

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE  
ELASTICIDADE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM BRASÍLIA**

**ANTONIO CARLOS FERREIRA DE SOUZA LEAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS  
E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE  
ELASTICIDADE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM BRASÍLIA**

**ANTONIO CARLOS FERREIRA DE SOUZA LEAL**

**ORIENTADOR: Prof. ELTON BAUER**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS  
E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM-010A/12**  
**BRASÍLIA/DF JULHO DE 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE  
ELASTICIDADE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM BRASÍLIA**

**ANTONIO CARLOS FERREIRA DE SOUZA LEAL**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

---

**Prof. Elton Bauer, Dr.**  
(Orientador)

---

**Prof. Antonio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing.**  
(Examinador)

---

**Prof. Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Dr.**  
(Examinador)

**BRASÍLIA/DF, 13 DE JULHO DE 2012.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LEAL, ANTONIO CARLOS FERREIRA DE SOUZA

Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.

[Distrito Federal] 2012.

XXV, 151p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto

2. Módulo de elasticidade

3. Brasília

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

LEAL, A.C.F.S. (2012). Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-010A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Antonio Carlos Ferreira de Souza Leal

TÍTULO: Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Antonio Carlos Ferreira de Souza Leal  
SQN 111 Bloco D Apartamento 603 - Asa Norte.  
CEP 70754-040 - Brasília/DF, Brasil.  
E-mail: acleal@unb.br

## **AGRADECIMENTOS**

Desejo externar meus agradecimentos e, para não correr o risco de esquecer nomes daqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso desse estudo, quero agradecer primeiramente e de forma geral, pela ajuda de todos, e;

Ao Professor Elton Bauer, pela orientação durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Cláudio Henrique Pereira, pelas colaborações sempre oportunas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília pelo apoio e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de turma do curso de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Maria del Pilar, pelo companheirismo manifestado durante o período de aula.

Aos funcionários do LEM, Severo, Washington e Paulo Henrique, que participaram ativamente na preparação dos materiais, equipamentos, na execução dos ensaios.

Às concreteiras que forneceram o concreto utilizado na pesquisa.

Às companheiras de trabalho, Anália, Mariana, Claudiene e Mônica, que de todas as formas possíveis auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo Henrique Pires, pelo empurrão inicial e incentivo durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor José Angelo Belloni, meu reconhecimento à amizade e ao apoio, sem o qual não teria sido possível me desincumbir da jornada.

Ao meu sobrinho Rafael pelas solicitações atendidas sempre prontamente.

Ao meu filho Pedro, pela força que me deu nos momentos mais difíceis.

À minha querida esposa Eleusa, pela sua intensa participação e por estar sempre ao meu lado possibilitando a minha dedicação ao estudo.

A todos,

Muito obrigado.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Casildo (*in memoriam*) e  
Anaterci pela formação que me  
proporcionaram.

Aos meus filhos Ana Lúcia e Pedro.  
E em especial à minha esposa Eleusa  
com todo o meu amor.

## **RESUMO**

### **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM BRASÍLIA**

**Autor: Antonio Carlos Ferreira de Souza Leal**

**Orientador: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, julho de 2012**

O conhecimento das propriedades do concreto é de suma importância para o projeto de estruturas. Enquanto a resistência à compressão é uma propriedade bem conhecida, é usual a determinação do módulo de elasticidade por meio de formulações empíricas que não levam em consideração as peculiaridades dos materiais e da produção de uma determinada região. De modo que se tenha um conhecimento mais efetivo das propriedades do concreto da região de Brasília, o presente estudo teve como objetivo a investigação experimental do módulo de elasticidade longitudinal em alguns concretos produzidos na região a partir das características de produção dos principais produtores da região.

Foram pesquisados concretos das classes C20, C30 e C40, fornecidos por três centrais de concreto distintas, com coletas feitas direto nas concreteiras e num canteiro de obras. Também foram estudadas a resistência à compressão, a resistência à tração e o índice de absorção de água destes concretos. De modo complementar, para efeito de comparação dos resultados entre ensaios, foram realizados ensaios de propagação de ondas ultrassônicas. Além disso, foi identificada a origem e levantadas a curva e composição granulométricas dos agregados utilizados. Com o objetivo de se verificar possíveis alterações na produção do concreto na usina ou ao longo do tempo, foi investigado também o concreto com o mesmo traço replicado em laboratório e de uma segunda coleta em data posterior, superior a três meses à da primeira coleta.

Como resultado desta pesquisa observou-se a ocorrência de diferença nas propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão entre concretos de mesma classe produzidos por diferentes concreteiras. Constatou-se que, aos 28 dias, para o concreto CA20, o módulo de elasticidade variou de 30,622 a 33,595 GPa e a resistência à compressão variou de 22,5 a 25,8 MPa; que para o concreto C30 a variação do módulo de



elasticidade foi de 33,706 a 41,892 GPa e a resistência à compressão de 38,0 a 41,5 MPa; e que para o concreto C40 o módulo de elasticidade variou de 37,597 a 41,987 GPa e a resistência à compressão variou de 43,7 a 51,2 MPa. O coeficiente de variação dos ensaios foi de 4,9% para o módulo de elasticidade e de 5,2% para a resistência à compressão. Foi observado também, que a pasta de cimento se apresentou como fator fundamental e comum tanto na variabilidade do módulo de elasticidade quanto na resistência à compressão e foi comparada a correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade medidos com a proposta pela formulação empírica das normas.

Palavras-chave: concreto, módulo de elasticidade, Brasília.

