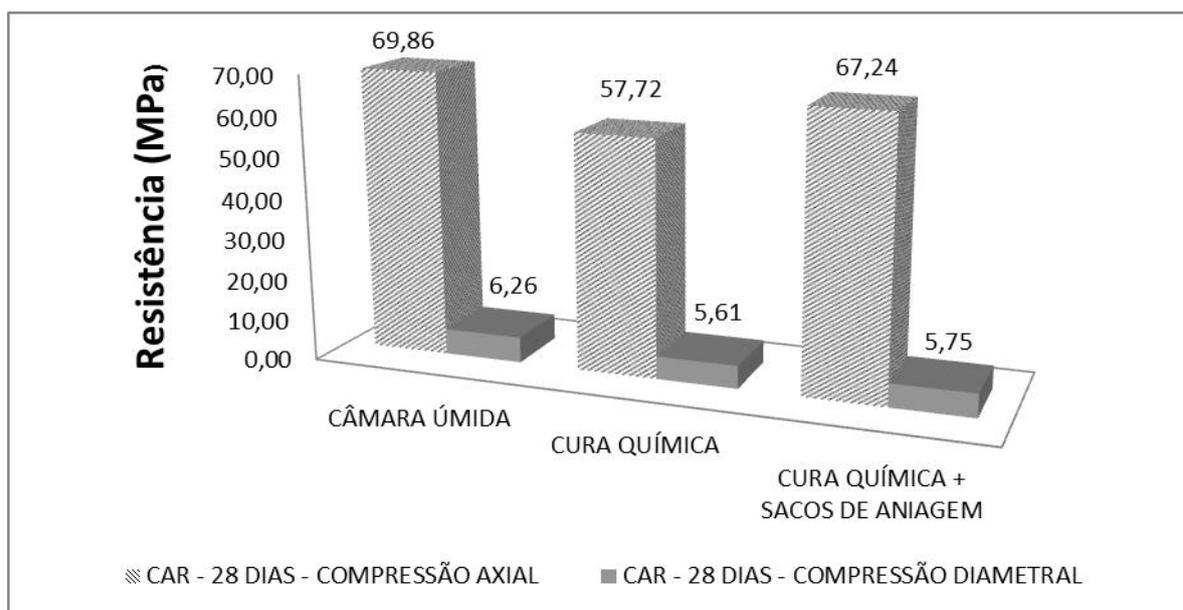


Figura 51 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, obtidos para o concreto referência aos 28 dias.

#### 4.5 Análise dos gráficos Carga x Deslocamento

Para a obtenção dos resultados do módulo de elasticidade estático nos traços estudados se fez necessário uma primeira análise dos gráficos carga *versus* deslocamento obtidos a partir da aquisição de dados pelo programa Spyder com auxílio de um LVDT, onde utilizou-se da medida de flecha no centro da viga, a partir do ensaio de tração na flexão por meio da analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica por Timoshenko/Gere.

As Figuras 52 a 60 foram encontrados a partir destas medições e através deles se estabeleceu o carregamento máximo em cada curva dentro do trecho linear para aplicação das equações para obtenção do módulo de elasticidade para cada corpo de prova, sendo que este valor variou entre 65 a 80% da carga de ruptura.

Tendo em vista que em cada concreto, método de cura e idade de ensaio apresentam microestruturas distintas e conseqüentemente gráficos com curvas carga *versus* deslocamento diferentes. Adotou-se os valores de carregamento máximo conforme cada curva, porém optou-se em fixar carregamento mínimo para todas as amostras em 5%, sendo esta constatação

válida para obtenção do módulo de elasticidade estático através da dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere (1994).

Assim, conforme os gráficos, foi possível verificar que o carregamento máximo para o concreto referência em câmara úmida foi de 70%, em todas as idades, já para a cura química seguida ou não de sacos de aniagem o valor foi de 75%, sendo realizada esta mesma análise para os demais concretos, métodos de cura e idades estudados.

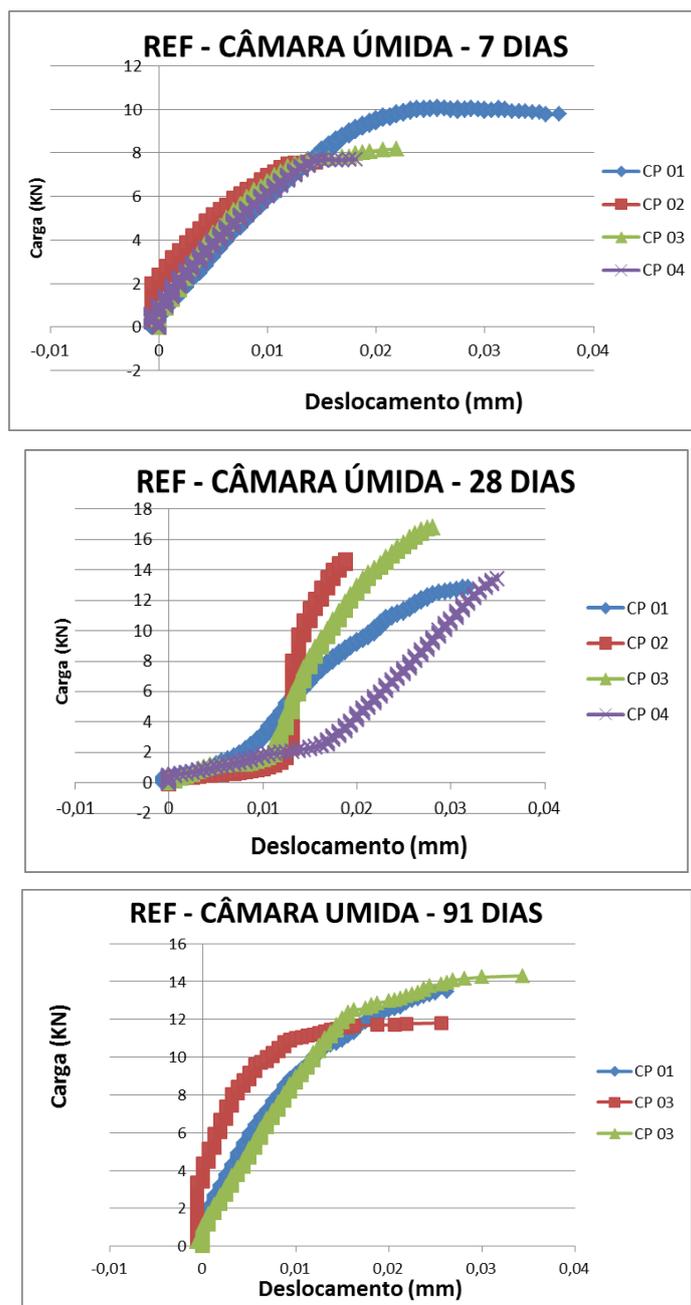


Figura 52 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência com permanência em câmara úmida, às idades de 7, 28 e 91 dias.

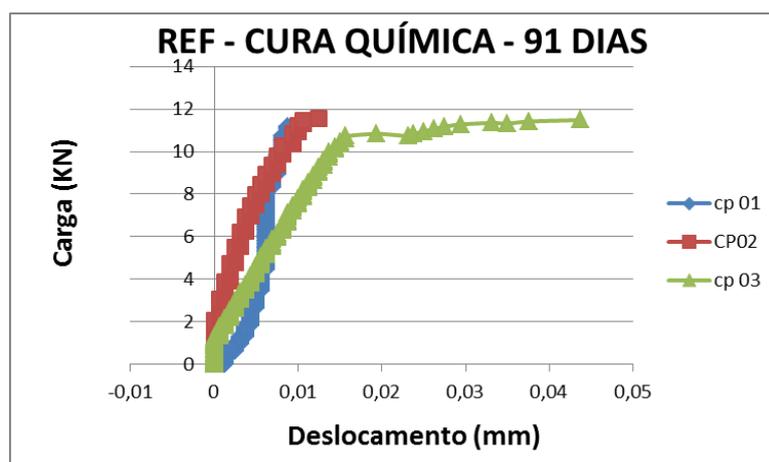
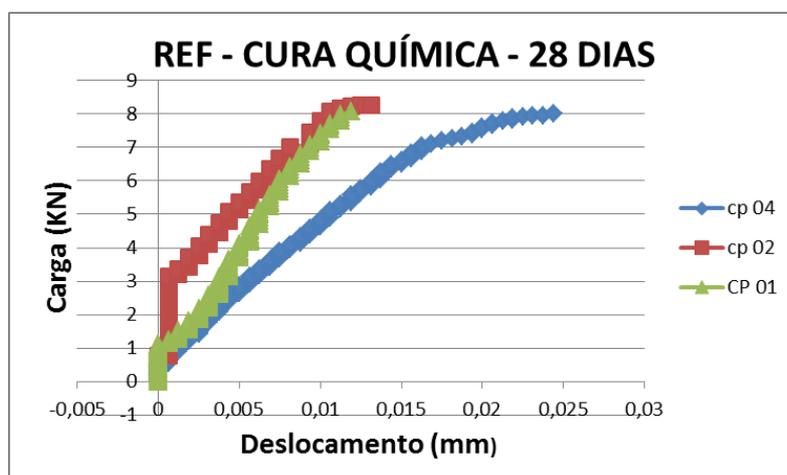
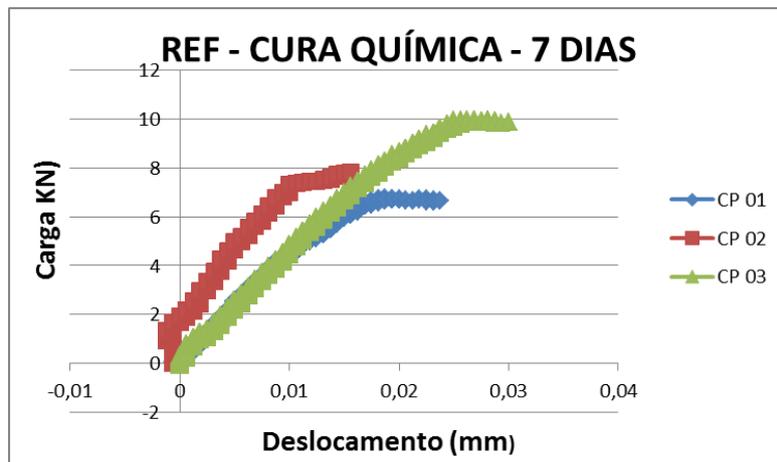


Figura 53 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência com permanência em cura química às idades de 7, 28 e 91 dias.