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELASTICITY MODULE IN CONCRETE PRODUCED IN BRASILIA**

**Author: Antonio Carlos Ferreira de Souza Leal**

**Supervisor: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasilia, July 2012**

The knowledge about concrete properties has its vital importance for structural projects.

Meanwhile concrete's compression strength is a well-known property, it is usual determining its modulus of elasticity empirically, without taking into consideration materials specificities or some specific region production factors. In order to have a more effective knowledge of concrete properties in Brasilia's region, the present study was aimed at experimental investigation of the longitudinal modulus of elasticity of some concretes produced in Brasilia region from production characteristics of the main manufacturers of the region.

Three classes of concrete were researched, class C20, C30 and C40, provided by three separate concrete plants, with collections made directly on the concrete producers and construction site. It was also studied the compressive strength, tensile strength and water absorption ratio of those concretes. In addition, for comparison matters between the results of the tests, ultrasonic waves propagating tests were made. Furthermore, we identified the raised source and the curve and granulometric composition of the aggregates used. In order to verify possible changes in the concrete production at the plant or over time, the concrete was also investigated with the same feature replicated in the laboratory and a second collection at a later date, more than three months after the first collection.

As a result of this research, it was observed the existence of differences in the modulus of elasticity and compressive strength between the same class concretes from different producers. It was found that, at 28 days, for the C20 concrete, its modulus of elasticity varied between 30.622 and 33.595 GPa and its compressive strength varied between 22.5 and 25.8 MPa; for the C30 concrete, the variation on its modulus of elasticity was between 33,706 and 41.892 GPa and the variation on its compressive strength was between 38,0

and 41,5 MPa; and for the C40 concrete, its modulus of elasticity varied between 37.597 and 41.987 GPa and its compressive strength varied between 43.7 and 51.2 MPa. The variation ratio for the tests was 4.9% for the modulus of elasticity and 5.2% for the compressive strength. It was also observed that the cement paste is introduced as a factor common to both fundamental and the variability of the elastic modulus and the compressive strength and compared the correlation between the compressive strength and modulus of elasticity measured by the proposed empirical formula of standards.

Keywords: concrete, modulus of elasticity, Brasilia.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1	ASPECTOS DO CONCRETO .....	4
2.1.1	Microestrutura do concreto .....	4
2.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL DO CONCRETO .....	8
2.2.1	A importância do módulo de elasticidade.....	9
2.2.2	Os diversos tipos de módulo de elasticidade .....	10
2.2.3	Nomenclatura e modelos de previsão do módulo de elasticidade .....	12
2.2.4	Fatores que afetam o módulo de elasticidade .....	17
2.3	RESISTÊNCIA DO CONCRETO À COMPRESSÃO .....	25
2.3.1	Fatores que afetam a resistência do concreto à compressão.....	26
2.4	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	35
2.5	RESISTÊNCIA DO CONCRETO À TRAÇÃO .....	37
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	42
3.1	METODOLOGIA .....	42
3.1.1	Amostras .....	45
3.1.2	Propriedades estudadas e métodos.....	47
3.1.3	Variáveis estudadas em função da idade do concreto.....	49
3.1.4	Rotinas para a determinação das propriedades físico-mecânicas .....	53
3.2	ENSAIOS.....	54
3.2.1	Determinação da resistência à compressão, resistência à compressão característica e módulo de elasticidade.....	54
3.2.2	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	61
3.3	ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	62
3.3.1	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica .....	62

3.3.2	Determinação da absorção de água do concreto .....	66
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>67</b>
4.1	CONCRETEIRA CA .....	68
4.1.1	Resistência à compressão .....	70
4.1.2	Resistência à tração .....	74
4.1.3	Absorção de água e propagação de onda ultrassônica .....	75
4.1.4	Módulo de elasticidade .....	78
4.2	CONCRETEIRA CB .....	81
4.2.1	Resistência à compressão .....	82
4.2.2	Resistência à tração .....	86
4.2.3	Absorção de água e propagação de onda ultrassônica .....	87
4.2.4	Módulo de elasticidade .....	90
4.3	CONCRETEIRA CC .....	93
4.3.1	Resistência à compressão .....	94
4.3.2	Resistência à tração .....	96
4.3.3	Absorção de água e propagação de onda ultrassônica .....	96
4.3.4	Módulo de elasticidade .....	99
4.4	ESTUDO DE CASO (CO).....	100
4.4.1	Resistência à compressão .....	100
4.4.2	Resistência à tração .....	100
4.4.3	Absorção de água e propagação de onda ultrassônica .....	102
4.4.4	Módulo de elasticidade .....	103
4.5	COMPARAÇÕES E CORRELAÇÕES .....	104
4.5.1	Módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias dos concretos-foco .....	106
4.5.2	Módulo de elasticidade e da resistência à compressão dos concretos CA30 e CB30 aos 3, 7, 28 e 91 dias .....	107
4.5.3	Relação entre a tração direta e a resistência à compressão aos 28 dias .....	108
4.5.4	Parâmetros de mistura .....	109
4.5.5	Correlação entre o módulo de elasticidade secante e a resistência à compressão característica .....	120
4.5.6	Resumo das observações relativas ao módulo de elasticidade do concreto-foco .	121