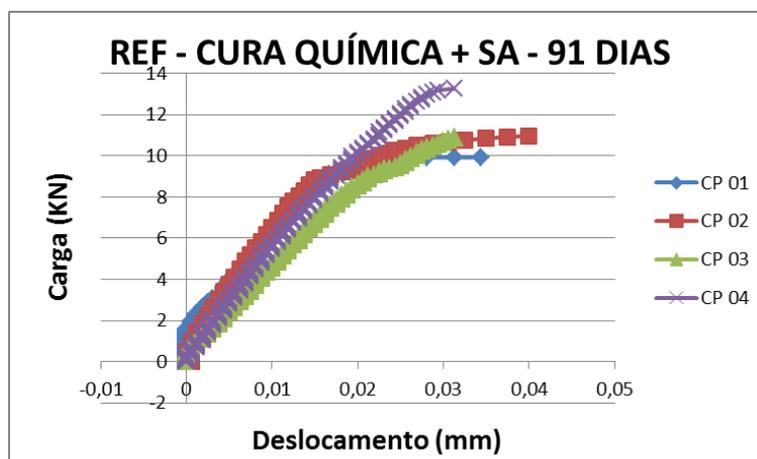
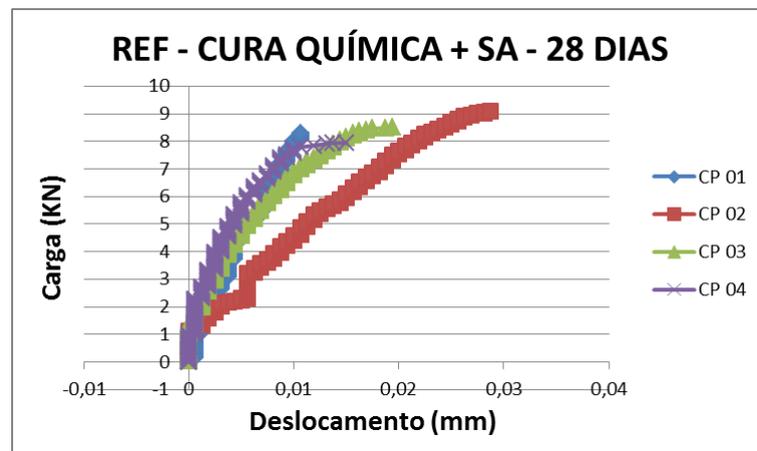
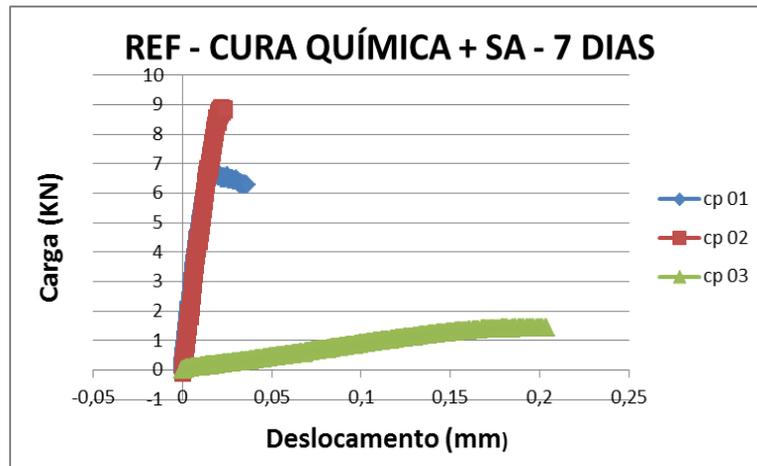


Figura 54 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência com permanência em cura química mais sacos de aniagem às idades de 7, 28 e 91 dias.

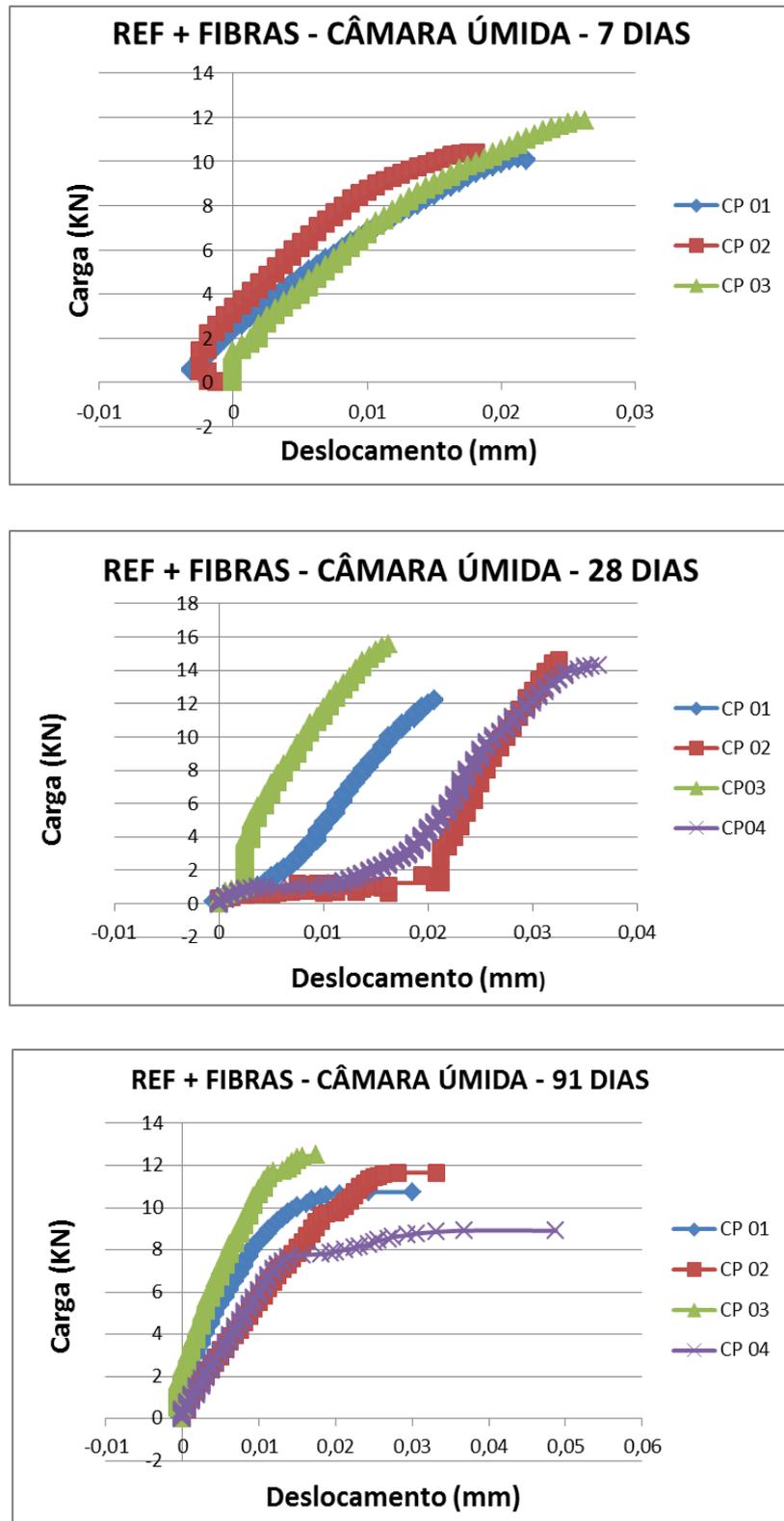


Figura 55 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência mais fibras com permanência em câmara úmida às idades de 7, 28 e 91 dias.

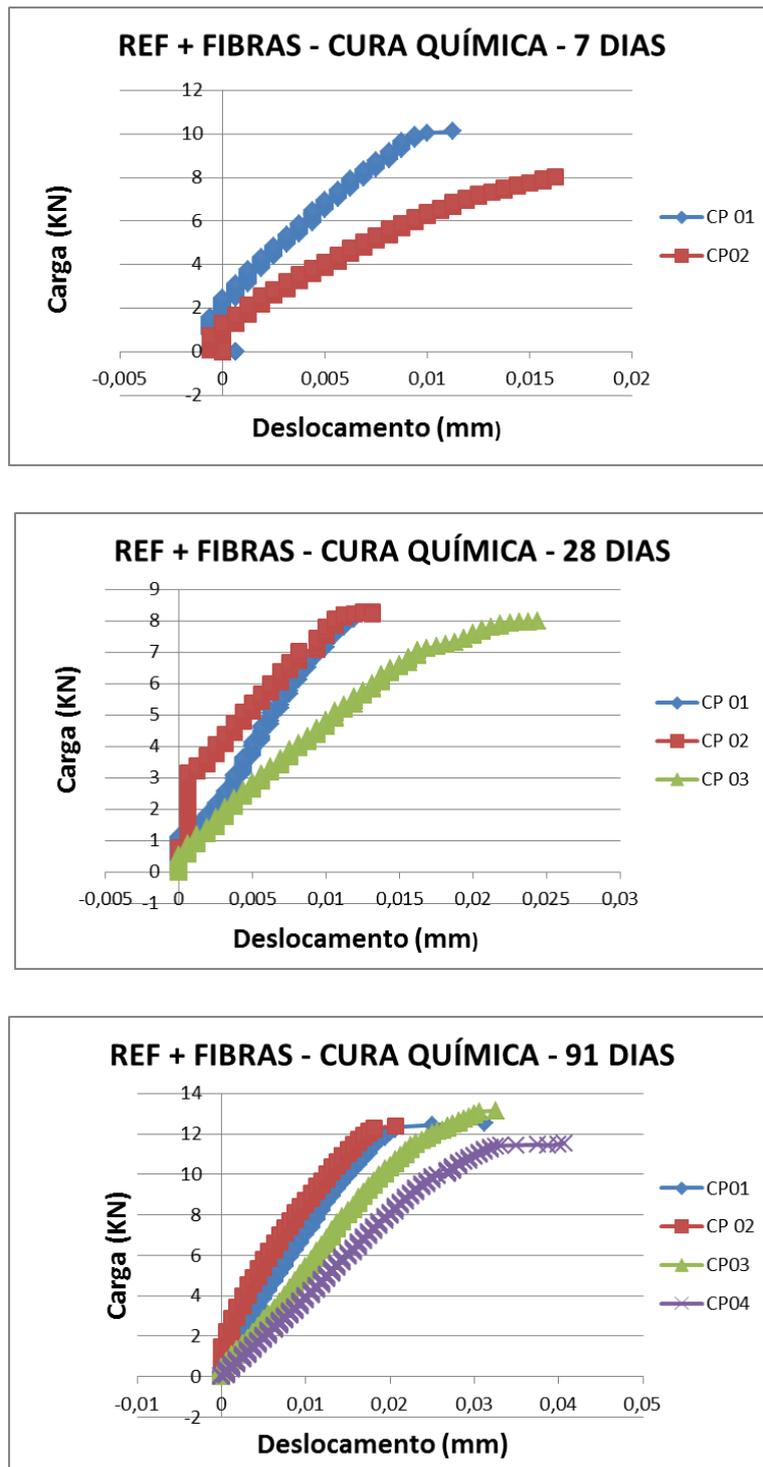


Figura 56 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência mais fibras com permanência em cura química, às idades de 7, 28 e 91 dias.

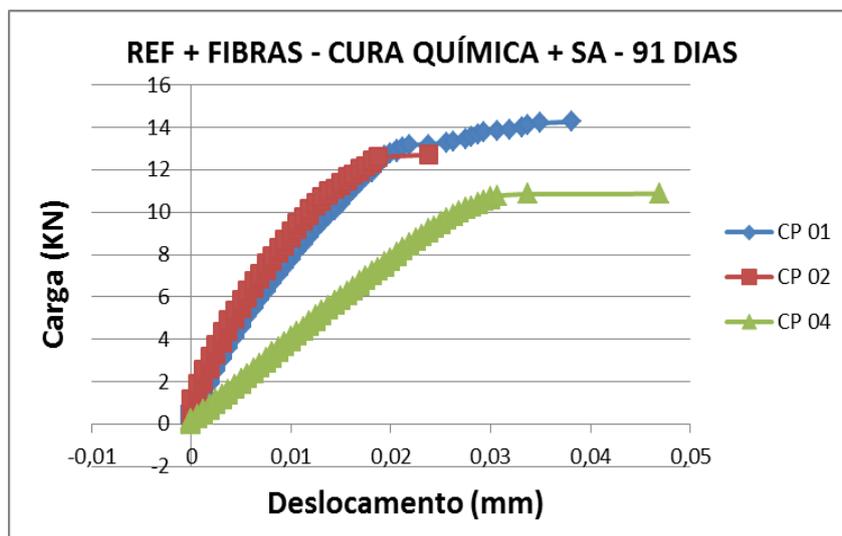
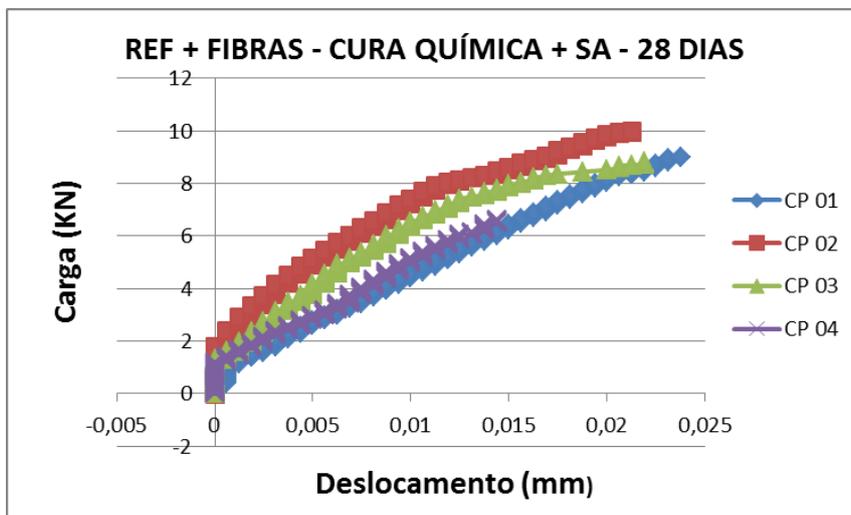
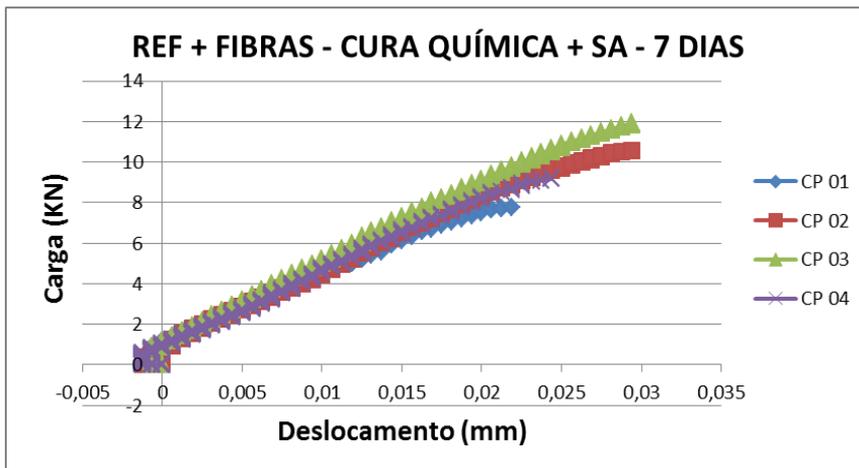