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>126</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>129</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>138</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>143</b>
	<b>ANEXO C.....</b>	<b>147</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades típicas de rochas utilizadas na produção de agregados para concretos (SBRIGHI NETO, 2005).....	7
Tabela 2.2	Tipos de módulo de elasticidade e terminologia adotada pelas normas brasileiras, valor estimado e utilização (NBR 6118:2007).....	13
Tabela 2.3	Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto (ABNT NBR12655, 2006).....	14
Tabela 2.4	Expressões empíricas da NBR 6118:2007, do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90 correlacionando o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão.....	16
Tabela 2.5	Relação entre a razão dos módulos de elasticidade de concretos com diferentes agregados confrontado com os fatores de correção da expressão para determinação do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do CEB-FIP MC 90 (SILVA, 2003).....	18
Tabela 3.1	Quantidade de corpos de prova por tipo de ensaio realizado .....	45
Tabela 3.2	Nomenclatura das amostras .....	46
Tabela 3.3	Ensaio e caracterização de componentes realizados e normas utilizadas para determinação das propriedades estudadas .....	48
Tabela 4.1	Proporção em massa dos concretos da concreteira CA .....	68
Tabela 4.2	Proporção em volume dos concretos da concreteira CA .....	69
Tabela 4.3	Resistência à compressão dos concretos da concreteira CA .....	71
Tabela 4.4	Resistência à tração por compressão diametral dos concretos da concreteira CA .....	75
Tabela 4.5	Velocidade da propagação de onda ultrassônica , resistência a compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CA .....	77
Tabela 4.6	Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CA .....	79
Tabela 4.7	Proporção em massa dos concretos da concreteira CB .....	81
Tabela 4.8	Proporção em volume dos concretos da concreteira CB .....	81
Tabela 4.9	Resistência à compressão dos concretos da concreteira CB.....	83
Tabela 4.10	Resistência à tração por compressão diametral dos concretos da concreteira CB .....	87

Tabela 4.11 Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CB .....	89
Tabela 4.12 Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CB .....	91
Tabela 4.13 Proporção em massa dos concretos da concreteira CC .....	93
Tabela 4.14 Proporção em volume dos concreto da concreteira CC.....	93
Tabela 4.15 Resistência à compressão do concreto da concreteira CC.....	95
Tabela 4.16 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos da concreteira CC .....	96
Tabela 4.17 Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência a compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CC .....	98
Tabela 4.18 Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CC .....	99
Tabela 4.19 Resistência à compressão do concreto do estudo de caso (CO).....	100
Tabela 4.20 Resistência à tração por compressão diametral do concreto do estudo de caso (CO).....	101
Tabela 4.21 Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos do estudo de caso (CO).....	103
Tabela 4.22 Módulo de elasticidade dos concretos do estudo de caso (CO).....	104
Tabela 4.23 Valores médios do módulo de elasticidade, módulo de elasticidade de acordo com a expressão de previsão da NBR 6118:2007, da resistência à compressão e da resistência característica das amostras das concreteiras CA, CB e CC aos 28dias .....	106
Tabela 4.24 Associação entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias e os parâmetros de mistura dos concretos CA20, CA30 e CA40 e CB20, CB30 e CB40.....	119
Tabela 4.25 Valores médios do módulo de elasticidade do concreto-foco desvio-padrão e coeficiente de variação do ensaio das amostras coletadas na concreteira, replicadas no laboratório (“L”), e de controle da produção (“P”) e de controle de produção replicadas no laboratório (“PL”) .....	122
Tabela 4.26 Valores médios da resistência à compressão do concreto-foco desvio-padrão e coeficiente de variação do ensaio das amostras coletadas na concreteira, replicadas no laboratório (“L”), e de controle da produção	



	(“P”) e de controle de produção replicadas no laboratório (“PL”) .....	123
Tabela B.1	Valores médios da resistência à compressão dos cimentos utilizados.....	143
Tabela B.2	Composição granulométrica dos componentes dos concretos CA e CB .....	146
Tabela C.1	Valores da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, da resistência à tração por compressão diametral, da velocidade de propagação de onda ultrassônica e do índice de absorção de água de todas as amostras de concreto ensaiadas .....	147

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação dos principais componentes do concreto (DAL MOLIN, 1995) .....	5
Figura 2.2	Propagação das fissuras: (a) concreto de densidade normal; (b) concreto de alto desempenho (adaptada de ALMEIDA, 2005 <i>apud</i> MINDESS, 1983) .....	6
Figura 2.3	Comportamento típico da curva tensão – deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto (NEVILLE, 1997) .....	9
Figura 2.4	Diferentes módulos de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008) .....	12
Figura 2.5	Aplicação das expressões empíricas da NBR 6118:2007, do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90, nos seus limites inferior e superior, correlacionando o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ).....	17
Figura 2.6	Influência do tamanho do agregado e adição de microssílica no módulo de elasticidade (BARBOSA, 1999). .....	19
Figura 2.7	Influência da mineralogia e tamanho do agregado no módulo de elasticidade (GAGLIARDO et al. 2010) .....	20
Figura 2.8	Relação entre o módulo de elasticidade e consumo de cimento mantendo a relação água/cimento constante (MELO e HELENE, 2002) .....	21
Figura 2.9	Relação entre o módulo de elasticidade e consumo de cimento mantendo o abatimento constante (MELO e HELENE, 2002). .....	22
Figura 2.10	Comportamento do módulo de elasticidade de concretos com 28 dias da região de Goiás com variação da relação a/c e agregado graúdo (SILVA, 2003) .....	22
Figura 2.11	Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico de dois corpos de prova em função de adições no concreto.....	23
Figura 2.12	Influência da condição de umidade do corpo de prova sobre o módulo secante de elasticidade (NEVILLE, 1997). .....	24
Figura 2.13	Influência da velocidade de carga na determinação do módulo de elasticidade (Troxell, 1968 <i>apud</i> E. FURNAS, 1997) .....	25
Figura 2.14	Resistência em função da relação água/cimento (NEVILLE, 1997). .....	28
Figura 2.15	Influência da relação a/c e a idade na resistência do concreto submetido a cura úmida (COUTINHO E GONÇALVES, 1994) .....	28
Figura 2.16	Influência da dosagem do cimento na resistência a compressão e na	