Figura 57 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço referência mais fibras com permanência em cura química mais sacos de aniagem às idades de 7, 28 e 91 dias.

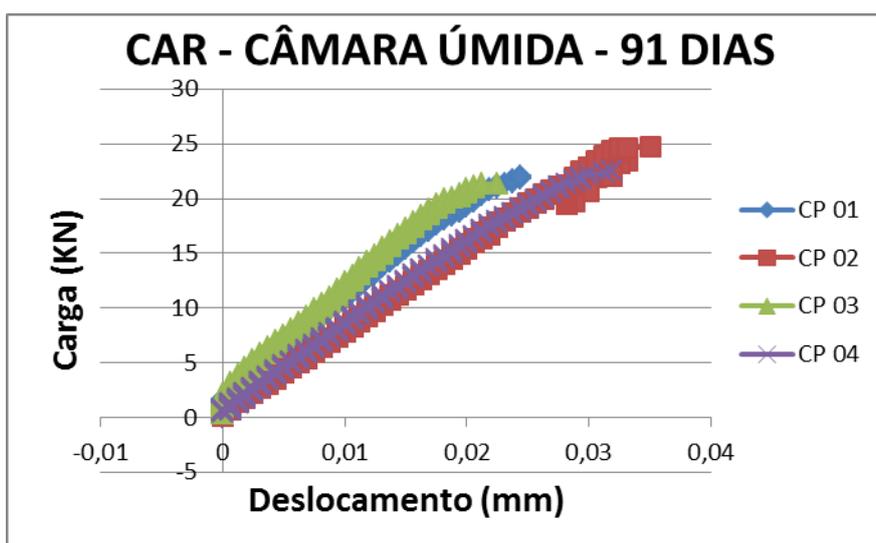
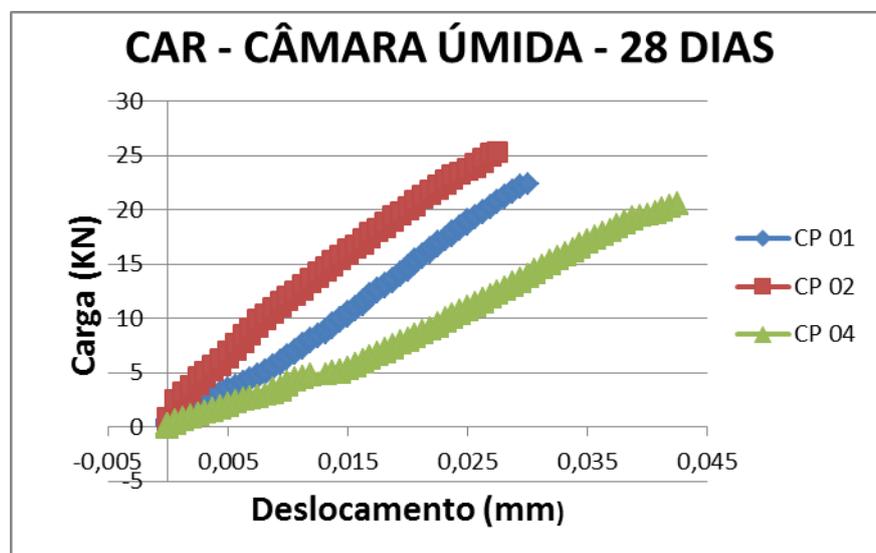
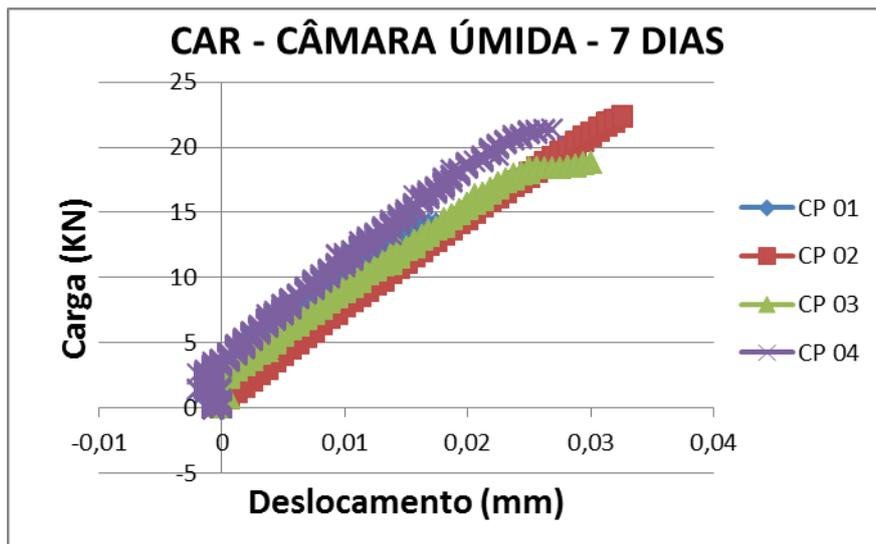


Figura 58 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traçado concreto de alta resistência com permanência em câmara úmida às idades de 7, 28 e 91 dias.

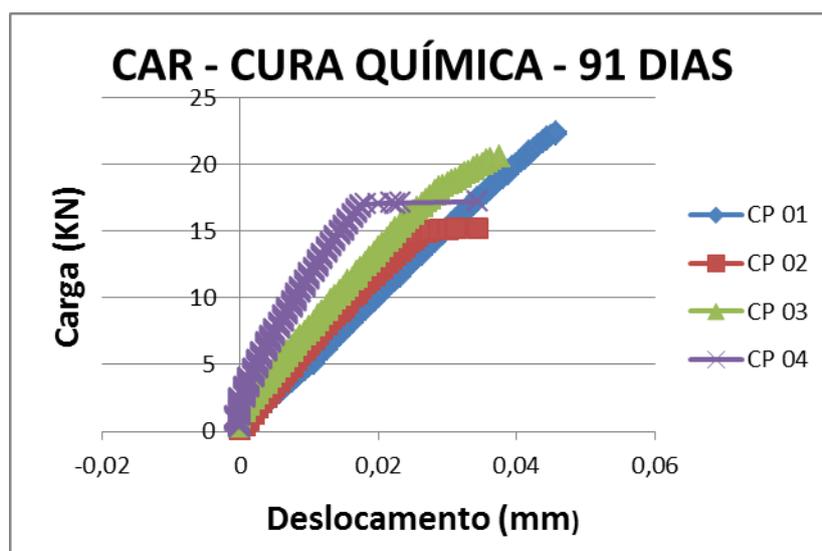
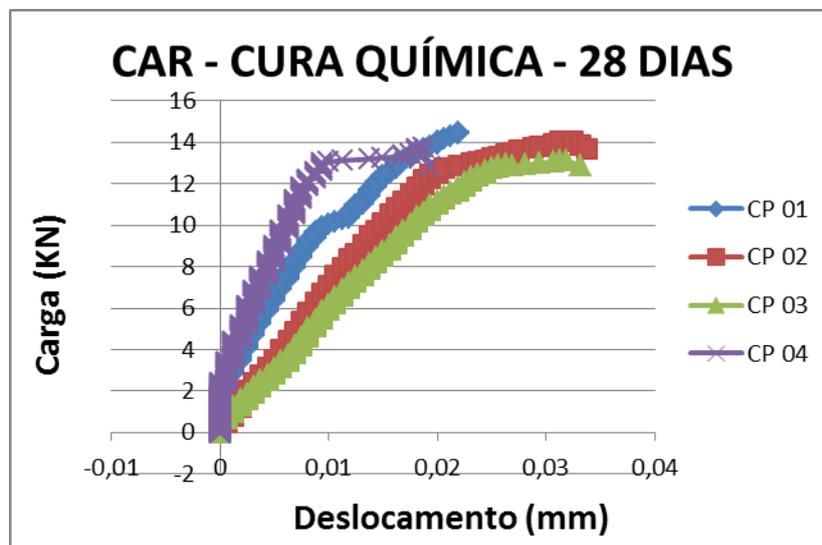
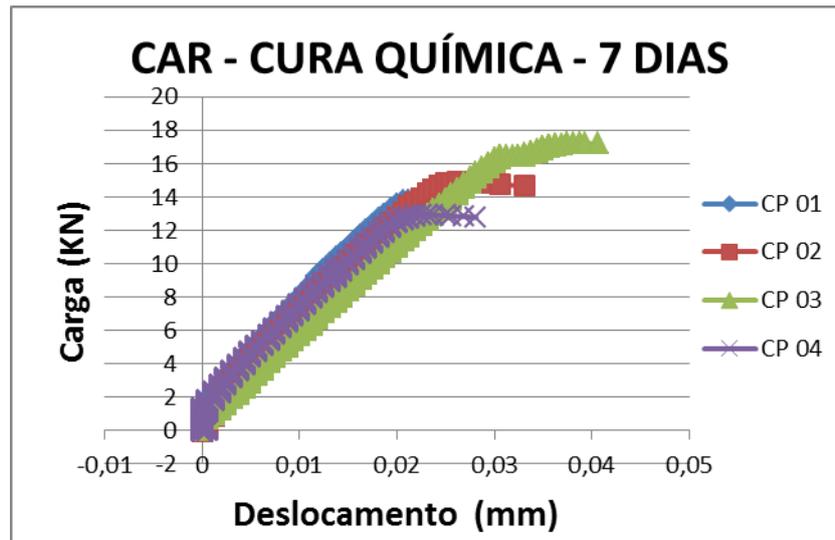


Figura 59 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço de concreto de alta resistência com permanência em cura química às idades de 7, 28 e 91 dias.

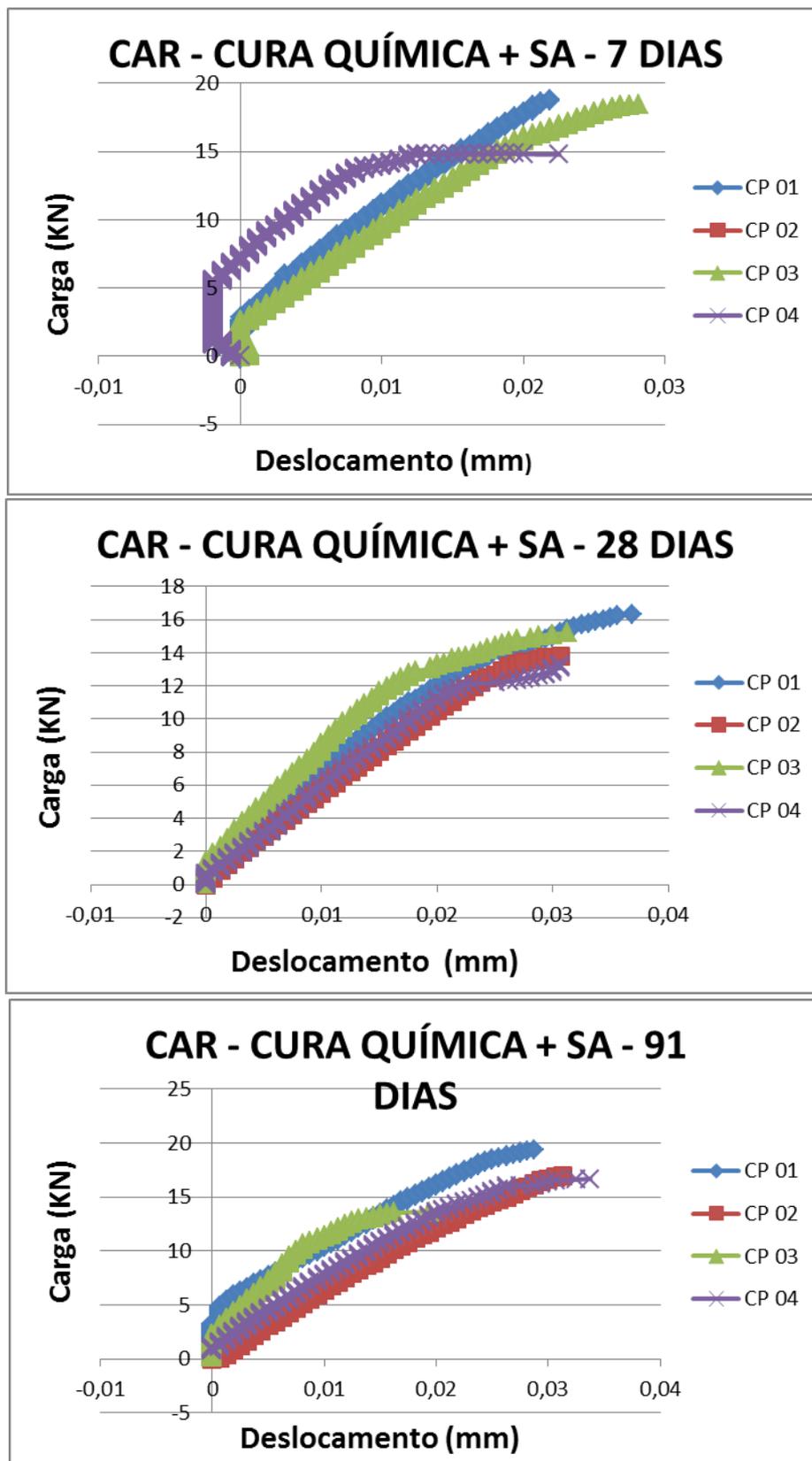


Figura 60 - Análises das curvas carga x deslocamento obtidas para o traço de concreto de alta resistência com permanência em cura química mais sacos de aniagem às idades de 7, 28 e 91 dias.

## 4.6 Módulo de elasticidade estático

Para a obtenção dos resultados do módulo de elasticidade estático, foram realizados ensaios à tração na flexão, em vigotas prismáticas, seguindo a ABNT NM 55:1996, para todos os concretos, métodos de cura e idades de ensaio estudados, sendo estes obtidos pela analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere.

Todos os valores obtidos são provenientes dos gráficos carga *versus* deslocamento, onde se obteve o carregamento máximo e o carregamento mínimo da carga de ruptura, com os seus respectivos deslocamentos (ficha), para cada concreto analisado, variando a porcentagem da carga de ruptura conforme cada gráfico.

### 4.6.1 Análise do módulo de elasticidade estático pela analogia de Möhr

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático, pela analogia de Möhr, e à tração na flexão, segundo a ABNT NM 55:1996, estão sendo apresentados na Tabela 26 onde se visualiza a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados para todos os concretos estudados, bem como, para as curas aplicadas, idades e o número de amostras por ensaio.

Para obtenção das médias foram desconsiderados os valores que apresentaram elevada dispersão quando comparados com os demais.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de tração na flexão e módulo de elasticidade estático pela analogia de Möhr.

TRAÇÃO NA FLEXÃO - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - ANALOGIA DE MÖHR									
TRAÇÃO IDADE	REF 7 DIAS			REF 28 DIAS			REF 91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	43,56	44,92	28,30	38,49	49,13	44,90	49,70	55,98	34,32
Sd	4,37	0,10	0,24	0,48	3,19	2,43	0,77	4,73	1,71
CV	10,03	0,21	0,85	1,24	6,49	5,40	1,54	8,45	4,99
n	3	3	2	3	3	3	3	3	2
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	2,64	2,50	2,43	4,26	2,36	2,48	4,07	3,27	3,56
Sd	0,28	0,45	0,00	0,10	0,04	0,02	0,07	0,09	0,51
CV	8%	20%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	26%
TRAÇÃO IDADE	REF + FIBRAS 7 DIAS			REF + FIBRAS 28 DIAS			REF + FIBRAS 91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	45,79	52,30	25,01	49,13	50,33	41,10	58,67	45,51	52,29
Sd	9,35	15,35	0,67	14,81	0,01	0,01	8,56	0,01	0,03
CV	20,41	29,35	2,66	30,14	0,02	0,02	14,60	0,02	0,06
n	3	3	2	4	4	3	2	2	3
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	3,20	2,61	3,01	3,86	2,37	2,66	3,40	3,77	3,88
Sd	0,21	0,49	0,39	0,32	0,07	0,03	0,24	0,21	0,46
CV	4%	24%	15%	10%	1%	0%	6%	4%	21%
TRAÇÃO IDADE	CAR 7 DIAS			CAR 28 DIAS			CAR 91 DIAS		
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	57,26	41,01	52,76	57,72	54,93	45,97	64,57	65,21	64,94
Sd	1,82	0,03	4,05	0,03	0,05	0,01	0,02	0,02	13,64
CV	3,17	0,07	7,68	0,05	0,09	0,02	0,03	0,03	21,00
n	3	3	2	3	3	3	3	3	2
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	5,93	4,51	5,46	6,79	4,04	5,06	6,65	5,79	5,34
Sd	0,36	0,61	0,18	0,17	0,33	0,22	0,11	0,62	0,54
CV	13%	37%	3%	3%	11%	5%	1%	39%	30%

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; n= número de amostras

Através das Figuras 61, 62 e 63 é possível observar os valores obtidos para cada concreto estudado, sendo este, referência, referência mais fibras e de alta resistência, respectivamente.

Na Figura 61, nota-se que os valores do módulo de elasticidade, para o concreto referência, cresceram com o aumento das idades de ensaio para cura em câmara úmida e cura química, sendo que os valores mais elevados, aos 7 dias, ocorreram para cura química. Porém aos 28 e 91 dias os resultados para cura química, se mostram superiores aos resultados encontrados em câmara úmida, indicando que, apesar da cura em câmara úmida apresentar maior resistência à tração na flexão, a flecha obtida foi superior, o que resultou em menores módulos de elasticidades.

Assim, observa-se que o maior valor para o módulo de elasticidade ocorreu na cura química, com valor de 55,98 GPa, aos 91 dias, porém verifica-se uma queda acentuada no módulo de elasticidade para o concreto referência, aos 91 dias, curado com cura química seguida da colocação de sacos de aniagem, mostrando que este com o aumento do período de cura não apresentou um ganho de rigidez na estrutura, pois apesar da colocação dos sacos de aniagem após a aplicação da cura química, pelo período de 7 dias, não foram suficientes para gerar uma microestrutura mais compacta e densa, com o aumento da idade de ensaio, diminuindo assim a sua rigidez, aumentando o deslocamento (flecha) e conseqüentemente reduzindo o módulo de elasticidade.

Ainda pode-se observar que a grande variação do módulo de elasticidade possa estar associada com a fabricação da mistura e posterior moldagem ou ainda a problemas de ensaio, tendo em vista, a grande dispersão encontrada nos corpos de prova.

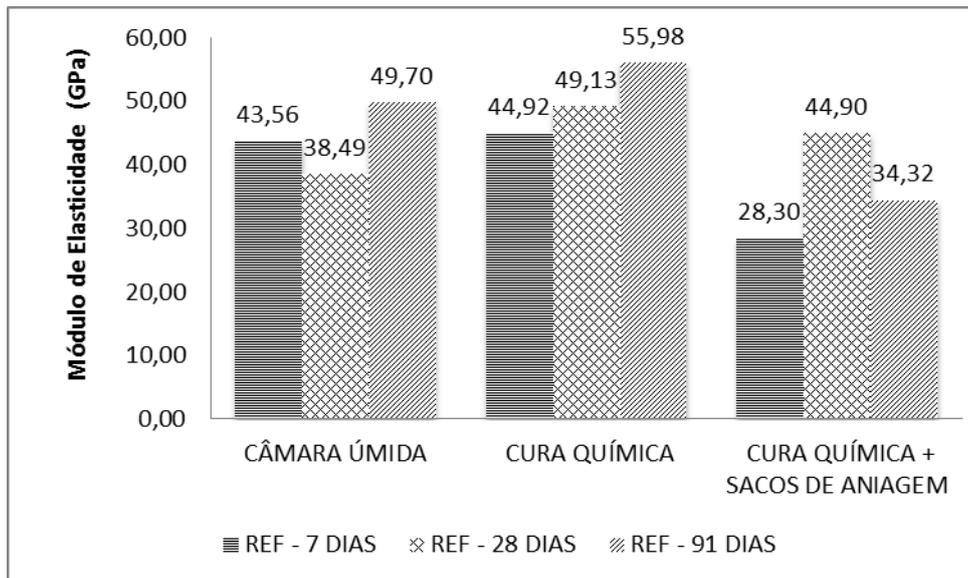


Figura 61 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr para o concreto referência.

Na Figura 62, evidencia-se que a cura em câmara úmida obteve os melhores resultados aos 91 dias e verificou-se que a introdução das fibras de polipropileno no concreto (REF + FIBRAS) gerou um aumento nos módulos de elasticidade, se comparados com o concreto referência sem fibras, nos corpos de prova ensaiados e curados em câmara úmida e cura química, aos 7 e 28 dias, indicando assim, que as fibras tem influência na estrutura do concreto, a fim de, mantê-la mais fechada, reduzindo os valores de flecha, nas idades iniciais, principalmente na cura em câmara úmida e cura química, porém para cura química seguida de sacos aniagem houve elevação do módulo de elasticidade com o aumento do período de cura, conforme era previsto.

Na Figura 63, apresentam-se os resultados para o concreto de alta resistência que por sua vez obteve valores para o módulo de elasticidade estático mais elevados que os demais concretos estudados, referência com ou sem adição de fibras para todas as idades, o que estaria indicando que, o CAR além de apresentar as maiores resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade se altera significativamente, principalmente em idades maiores. O que pode indicar que, em idades maiores, 28 e 91 dias de cura, a

microestrutura do CAR se mostra mais densa e com maior compacidade que os demais concretos, sendo assim, mais rígido.

Em idades iniciais (7 dias), para todos os métodos de cura, observa-se que o módulo de elasticidade do CAR é superior aos demais concretos; mais uma vez mostrando ser o CAR mais sensível aos efeitos de sorção (desorção e absorção) em idades maiores pois é um material muito mais frágil com deformações elásticas muito pequenas.