resistência à flexão (COUTINHO e GONÇALVES, 1994). .....	29
Figura 2.17 Influência do $D_{máx}$ do agregado em $f_c$ dos concretos com (a) $a/c = 0,65$ e (b) $a/c = 0,40$ (EVANGELISTA, 2002) .....	30
Figura 2.18 Tensão de compressão aos 90 dias. (EZPINOZA-HIJAZIN e LOPES, 2010).....	32
Figura 2.19 Influência do tipo de cura na resistência à compressão para concreto (a) 20MPa e (b) 30 MPa (CÂMARA, 2006). .....	33
Figura 2.20 Influência da relação altura/diâmetro sobre a resistência aparente de um cilindro (NEVILLE,1997) .....	34
Figura 2.21 Influência da planicidade da superfície de carga de corpos de prova cúbicos de concreto sobre a resistência à compressão (BUCHER E RODRIGUES FILHO, 1983 <i>apud</i> BEZERRA, 2007) .....	34
Figura 2.22 Resistência à compressão do concreto ( $f_c = 47$ MPa, com enxofre e neoprene como capeamento) com incremento da velocidade de carregamento (BEZERRA, 2007) .....	35
Figura 2.23 Representação esquemática do comportamento do concreto sob compressão uniaxial. (MEHTA E MONTEIRO, 2008).....	37
Figura 2.24 Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração axial (MEHTA E MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO <i>et al.</i> , 2012).....	39
Figura 2.25 Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração na flexão. Esquema de carregamento (MEHTA E MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO <i>et al.</i> ,2012) .....	39
Figura 2.26 Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração na flexão. Diagrama de esforço cortante e esforço de flexão (MEHTA E MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO <i>et al.</i> , 2012).....	40
Figura 2.27 Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração por compressão diametral. (MEHTA E MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO <i>et al.</i> , 2012). .....	41
Figura 2.28 Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração por compressão diametral. Desenvolvimento das tensões de compressão e tração ao longo do diâmetro (MEHTA E MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO <i>et al.</i> , 2012). .....	41

Figura 3.1	Concretos estudados das concreteiras CA e CB .....	43
Figura 3.2	Desdobramento da análise do concreto-foco (“L” = replicação em laboratório: “P”= segunda coleta, controle da produção) .....	44
Figura 3.3	Concreto estudado da concreteira CC .....	44
Figura 3.4	Concreto estudado com coleta feita diretamente na obra (CO) .....	45
Figura 3.5	(a) medição do abatimento; (b) três classes de concreto moldadas e identificadas .....	47
Figura 3.6	Variáveis estudadas em função da idade dos concretos produzidos pelas Concreteiras CA e CB.....	50
Figura 3.7	Variáveis estudadas em cada idade do concreto produzido pela Concreteira CC.....	51
Figura 3.8	Variáveis estudadas em cada idade do concreto produzido pela Concreteira CB coletado na obra .....	52
Figura 3.9	Rotina para a determinação das propriedades físico-mecânicas .....	53
Figura 3.10	Prensa hidráulica utilizada: (a) conjunto; (b) detalhe do decodificador de sinal .....	55
Figura 3.11	Instrumentação para medição da deformação: (a) conjunto de equipamentos instalados; (b) extensômetros montados; (c) decodificador de sinal; (d) detalhe da haste flexível .....	57
Figura 3.12	Representação esquemática do carregamento para a Metodologia A (ABNT NBR 8522:2008).....	60
Figura 3.13	Ensaio por compressão diametral: (a) corpo de prova colocado na prensa; (b) corpo-de-prova rompido .....	61
Figura 3.14	Diagrama esquemático do circuito de teste da velocidade de pulso (NAIK et al., adaptado de ASTM Test Designation C 597-02).....	63
Figura 3.15	Equipamento utilizado e medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica. (a) gerador/receptor e os transdutores; (b) detalhe do painel; (c) realização do ensaio .....	65
Figura 3.16	Ensaio de absorção de água: (a) corpos de prova com 1/3 do volume imerso em recipiente com água (1ª etapa da saturação); (b) aspecto dos corpos de prova fora do recipiente.....	66
Figura 4.1	Composição dos concretos da concreteira CA em volume.....	69
Figura 4.2	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CA20, CA30 e CA40 produzidos pela concreteira CA.....	70

Figura 4.3	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CA30 e CA30L produzidos pela concreteira CA (“L” = moldado no laboratório). ....	72
Figura 4.4	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos produzidos pela concreteira CA (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório). .....	73
Figura 4.5	Relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento para os concretos CA20, CA30 e CA40 aos 28 dias .....	73
Figura 4.6	Relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da concreteira CA .....	74
Figura 4.7	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto CA30 e aos 28 dias dos concretos CA20 e CA40 .....	78
Figura 4.8	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CA (“L” = moldado no laboratório) .....	80
Figura 4.9	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CA (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório) .....	80
Figura 4.10	Composição do concreto da concreteira CB em volume .....	82
Figura 4.11	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CA20, CA30 e CA40 produzidos pela concreteira CB .....	83
Figura 4.12	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos produzidos pela concreteira CB (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório). .....	85
Figura 4.13	Relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento para os concretos CB20, CB30 e CB40 aos 28 dias. ....	85
Figura 4.14	Relação entre a resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da concreteira CB .....	86
Figura 4.15	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CB20 e CB30 aos 7 e 28 dias do concreto CB40 .....	90
Figura 4.16	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CB (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório) .....	92
Figura 4.17	Composição do concreto da concreteira CC em volume .....	94
Figura 4.18	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CC30 .....	95
Figura 4.19	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto CC30 .....	99