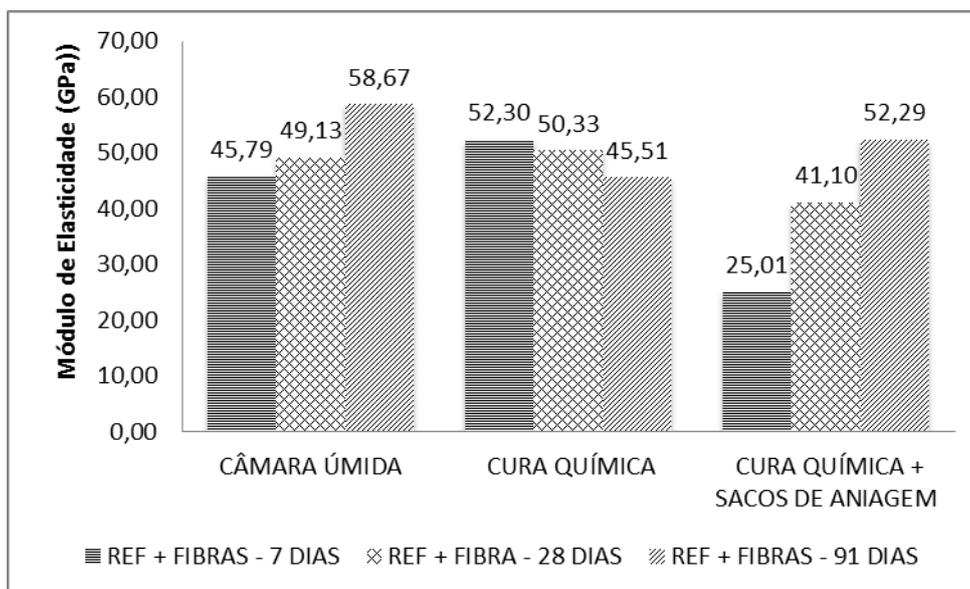


Figura 62 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr para o concreto referência com fibras.

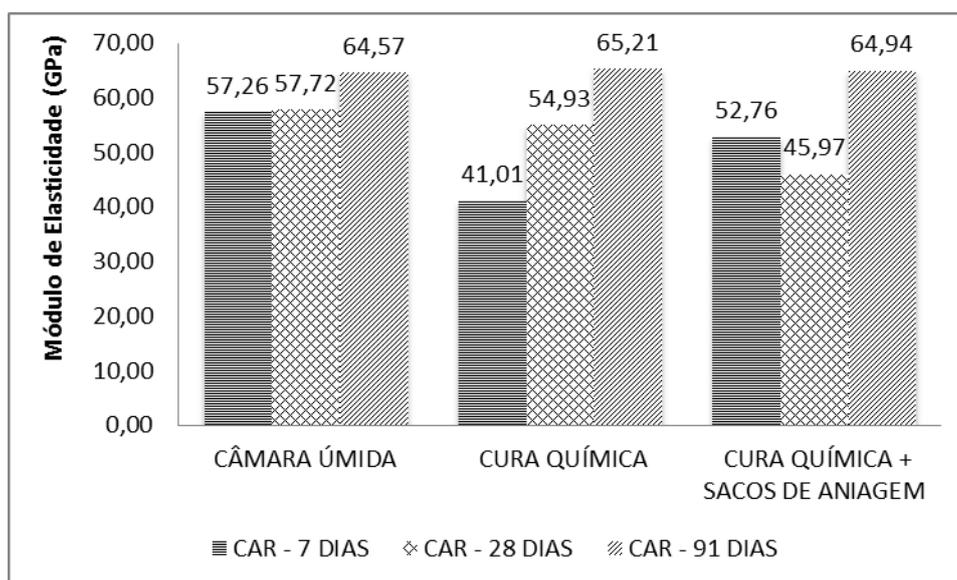


Figura 63 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr para o concreto de alta resistência.

Verificando os coeficientes de variação dos concretos estudados, nota-se que os valores foram elevados, principalmente em misturas como CAR, ensaiados aos 91 dias, com coeficiente de variação de 29%. Conforme Batezini (2013) a elevada dispersão pode estar associada a desajustes do LVDT durante a execução dos ensaios, onde pequenos deslocamentos, nesse aparato poderiam, em tese, alterar sensivelmente o resultado, sendo assim, julga-se necessário o emprego de dois LVDTs, que poderiam sanar estes problemas.

#### 4.6.2 Análise do módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático para a dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere e tração na flexão pela ABNT NM 55:1996, são apresentados na Tabela 27, onde pode-se verificar a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados obtidos para todos os concretos estudados, bem como, para as curas aplicadas, idades e número de amostras por ensaio.

Observa-se que os valores obtidos pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, considerando uma distribuição linear de tensões, são próximos, indicando que tanto pela dedução da equação de linha elástica por Timoshenko/Gere, como pela analogia de Möhr, a partir do ensaio de tração na flexão em vigotas prismáticas, os valores são representativos e ao realizar a dedução das duas equações chega-se a conclusão que estas equações são iguais, quando se tem os mesmos parâmetros.

Para obtenção das médias foram desconsiderados os valores que apresentaram elevada dispersão quando comparados com os demais.

Também se observar que a grande variação do módulo de elasticidade possa estar associada com a fabricação da mistura e posterior moldagem ou ainda a problemas de ensaio, tendo em vista, a grande dispersão encontrada nos corpos de prova que foram moldados em altas temperaturas, com baixa umidade relativa do ar, no verão da cidade de Santa Maria/RS.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de tração na flexão e módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere.

TRAÇÃO NA FLEXÃO - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - DEDUÇÃO DA EQ. DA LINHA ELÁSTICA (TIMOSHENKO/GERE)									
TRAÇÃO	REF 7 DIAS			REF 28 DIAS			REF 91 DIAS		
IDADE									
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	43,00	41,92	28,67	51,66	48,45	48,23	46,15	56,64	32,80
Sd	2,28	0,00	0,15	25,91	0,00	7,20	1,15	17,70	0,82
CV	5,29	0,00	0,52	50,16	0,02	14,93	2,48	31,25	2,50
n	3	3	2	3	4	3	2	2	3
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	2,64	2,50	2,43	4,26	2,36	2,48	4,07	3,27	3,56
Sd	0,28	0,45	0,00	0,10	0,04	0,02	0,07	0,09	0,51
CV	8%	20%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	26%
TRAÇÃO	REF + FIBRAS 7 DIAS			REF + FIBRAS 28 DIAS			REF + FIBRAS 91 DIAS		
IDADE									
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	42,73	34,64	24,44	47,96	43,64	36,09	54,80	42,67	43,07
Sd	8,72	0,01	0,01	14,02	3,54	2,30	8,00	0,01	5,78
CV	20,41	0,03	0,04	29,24	8,11	6,38	14,60	0,02	13,42
n	3	3	2	4	3	3	3	2	3
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	3,20	2,61	3,01	3,86	2,37	2,66	3,40	3,77	3,88
Sd	0,21	0,49	0,39	0,32	0,07	0,03	0,24	0,21	0,46
CV	4%	24%	15%	10%	1%	0%	6%	4%	21%
TRAÇÃO	CAR 7 DIAS			CAR 28 DIAS			CAR 91 DIAS		
IDADE									
MÉTODO DE CURA	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM	CÂMARA ÚMIDA	CURA QUÍMICA	CURA QUÍMICA + SACOS DE ANIAGEM
	E (GPa)			E (GPa)			E (GPa)		
MEDIA	53,76	37,29	48,93	55,89	44,07	42,64	60,63	64,34	60,23
Sd	1,70	0,78	3,76	0,00	6,94	0,01	0,02	0,03	12,64
CV	3,17	2,10	7,68	0,00	15,74	0,02	0,03	0,05	20,99
n	3	3	3	3	2	3	3	3	2
	fct,f (MPa)			fct,f (MPa)			fct,f (MPa)		
MEDIA	5,93	4,51	5,46	6,79	4,04	5,06	6,65	5,79	5,34
Sd	0,36	0,61	0,18	0,17	0,33	0,22	0,11	0,62	0,54
CV	13%	37%	3%	3%	11%	5%	1%	39%	30%

Sd = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; n = número de amostras

Através das Figuras 64, 65 e 66 é possível observar os valores obtidos para cada concreto estudado, sendo este, referência, referência mais fibras e de alta resistência, respectivamente.

Na Figura 64, nota-se que os valores do módulo de elasticidade, para o concreto referência também cresceram com o aumento das idades de ensaio para cura em câmara úmida e cura química, sendo que os valores mais elevados, aos 7 e 28 dias, foram para cura em câmara úmida.

Ainda observa-se que o maior valor para o módulo de elasticidade ocorreu na cura química, com valor de 56,64 GPa, aos 91 dias, entretanto este ganho de resistência não é pronunciado para a cura química seguida da colocação de sacos de aniagem, que apresentou um declínio de 32% em seu módulo de elasticidade aos 91 dias de cura em relação aos resultados de 28 dias.

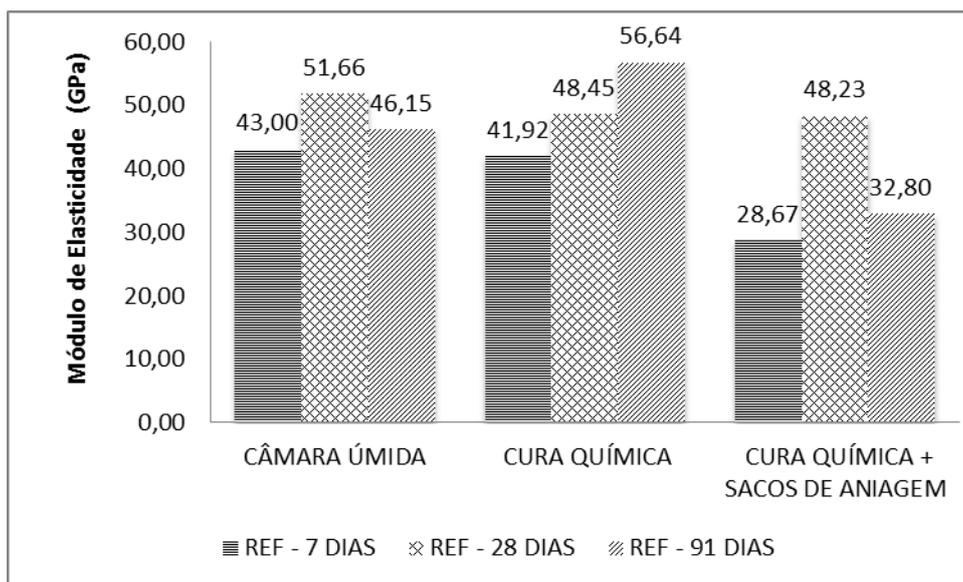


Figura 64 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere para o concreto referência.

Na Figura 65, verifica-se que a cura em câmara úmida, assim como no módulo de elasticidade pela analogia de Möhr, obteve os melhores resultados para 7 e 28 dias.

A introdução das fibras de polipropileno no concreto referência gerou um aumento nos módulos de elasticidade dos corpos de prova ensaiados, porém apenas pronunciada na câmara úmida e na cura química nas primeiras idades.

Segundo Neville (1997), as fibras são adições no concreto, e assim, proporcionam uma restrição às deformações por retração autógena. Para as primeiras idades, o concreto está em processo de desenvolvimento de suas propriedades, e a sua resistência é baixa, assim como a sua rigidez.

Na Figura 66, apresentam-se os resultados para o concreto de alta resistência onde se verifica que os melhores resultados foram em cura em câmara úmida, seguida da cura química e cura química com sacos de aniagem.

Com o aumento do período de cura houve elevação dos módulos de elasticidade, sendo mais acentuado na cura química seguida ou não da colocação de sacos de aniagem.

Observa-se que a cura preconizada por norma (câmara úmida) para todos os concretos analisados, sempre se apresentou com os valores mais elevados, principalmente nas primeiras idades, para o módulo de elasticidade, enquanto os métodos de cura, geralmente utilizados em pavimentos rodoviários e aeroportos, como a cura química seguida ou não de sacos de aniagem, apresentaram valores inferiores, mostrando que a cura em câmara úmida poderá superestimar o módulo de elasticidade de um concreto a ser utilizado em campo, que em tese, poderá ser considerado maléfico para um pavimento que necessitar, pelas suas especificações, ser menos rígido.

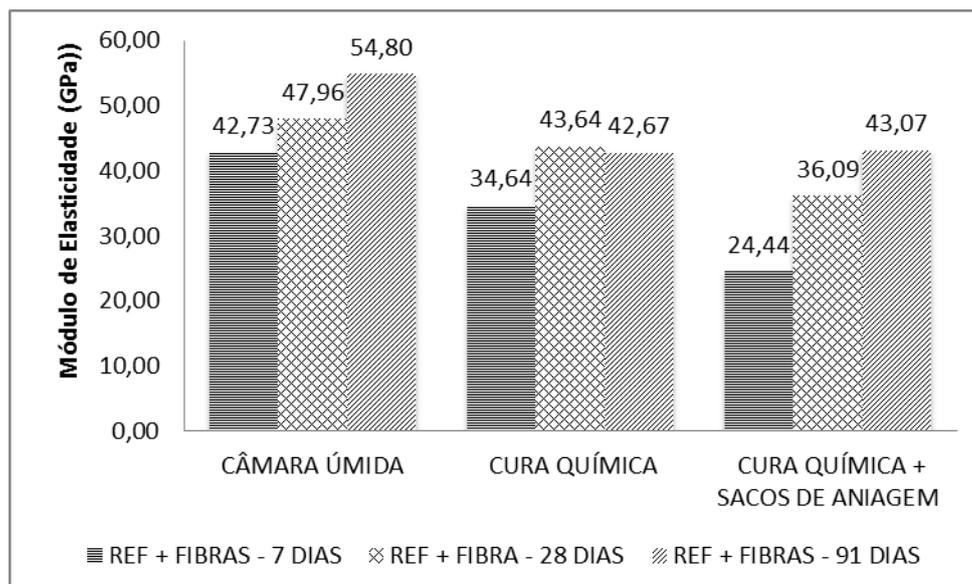


Figura 65 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere para o concreto referência com fibras.

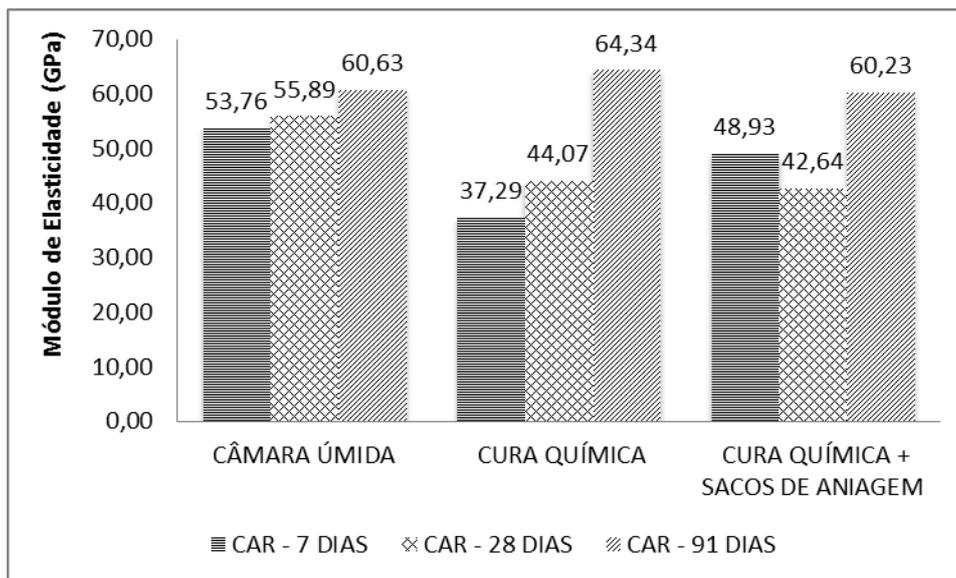


Figura 66 - Valores obtidos para o módulo de elasticidade estático pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere para o concreto de alta resistência.

Os coeficientes de variação dos concretos estudados para o módulo de elasticidade segundo Timoshenko/Gere, também foram elevados para algumas amostras, variando entre 2 a 50%, sendo que houve grandes variações em todas as idades, variando conforme o método de cura aplicado.

Batezini (2013) realizou ensaios em concretos permeáveis, obteve-se resistência média à tração na flexão de 2,00 MPa e módulo de elasticidade estático médio de 15 GPa, onde se verificou grandes dispersões nos resultados, porém com valores, para as diferentes misturas, muito próximos, sendo que os concretos com maior porosidade apresentaram uma menor resistência à tração na flexão e um menor módulo de elasticidade estático.

#### 4.6.3 Correlação entre os módulos de elasticidade estático

As Figuras 67, 68 e 69 apresentam os valores obtidos pelos dois métodos analisados, pela analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, a fim de elucidar e verificar a dispersão na utilização de cada método para obtenção do módulo de elasticidade estático dos concretos estudados.

Verifica-se que a dispersão dos resultados para todos os concretos foi inferior a 25%, sendo que para o concreto referência mais fibras e de alta resistência, a dispersão não passou de 20%.

Os resultados mostram que, aos 28 dias, idade de projeto, a cura em câmara úmida e cura química continuam apresentando-se com os valores mais elevados para o módulo de elasticidade.

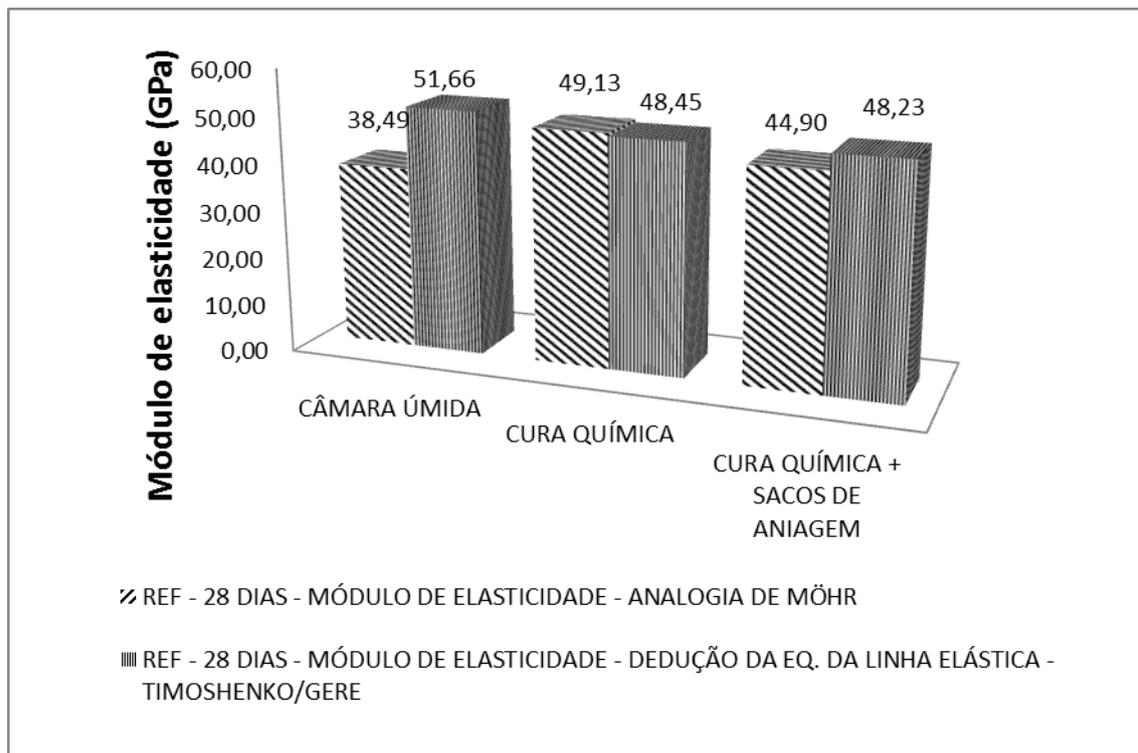


Figura 67 - Módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, para o concreto referência aos 28 dias.

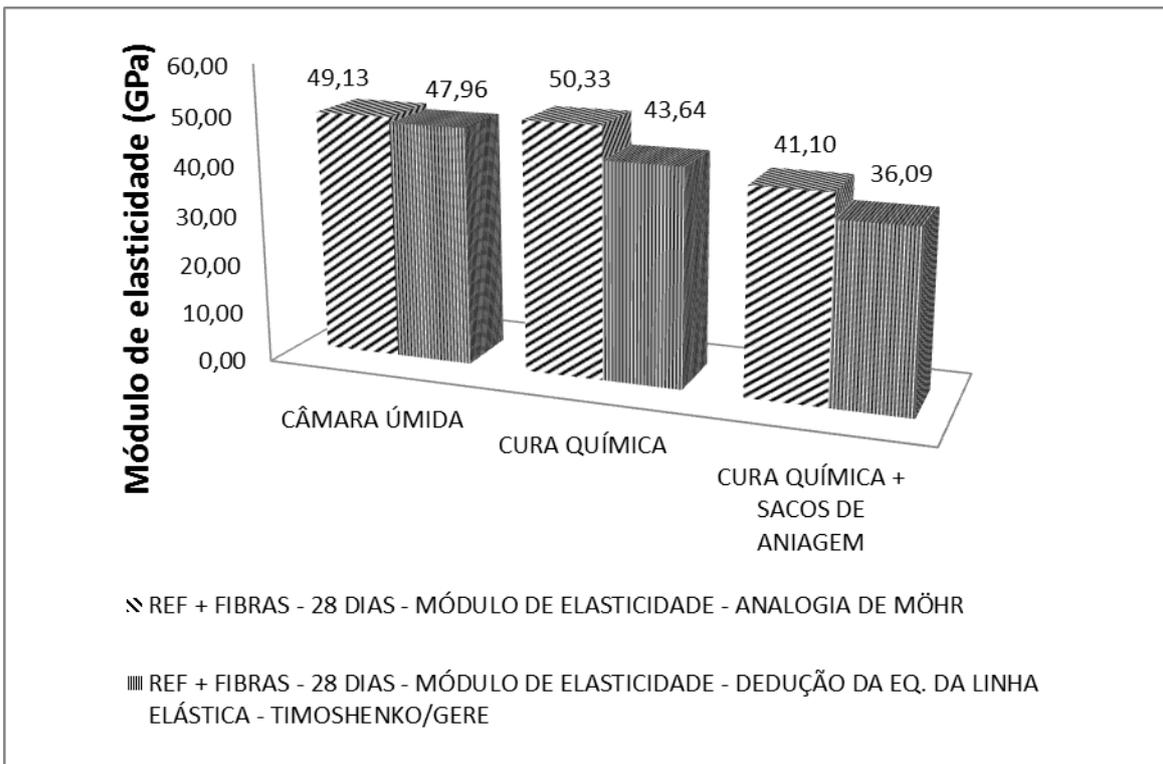


Figura 68 - Módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, para o concreto referência mais fibras aos 28 dias.