Figura 4.20	Relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias do concreto do estudo de caso, CO.....	102
Figura 4.21	Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos estudados .....	105
Figura 4.22	Módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos estudados .....	105
Figura 4.23	Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7, 28 e 91 dias dos concretos CA30 e CB30. ....	107
Figura 4.24	Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7, 28 e 91 dias dos concretos CA30 e CB30 .....	108
Figura 4.25	Resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias de todos os concretos .....	108
Figura 4.26	Composição dos concretos em volume .....	109
Figura 4.27	Módulo de elasticidade em função da relação água/cimento.....	110
Figura 4.28	Resistência à compressão em função da relação água/cimento .....	111
Figura 4.29	Módulo de elasticidade em função do consumo de cimento.....	112
Figura 4.30	Resistência à compressão em função do consumo de cimento .....	112
Figura 4.31	Módulo de elasticidade em função do consumo de agregado total.....	113
Figura 4.32	Resistência à compressão em função do consumo de agregado total .....	114
Figura 4.33	Módulo de elasticidade em função do teor de pasta de cimento.....	115
Figura 4.34	Resistência à compressão em função do teor de pasta de cimento .....	115
Figura 4.35	Módulo de elasticidade em função do teor de argamassa seca. ....	116
Figura 4.36	Resistência à compressão em função do teor de argamassa seca.....	117
Figura 4.37	Módulo de elasticidade em função da relação agregado graúdo/ agregado total .....	118
Figura 4.38	Resistência à compressão em função da relação agregado graúdo/ agregado .....	118
Figura 4.39	Correlação entre o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) com a aplicação das expressões empíricas da ABNT NBR 6118:2007 do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90.....	121
Figura B.1	Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CA (1ª coleta).....	144
Figura B.2	Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CA (2ª coleta).....	144
Figura B.3	Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB (1ª coleta).....	145

Figura B.4	Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB (2ª coleta).....	145
Figura B.5	Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB.....	145

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

### Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT NBR	Norma brasileira registrada no INMETRO
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CEB	Comité Euro – International du Béton, Lausanne (Switzerland)
CP I	Cimento Portland comum
CP II	Cimento Portland composto
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP RS	Cimento Portland Resistente à Sulfatos
DF	Distrito Federal
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB
NM	Norma Mercosul
UnB	Universidade de Brasília

### Letras romanas

$a/c$	relação água/cimento
$h$	altura do corpo de prova
$d$	diâmetro do corpo de prova
$D_{máx}$	dimensão máxima do agregado
$E_{ci}$	módulo de elasticidade tangente inicial
$E_{cs}$	módulo de elasticidade secante
$E_d$	módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
$F$	carga máxima obtida no ensaio (N)
$f_c$	carga de ruptura à compressão
$f_{cj}$	resistência média à compressão



$f_{ck}$	resistência característica à compressão
$f_{t,D}$	resistência à tração por compressão diametral (MPa)
$S_d$	desvio padrão
$V$	velocidade de onda ultrassônica

### **Letras gregas**

$\rho$	massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )
$\varepsilon$	deformação específica ( $\varepsilon = \Delta L/L$ )
$\sigma$	tensão
$\sigma$ - $\varepsilon$	tensão-deformação
$\nu$	coeficiente de Poisson dinâmico

### **Unidades de medidas**

cm	centímetro
kg	quilograma
kHz	quilohertz
kN	quilonewton
m	metro
MPa	megapascal
N	Newton
$\mu\text{s}$	microsegundo
s	segundo
$\mu\text{m}$	micrômetro

# 1 – INTRODUÇÃO

A resistência à compressão é a propriedade do concreto endurecido mais valorizada entre os projetistas. Ultimamente, com a introdução da verificação das estruturas também nos estados limites de utilização, o módulo de elasticidade, a porosidade e a resistência à tração passaram a ser propriedades merecedoras de uma avaliação mais precisa.

De acordo com Vasconcelos e Giamusso (2000) o procedimento de extrapolar o valor do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão apresenta uma dispersão de valores da ordem de até 25% que, nas estruturas atuais pode acarretar erros importantes.

A produção do concreto é uma atividade extremamente dinâmica. Trata-se de um material heterogêneo com variação da origem dos agregados, dos traços e dispersões na produção. Mesmo os componentes industrializados, como o cimento e os aditivos, podem sofrer alterações na sua composição em função de conjunturas econômicas. Atualmente, com a aceleração da economia, o acréscimo da demanda pode impor a necessidade de se lançar mão de materiais variados que estejam disponíveis no mercado no momento da produção.

Conforme Silva (1997) é grande a importância da realização de pesquisas específicas, adaptadas à realidade brasileira, com embasamento teórico experimental, utilizando-se materiais e procedimentos de produção nacional. Nessa linha, Nunes (2005) e Meireles Neto *et al.*, (2010) investigaram o módulo de elasticidade do concreto de maneira regionalizada.

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa: Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - PECC UnB.

Dentro do Programa, Silva (1997) e Lopes (1999) estudaram aspectos dos concretos de alto desempenho; Rodolpho (2007) e Santos (2008) pesquisaram a influência da areia britada no concreto; Pereira (2008) estudou o controle da resistência; e Joffly (2010) e Palacios (2012) pesquisaram a determinação da resistência à compressão do concreto.

O objetivo deste trabalho é o estudo do módulo de elasticidade dos concretos produzidos em Brasília e se mostra importante diante da ausência de pesquisa semelhante, inclusive

por propor a criação de um referencial inicial das condições físico-mecânicas do concreto da região.