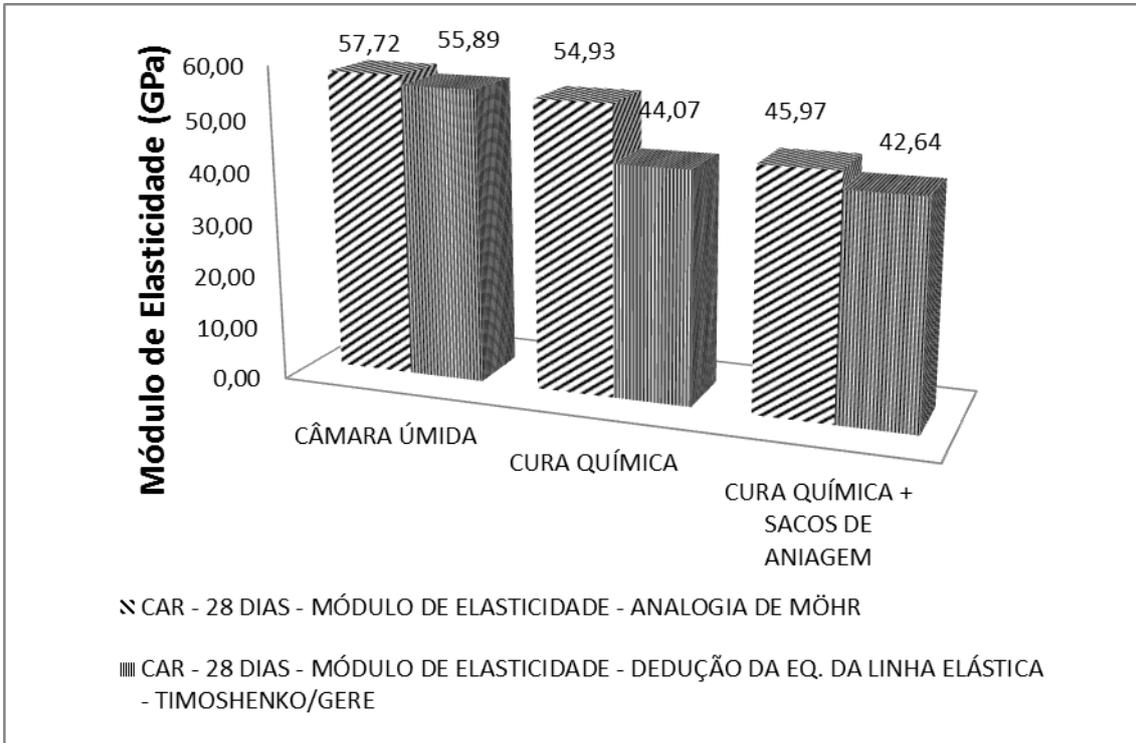


Figura 69 - Módulo de elasticidade estático para analogia de Möhr e pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, para o concreto de alta resistência aos 28 dias.

Nos estudos de Sachet (2012) foram verificados os efeitos da incorporação de agregados fresados em concreto compactado com rolo (CCR), sendo produzidos 6 diferentes misturas: CCR de referência (CCR - 1) com areia industrial e serviu de parâmetro para análise das demais misturas: CCR com areia natural (CCR - 2), CCR com substituição de 100% da areia por agregado fresado (CCR1 - AF), CCR com a substituição de 50% de agregado natural por 50% da fração total do agregado (CCR1 - FT), CCR com a substituição de 100% do pedrisco por fresado (CCR1-PF) e CCR com a substituição de 100% da brita 1 por fresado (CCR1-BF). Os ensaios de tração na flexão mostraram que a incorporação do agregado fresado, em qualquer fração, diminuiu bruscamente a resistência mecânica dos corpos de prova, em relação ao CCR referência. Os resultados do CCR1-FT foram os menos favoráveis, pois combinaram baixos valores de módulo de elasticidade com baixa resistência à tração na flexão, tendo quedas de 50% para os corpos de prova cilíndricos. Nos corpos de prova prismáticos, a mistura que apresentou o pior desempenho nos valores de módulo de elasticidade, foi o CCR1-BF, seguida pela mistura CCR1-FT com quedas de 44% e 39,7%, respectivamente. Também se verificou na pesquisa que os valores obtidos por LVDT são menores que aqueles obtidos pela curva *tensão x deformação*.

Marangon (2011) também calculou o módulo de elasticidade a partir das curvas carga x deslocamento, porém no seu trabalho o módulo de elasticidade calculado foi cíclico residual para cada ciclo, através da mesma expressão utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade aparente (ou seja, relativo ao carregamento estático) pela dedução da equação da linha elástica segundo Timoshenko/Gere onde verificou a incorporação de fibras de aço em concretos autoadensáveis contendo agregados graúdos com diâmetros máximos de 9,5 mm e 19mm reforçados com frações volumétricas de fibra de aço variando de 1 % a 1,5 % e comprimentos de 35 mm e 60 mm e analisou o comportamento dos mesmos frente às suas propriedades mecânicas. Os concretos apresentaram alto desempenho mecânico com resistência à compressão, tração e flexão variando, de respectivamente, 70-76 MPa, 4,2-5,3 MPa e 8,4-19,2 MPa, e elevada tenacidade, com módulos de elasticidades para tração na flexão em média de 33 GPa. A inclusão das fibras de aço não alterou

significativamente a fluência das matrizes e proporcionaram reduções de 16-23 % na retração autógena e por secagem.

Já Tseng (2010) realizou estudos sobre as características dos agregados produzidos da britagem de antigas placas de concreto do Rodoanel Metropolitano Mário Covas, verificando as propriedades mecânicas dos concretos a resistência à tração na flexão, a resistência à tração indireta, à compressão e ao módulo de elasticidade. Observou-se que os concretos estudados, um convencional e os demais, com 100% de agregado graúdo reciclável e proporções de 25 até 75% de agregado miúdo convencional ou reciclado, os valores médios de tração na flexão ficaram entre 4,5 e 5,5 MPa, a análise dos módulo de elasticidade estático foi realizado com auxílio de *strain gages* e pela analogia de Möhr, obtendo valores entre 20 e 26 GPa, dependendo da mistura e do método utilizado, ainda se realizou o estudo do módulo dinâmico e do módulo de elasticidade pela resistência à compressão axial e diametral obtendo valores semelhantes, onde conforme diminuía as propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, resistência à tração na compressão e o módulo de elasticidade, aumentava-se a absorção ponderada dos agregados.

Conforme verificado por Tseng (2010) e por Batezini (2013) os valores para o módulo de elasticidade estático nos concretos podem sofrer interferências nos seus resultados conforme suas propriedades e nos ajustes necessários para utilização do LVDT.

Paulon e Monteiro (1991) partem do princípio que “no concreto de cimento Portland, a pasta de cimento forma uma auréola em torno do agregado, onde a cristalização dos hidratados é diferente da existente na mesma pasta, fora dessa zona de transição. Essa auréola ou zona de transição é um local com características mais fracas do concreto”. Segundo os autores, a zona de transição é um local com relação água/cimento mais elevada e de menos coesão, no qual as fissuras se propagam com maior facilidade. Nos concretos secos, como o CAR, em que a quantidade de pasta não é suficiente para cobrir todos os agregados de forma homogênea e completa, é duvidoso o fato de que a auréola exista ou não, mas constata-se a fragilidade da zona de transição entre agregado e pasta de cimento, conforme pode ser verificado nas análises microscópicas.

Esta constatação também possa vir de encontro com os estudos realizados por Cervo (2004) onde o concreto convencional apresentou melhores resultados de resistência à fadiga do que o concreto de alta resistência, evidenciando que o concreto convencional estudado apresentou-se menos conservador sob o ponto de vista do processo de fissuração à fadiga, mesmo obtendo menores valores de resistência à tração na flexão.

A partir dos resultados obtidos na presente pesquisa e aqueles apresentados por outros autores que estudaram um concreto de alta resistência, é possível verificar que existem particularidades ainda desconhecidas sobre o comportamento do concreto de alta resistência.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho estudou a influência que os diferentes métodos de cura ocasionaram na resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade de concretos convencionais (CC) tipicamente empregados na pavimentação e de alta resistência (CAR).

A fim de elucidar os objetivos específicos, o trabalho realizado permitiu elaborar as seguintes conclusões principais:

- Os concretos curados em pista (cura química com ou sem sacos de aniagem) apresentaram resultados de tração na flexão para a ABNT NBR 12142 e para NM 55 inferiores aos valores obtidos para a cura em câmara úmida, evidenciando que os valores obtidos em laboratórios superestimam os resultados que poderão ser encontrados em campo, uma vez, que é impossível obter as condições de cura em câmara úmida, com umidade e temperatura controladas, em ambiente externo;
- Na avaliação da utilização da cura química (tipicamente empregada em pista) verificou-se que o seu emprego apenas, sem o auxílio dos sacos de aniagem, gerou menores valores na resistência à tração na flexão e à resistência à compressão axial, se comparados com os valores obtidos para as amostras curadas com cura química seguidas de sacos de aniagem, isso pode estar associado a sua aplicação que ocorreu 24 horas após a moldagem dos corpos de prova, o que acarretou em uma primeira perda de água por evaporação, comprometendo assim, a hidratação das amostras até a sua aplicação, diminuindo a sua resistência ao longo do período de cura.
- Em todos os ensaios realizados pelos métodos de cura e idades empregados, verifica-se através dos valores encontrados, que para utilização em pista, tanto para um concreto referência com ou sem adição de fibras ou para um concreto de alta resistência, a cura química seguida da colocação de sacos de aniagem úmidos pelo período de 7 dias, apresentou-se com as melhores relações entre os ensaios e,

consequentemente, entre as propriedades mecânicas nos concretos pesquisados;

- Acredita-se que o CAR é muito mais sensível aos efeitos de sorção (desorção e absorção) assim como a defeitos na realização dos ensaios, pois se apresenta como um material muito mais frágil com deformações elásticas muito pequenas e plásticas quase nulas, resultando em variações entre os corpos de prova maiores do que no CC.
- Nas correlações entre a resistência à tração na flexão pela ABNT NBR 12142:2010 e ABNT NM 55:1996 foi constatado que, em ambos os ensaios, houve um ganho de resistência com a adição das fibras de polipropileno, sendo mais pronunciado para as curas química seguida ou não da colocação de sacos de aniagem.
- Foi possível verificar que as resistências obtidas pela NM 55 apresentaram grandes dispersões se comparadas com as obtidas pela NBR 12142, com valores inferiores na ordem de 15 a 20%, devido provavelmente a menor distância entre os apoios (efeito escala) e ao aumento da rigidez relativa. Também acredita-se que as maiores dispersões encontradas pela NM 55 estão relacionadas com a aquisição de dados através do programa Spyder e a utilização do LVDT, uma vez que este se apresenta muito sensível na realização destes, gerando resultados bem distintos para amostras de um mesmo concreto estudado.
- Para o concreto referência a razão entre a resistência à tração na flexão pela resistência à resistência à compressão axial ficou entre 11 e 12%, aos 28 dias, enquanto para o concreto referência mais fibras esta relação variou entre 11 a 14% e para o concreto de alta resistência a variação foi de 8 a 10%, mostrando que os resultados de resistência à compressão axial encontrados em conjunto com os resultados da tração na flexão se apresentaram de acordo com Mehta (2008) que afirma que à medida que a resistência à resistência à compressão axial do concreto aumenta a resistência à tração na flexão também aumenta, mas em uma taxa decrescente.
- Para o concreto referência a razão entre a resistência à tração por compressão diametral pela resistência à resistência à compressão axial

ficou entre 9,4 a 10,4%, aos 28 dias, enquanto para o concreto referência mais fibras esta relação variou entre 10,7 e 12,5% e para o concreto de alta resistência a variação foi de 8,6 a 11,2%, mostrando, também, um crescimento menos acentuado para o CAR.

- Verifica-se que os maiores valores para o módulo de elasticidade, segundo a analogia de Möhr, foram os obtidos em câmara úmida, seguidos da cura química, evidenciando que a colocação dos sacos de aniagem úmidos não modificam de forma significativa os valores para o módulo de elasticidade estático dos concretos estudados (REF, REF+FIBRAS e CAR).
- Os módulos de elasticidade obtidos pela dedução da linha elástica segundo Timoshenko/Gere, com o aumento do período de cura, também se elevaram, sendo mais acentuado na cura química.
- O concreto referência, estudado nesta pesquisa, apresentou uma estrutura mais densa do que os concretos convencionalmente aplicados em pavimentação, sendo acentuada pela colocação dos sacos de aniagem úmidos juntamente com a cura química, diminuindo a flecha dos corpos de prova e elevando os módulos de elasticidade. Já no concreto de alta resistência o efeito de uma estrutura com grande compacidade, pode ter gerado microfissuras na interface pasta/agregado, tornando o concreto mais suscetível a maiores deformações devido a sua estrutura interna, em idades avançadas.
- Verificou-se que a realização dos ensaios de módulo de elasticidade pela dedução da equação da linha elástica ou pela analogia de Möhr produz resultados equivalentes, apenas deve-se considerar as mesmas cargas mínimas e máximas para obtenção destes.

A avaliação das propriedades mecânicas para os concretos estudados (referência, referência mais fibras e de alta resistência) nos diferentes métodos de cura aplicados (câmara úmida, cura química, cura química seguida da colocação de sacos de aniagem úmidos) mostraram que a microestrutura dos concretos, está interferindo de forma significativa nos resultados obtidos para a resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade estático, principalmente nos concretos curados para condições de pista (cura química e

cura química seguida da colocação de sacos de aniagem), onde fatores como: a absorção e reabsorção da água de evaporação para hidratação, a fissuração da interface pasta/agregado, as condições ambientes relacionadas à temperatura e umidade, estejam interferindo nos resultados obtidos.

Observou-se ainda que fatores climáticos e problemas relacionados com a execução dos ensaios, no período de moldagem, aplicação das curas e ensaios, podem ter interferido de forma significativa para a grande dispersão nos valores encontrados, bem como, na resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade.

Fica a oportunidade para trabalhos futuros, a realização de análises mais detalhadas para o módulo de elasticidade estático através do ensaio de tração na flexão e pela ABNT NBR 8522:2008, pela resistência à compressão axial.

Também sugere-se que possam ser estudado, de forma mais aprofundada, as questões relacionadas a microestruturas do concretos, principalmente o concreto de alta resistência a fim de elucidar os valores obtidos nesta pesquisa, bem como, facilitar a compreensão das variações ocorridas nas propriedades mecânicas.

Observa-se que a realização de análises estatísticas entre os resultados deste trabalho pode gerar conclusões mais específicas e elucidar os resultados encontrados de forma significativa.

Faz-se necessário uma análise mais aprofundada dos métodos de cura, principalmente nos mais utilizados em pista (cura química seguida ou não da colocação de sacos de aniagem úmidos), tendo em vista a grande interferência que estes provocam nas propriedades mecânicas dos concretos para pavimentos, mostrando a necessidade da realização de ensaios em placas de concreto, que devem ser curadas em condições ambientais de pista, depois serradas e ensaiadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 212. Chemical admixtures for concrete. ACI Materials Journal, v. 86, n. 3, 1989.

AGOSTINI, L.R.S.; NUNES, N.L. Método de cura para concreto de alta resistência. Revista IBRACON, ago/set, pp. 23-30, 1996.

AITCIN, P. C; Concretos de alto desempenho. São Paulo: Pini, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Portland Cement. C 150.

\_\_\_\_\_. ASTM C1018:Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM, 1997.

\_\_\_\_\_. ASTM, C. 150: Standard: standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 2009.

\_\_\_\_\_. ASTM, C. 78/C 78M. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading) ASTM, West Conshohocken, PA, p. 4, 2010.

\_\_\_\_\_. ASTM C-125.Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, Annual book of ASTM Standards.1994.

ANÔNIMO (2002), Boletim Técnico 106: Guia básico de utilização de cimento Portland, 7ed, São Paulo, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico. NBR 7583.Rio de Janeiro, agosto 1986

\_\_\_\_\_. Cimento Portland comum: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland dealta resistência inicial: NBR 5733. Rio de Janeiro: 1991. 5p.

\_\_\_\_\_. Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Concreto – Determinação da resistência à Tração na Flexão de corpos-de-prova Prismáticos. NBR NM 55. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. Execução de pavimento de concreto simples por meio mecânico – procedimento: NBR 7583. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003. NBR NM 248:2003.

\_\_\_\_\_. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. Concreto-Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. Agregados para concreto – Especificação: NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. NBR 11768: Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. Projeto de estruturas de concreto armado; Procedimento : NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

BALBO, J. T. Estudo de gradientes térmicos em placas de concreto de cimento portland para pavimentação. 1999.

BALBO, José Tadeu. Contribuição à análise estrutural de reforços com camadas ultradelgadas de concreto de cimento Portland sobre pavimentos asfálticos (whitetopping ultradelgado). São Paulo, 1999.

BALBO, José T.; SEVERI, Andréa A. Thermal gradients in concrete pavements in tropical environment: Experimental appraisal. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1809, n. 1, p. 12-22, 2002.

BALBO, J. T; Pavimentos de Concreto. Oficina de Textos, São Paulo – SP, 2009.

BALBO, Jose Tadeu. Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 6, n. 6, p. 854-874, 2013.

BASHEER, L; KROPP, J; CLEAND, D.J. Assessment of the durability of concrete form its permeation properties: a review. Construction And Building Materials, v. 15 n. 2/3, p. 93-103, mar/apr. 2001.

BATEZINI, Rafael. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação. Universidade de São Paulo, 2013.

BATTAGIN, Arnaldo F. Cimento Portland. ISAIA, GC Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

BATTAGIN, A.F. Uma breve história do cimento Portland. Disponível em <[http://www.abcp.org.br/basico\\_sobre\\_cimento/historia.shtml](http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml)>. Acesso em: 2 jun. 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites, 1990.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 41, Salvador, 1999.

CERVO, T. C; Balbo, J.T. (2004). Influência do método de cura na resistência à tração na flexão de concretos de alto desempenho para pavimentos. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 46º Ibracon: CD Room. Florianópolis, SC.

CERVO, T. C; ISAIA, G. C; OLIVEIRA, M. D; Influência do método de cura na resistência a tração na flexão e na absorção de água de concretos para pavimentação. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 49º Ibracon: CD Room. Bento Gonçalves, RS. 9p., 2007.

CERVO, T.C. (2004). Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.

DAL MOLIN, Denise CC. Adições minerais. ISAIA, GC Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

de Janeiro, 2011.

DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, Ed. E&FN SPON, London, 1992.

EWERTSON, C.; PETERSSON, P.E..The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete. Results from a field exposure test. Cement and Concrete Research, vol. 23, pp. 683-692, 1993.

FHWA, HPC Bridges, Building Bridges for the 21<sup>st</sup> Century, U.S. Department of Transportation, Publication n. FHWA-SA-98-084, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1998.

FARIAS, M.M.; PALMEIRA, E.M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v.1.p. 483-526.

FERREIRA, G. C. S. et. al. Estudo do comportamento de traços de concreto submetidos a diferentes tipos de cura. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 49º Ibracon: CD Room. Bento Gonçalves, RS. 9p, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. ISSN 0103-9830 BT/PCC/260. PCC-USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/2000.

FIGUEIREDO, A. D. “Concreto com Fibras.” *ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Arte Interativa (2011): 1327-1366.*

FURQUIM, P. R. (2006). Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. (Ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Ipsis Gráfica e Editora, São Paulo, 2011. Cap. 10. p. 347 - 380.

HELENE, Paulo RL; TERZIAN, Paulo. Manual de dosagem e controle do concreto. Pini, 1992.

HELENE, P. R. L. Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Interessado: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: Editor G. C. Isaia, v. 1 e 2, 791 p, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Editor G. C. Isaia, v. 1 e 2, 2011.

ISAIA, G.C. Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1995.

ISAIA, G.C. “A evolução do concreto estrutural”. *ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Arte Interativa (2011): 1327-1366.*

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF4: Method of testes for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III Method of tests for steel reinforced concrete. N. 3. Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers Japan, Jun. 1984.

KAPLAN, M. F. Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates. American Concrete Institute, Proc., Detroit, v.55, n.5, p.1193-208, May 1959.

KAPLAN, M. F. The effects of the properties of coarse aggergates on the work abity of concrete. Magazine of Concrete Research, London, v. 10, n.29, p.63-74, Aug.1958.

KOSMATKA, Steven H.; WILSON, Michelle L. Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials. 2011.

MAILVAGANAM, N. P. Admixture Compatibility in Special Concretes. In: 2<sup>nd</sup>. CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1999, Gramado. Proceedings. Gramado: ACI SP-186, 1999.

MALHOTRA, V. M. Supplementary Cementing Materials for Concrete. Canadian Government Publishing Centre, Ottawa – Canada, 1987.

MARANGON, E. Caracterização Material e Estrutural de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil– COPPE - Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MASCHIO, A. A evolução do pavimento de concreto no Brasil. 16<sup>o</sup> Encontro Técnico do DER/PR. Curitiba. (2012)

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Pini, 2008.

MEHTA, P. Kumar; Concreto: estrutura, propriedades e materiais, PINI, S. Paulo, SP, v. 573, 1994.

MEIRA, L. R. Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPGEC – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2009.

MIGLIORINI, A. V. Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para a possível utilização em carapaça de molhes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande - RS, 2011.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª edição. São Paulo, Pini, 1997.

OLIVEIRA, M. D; ISAIA, G. C; CERVO, T. C; Estudo comparativo entre Resistência à tração na flexão e Resistência à compressão axialresistência à compressão axial empregando diferentes métodos de cura em concreto para pavimentos.50º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 50º Ibracon: CD Room. Salvador, BA , 2008.

PAULON, V. A., MONTEIRO, P.J.M. Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. São Paulo, EPUSP. 1991. (Boletim Técnico BT/PCC/43).

PETRUCCI, Eladio G. R., Concreto de Cimento Portland. 13ª ed. – Editora Globo – São Paulo – SP, 1995.

PITTA, M. R; CARVALHO, M.D; RODRIGUES, P. P. F; Materiais para pavimentação de concreto simples. 5ª ed. São Paulo, ABCP, 1999.

RAITHBY, K.D.; GALLOWAY, J.W. Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete. In: ABELES Symposium: Fatigue of Concrete, Hollywood, 1972-1973. Papers. Detroit, ACI Publication. v. 41, pp. 15-34, 1974.

RHEINHEIMER, Vanessa; PINTO, R.C.A.; HADLICH,A.R.; PFLEGER, V.. Relação entre resistências a tração na flexão e compressão axialresistência à compressão axial em concretos e argamassas para um pavimento Fast

Track. 32º Jornadas Sul americanas de Engenharia Estrutural. Anais: CD Room. Campinas – SP. 9 p. 2006.

RICHARDSON, David N.; WHITWELL, Brent A. Concrete Production Plant Variables Affecting Flexural Strength Relative to Compressive Strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014.

RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures*, v.35, p. 579-582, 2002.

SACHET, Taís. ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COMPACTADOS COM INCORPORAÇÃO DE FRESADOS PARA BASES DE PAVIMENTOS. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAMMAN, T. A., Mirza, W.H. and Wafa, F.F (1996) Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength concrete: a comparative study. *ACI Materials Journal*, 93 (1), January – February, 36-40.

TAN, K; GJORV, O. E. Performance of concrete under different curing conditions. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n. 3, pp. 355-361, 1996.

TAZAWA, E. and MYAZAWA, S. (1996) Influence of Autogenous Shrinkage on Cracking in High-strength Concrete, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/ High-Performance Concrete, Paris, ISBN 2-85878-258-3, pp. 321-30.

TIMOSHENKO, GERE. *Mecânica dos sólidos*, vol. 1 - LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro – RJ, 1994.

TOMAZ, Ercio. Execução, controle e desempenho das estruturas de concreto. Capítulo 18, Livro *Concreto, Pesquisa, Ensino e Realizações*, 2005.

TSENG, Ester. Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas. Dissertação. Universidade de São Paulo.

VIERA, M., ALMEIDA, I.R., GONÇALVES, A. F. Influence of moisture curing on durability off lyash concrete for Road pavements. In: MALHOTRA, V.M. (ed.). CANMET/ACI. International Conference on Durability of Concrete, 5<sup>th</sup>., Barcelona, 2000. Proceedings. American Concrete Institute, 2 v., v.1, p.91-101 ( SP – 192).