### **1.1 - OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral deste trabalho é a investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília - DF a partir das características de produção de principais produtores da região.

### **1.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos constam da identificação e análise das propriedades físico-mecânicas dos concretos mais produzidos em Brasília, em três concreteiras independentes, que utilizam materiais e processos diferenciados, e numa situação normal de produção. Para isso serão tratados os seguintes aspectos:

- a) Investigar a principal classe mais produzido de concreto produzido atualmente em Brasília verificando possível alteração de suas características físico-mecânicas pela alteração dos materiais e/ou da produção.
- b) Investigar os fatores intervenientes na produção do concreto, bem como a influência dos parâmetros de mistura no desenvolvimento das propriedades físico-mecânicas dos concretos.
- c) Investigar a variabilidade das propriedades físico-mecânicas dos concretos em função das variações de produção e entre diferentes produtores.
- d) Correlacionar os valores de resistência à compressão e o módulo de elasticidade longitudinal.

### **1.3 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro composto pela introdução onde se encontram a importância do tema e descrição dos objetivos. No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica onde se procura apresentar o estado da arte do estudo do material concreto, no que concerne às suas propriedades físico-mecânicas, com enfoque no módulo de elasticidade. O programa experimental executado e a metodologia adotada estão apresentados no capítulo três, assim como, no quarto capítulo estão descritos os resultados encontrados e a discussão dos mesmos. No capítulo cinco o

trabalho é concluído apresentando, também, sugestões para trabalhos futuros. Em seguida, está listada a bibliografia utilizada e três anexos.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta revisão bibliográfica são abordados os fatores que definem as principais características físico-mecânicas do concreto normais, isto é, com resistência característica à compressão até 50 MPa, de acordo com a norma ABNT NBR 8953:2009, e os ensaios mais utilizados para a sua determinação.

### **2.1 – ASPECTOS DO CONCRETO**

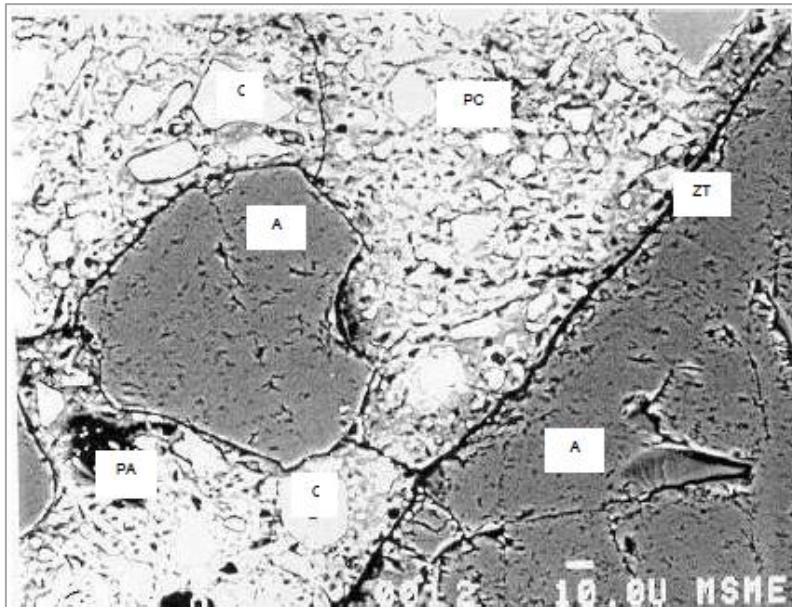
No mundo atual, o concreto é o material estrutural mais amplamente usado. São ao menos três as razões que favorecem a sua utilização: a primeira se relaciona com sua excelente resistência à água, sua aplicação varia da construção de fundações a telhados; a segunda razão é a variedade de formas e tamanhos que se pode obter de elementos estruturais em virtude da sua consistência plástica do concreto fresco; e o terceiro é o seu baixo em comparação a outros tipos de estrutura como aço e a madeira (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Popovics (1982) define o concreto como feito com os ingredientes básicos: cimento hidráulico geralmente cimento Portland, agregado(s) minerais e água, que contém alguma quantidade de ar e eventualmente adições de outros materiais. Acrescenta que, depois de misturadas, as partículas dos agregados são mantidas juntas pela pasta de cimento endurecida, o que lhe confere a característica de material compósito constituído por três fases: uma matriz de pasta de cimento, outra de agregados e uma região entre a matriz e o agregado, denominada zona de transição.

#### **2.1.1 - Microestrutura do concreto**

O concreto tem uma microestrutura altamente complexa e heterogênea acarretando na dificuldade de elaboração de modelos realistas para previsão do comportamento do material com confiabilidade. Entretanto o conhecimento tanto da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes, quanto da relação entre eles serve para auxiliar no controle das suas propriedades (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os três componentes da microestrutura do concreto, que regem suas propriedades, são a pasta de cimento hidratado, o agregado e a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, como representado Dal Molin (1995) na Figura 2.1.



A: agregados  
C: grão de cimento  
PC e PA: poros ou vazios  
ZT: zona de transição

Figura 2.1 - Representação dos principais componentes do concreto (DAL MOLIN, 1995).

De acordo com Paulon e Kirchhein (2011) a pasta de cimento que é produzida pela hidratação do cimento, cujos principais produtos são o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (C-S), é uma reunião relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados entre si por uma massa porosa contendo, em seu estado nativo, espaços com soluções e alguns vazios (poros). O sistema de distribuição de poros de concreto é fortemente influenciado por fatores como dosagem, cura, quantidade e tipo de adições (com efeitos físico ou químico) e aditivos químicos.

Os fatores mais importantes no estudo da microestrutura da pasta do cimento são a quantidade de água e o grau de hidratação do cimento. A pasta de cimento varia com a relação água/cimento utilizada, e sua importância é estabelecida também pelos efeitos produzidos sobre as propriedades do concreto (resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade). Quanto ao grau de hidratação, as particularidades da microestrutura desenvolvem-se rapidamente desde o contato do cimento com a água, apresentando mudanças mais rápidas nas primeiras idades.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o agregado é o principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades dependem principalmente da densidade e resistência do agregado que, por

sua vez, são determinadas mais por suas características físicas do que pelas características químicas.

Em concretos de densidade normal, com resistência característica à compressão até 80 MPa, os agregados, por serem mais densos e resistentes que os outros componentes, não têm influência direta na resistência visto que, o concreto quando comprimido, as fissuras se desenvolvem na matriz e na zona de transição da interface entre a matriz e agregado gráúdo. Já o concreto de alto desempenho, com resistência característica à compressão entre 80 MPa e 100 MPa, a melhora excepcional da pasta de cimento e da zona de transição devido a relação água/cimento e porosidade baixas em decorrência das adições, os agregados passam a ter influência por sua capacidade de carga ser aproximadamente igual à da pasta de cimento. (SILVA, 1997 apud ALMEIDA, 1994; ALMEIDA, 2005).

Na Figura 2.2, adaptada de Almeida, 2005 *apud* Mindess, 1983, é mostrada, a partir de modelação em computador, a propagação das fissuras contornando os agregados num concreto de densidade normal (a) e a propagação de fissuras num concreto de alta resistência onde algumas delas atravessam os agregados (b).

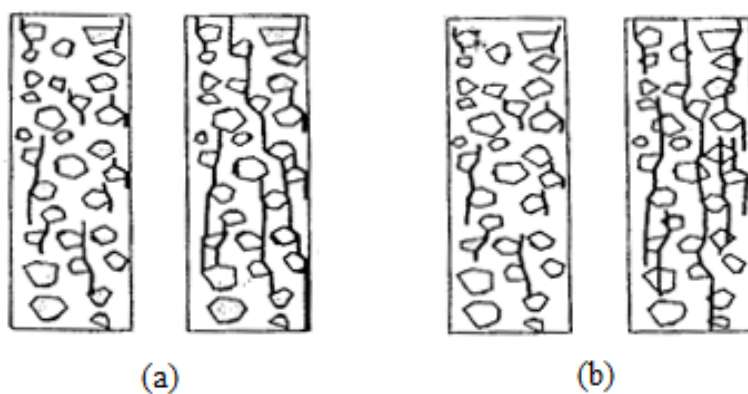


Figura 2.2 – Propagação das fissuras: (a) concreto de densidade normal; (b) concreto de alto desempenho (adaptada de ALMEIDA, 2005 *apud* MINDESS, 1983).

As rochas que apresentam melhores condições quando usadas na produção de agregado para concreto são os granitos e basaltos, devido à sua composição, textura e estrutura que tendem a produzir microestruturas mais densas e compactas. Outros tipos de rochas usadas, ainda que sua textura orientada possa ser limitante, são gnaisse e o quartzito. As rochas

menos aptas para a produção do concreto são os arenitos e os argilitos devido à sua grande porosidade e menor resistência mecânica (SBRIGHI NETO, 2005).

A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades de rochas utilizadas na produção de agregados para concretos. Nota-se uma grande variabilidade do módulo de elasticidade entre as diferentes rochas, evidenciando uma tendência de seu incremento quando menor absorção. Isso também foi constatado por Meireles Neto *et al.*, (2010). Não se observou uma relação direta entre o módulo de elasticidade e a massa específica.

Tabela 2.1 Propriedades típicas de rochas utilizadas na produção de agregados para concretos (SBRIGHI NETO, 2005).

Tipo de rocha	Resistência à compressão (MPa)		Absorção (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)
	Máximo	Mínimo			
Granito	240	100	0,1-0,80	2600/2700	40/70
Basalto compacto	280	180	0,1-0,6	2750/2950	60/100
Gnaisse	240	100	0,2-0,8	2550/2700	40/70
Calcário	200	90	0,2-4,5	2600/2800	30/50
Xisto	180	100	1,2-4,5	2300/2500	25/40
Quartzito	400	130	0,1-0,8	2550/2700	50/100
Arenito	150	50	1,2-8,5	2200/2400	20/40

Embora composta pelos mesmos elementos da pasta de cimento hidratado, a zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo é tratada separadamente devido às diferenças entre a sua microestrutura e propriedades. Inicialmente, no concreto recém-compactado, filmes de água se formam em torno das partículas do agregado graúdo, trazendo como consequência uma maior relação água/cimento que acarreta numa estrutura mais porosa e, portanto, menos resistente e de grande influência no módulo de elasticidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).



Segundo Paulon (2005) esta zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento pode ser considerada como um meio fortemente anisotrópico. Nesta zona interfacial, forma-se uma concentração de tensões sempre que o concreto for submetido a ações mecânicas. Isto faz com que seja o local das primeiras fissuras pelo fato de sua textura ser mais frágil que a do resto da pasta de cimento.

Em geral, vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição na interface do que na matriz da pasta, por isso têm um papel importante na determinação das relações tensão-deformação do concreto. Os fatores que controlam a porosidade da zona de transição na interface são: relação água/cimento; características de exsudação; adições minerais; granulometria; dimensão máxima e geometria do agregado; grau de adensamento, grau de hidratação; tempo de cura; temperatura; umidade e a interação química entre o agregado e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

No concreto de alto desempenho a adição de partículas minerais ultrafinas gera um efeito granular (físico) e/ou pozolânico (químico). No caso do efeito granular, a adição de um material com granulometria otimizada provoca o efeito fíler (ou de preenchimento de vazios) que colabora para aumentar a coesão e a compacidade tanto da pasta quanto da zona de transição. Já o efeito químico é resultante da reação pozolânica que transforma o frágil hidróxido de cálcio (C-H) no resistente silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Além disso, os materiais finos funcionam também como núcleos de cristalização do C-H, que passam de grandes cristais orientados preferencialmente na direção normal à superfície dos agregados para se formar em cristais menores e sem orientação preferencial. Com o fortalecimento da pasta de cimento e da zona de transição, o agregado também passa a participar ativamente das propriedades mecânicas do concreto, agora não mais regidas unicamente pela menor resistência da zona de transição como no caso do concreto de resistência normal (ALMEIDA, 2005; SILVA, 1987).

## **2.2 - MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL DO CONCRETO**

Sendo o concreto um material heterogêneo devido a suas fases componentes como foi apresentado anteriormente, é de esperar-se que as deformações destas fases submetidas a tensões sejam diferentes das do concreto propriamente dito. A Figura 2.3 mostra as curvas típicas de tensão-deformação do agregado, pasta de cimento hidratada e do concreto.

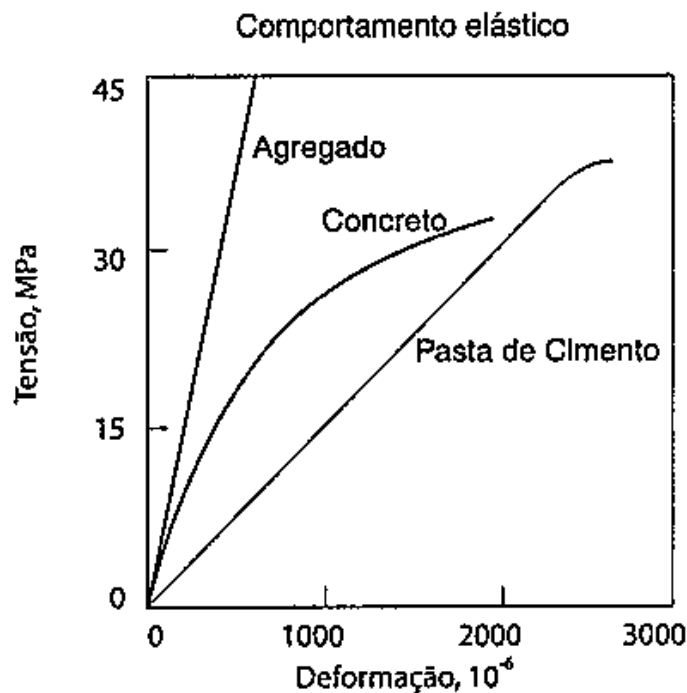


Figura 2.3 - Comportamento típico da curva tensão – deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto (NEVILLE, 1997).

Pode-se observar que a pasta de cimento hidratada e o agregado quando submetidos isoladamente a tensões de compressão apresentam curva tensão-deformação nitidamente lineares. Por outro lado, a curva tensão-deformação mostra um comportamento não linear que é explicado pelo surgimento de microfissuras na interface entre pasta de cimento e o agregado. Estas microfissuras evoluem fazendo ângulos com a tensão aplicada, favorecendo um acréscimo progressivo de tensões localizadas e do valor da deformação (NEVILLE, 1997).

### 2.2.1 - A importância do módulo de elasticidade

A norma ABNT NBR 6118:2007, assim como as normas mais importantes que tratam do projeto estrutural de concreto armado, determinam que as estruturas devem atender aos requisitos de qualidade que englobam a capacidade resistente (estado limite último - ELU), o desempenho em serviço e a durabilidade (estado limite de serviço – ELS).

No ELS são verificadas a durabilidade, a aparência, conforto do usuário e a boa utilização funcional tanto em relação aos usuários quanto em relação a máquinas e equipamentos que

podem ter o funcionamento comprometido quando apoiadas em estruturas sujeitas a deformações excessivas.

Além disso, no caso do concreto protendido, a deformação (encurtamento) provocada pela protensão aplicada provoca um encurtamento imediato na peça acarretando em perda de protensão devido ao afrouxamento dos cabos anteriormente protendidos.

A deformação de uma estrutura é função direta da tensão a que está submetida e do módulo de elasticidade do material que a constitui de acordo com a Equação 2.1:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

$\varepsilon$  = deformação

$\sigma$  = tensão

$E$  = módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade longitudinal, ou módulo de Young, de um material define o grau de deformação longitudinal deste material sob uma tensão axial imposta. É dado pela declividade de um segmento de reta tangente à origem do diagrama tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) ou pela declividade de um segmento de reta que passa pela origem e corta o mesmo diagrama no ponto correspondente a uma determinada tensão. A adoção de um tipo de segmento de reta ou do outro está explicada no item 2.2.2 a seguir.

Deste modo, tanto para atender os critérios funcionais da estrutura em serviço quanto no dimensionamento das peças no que concerne ao equilíbrio de forças atuantes na estrutura, no caso do concreto protendido, o módulo de elasticidade se impõe como uma grandeza importante e de grande influência no projeto estrutural.

### **2.2.2 - Os diversos tipos de módulo de elasticidade**

De acordo com Shehata (2005) na literatura são determinados três tipos de módulos de elasticidade:

- a. Módulo tangente é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão-deformação de compressão, mas em geral, quando se cita esse módulo sem especificar o ponto da curva, refere-se à origem, o seja, ao módulo tangente inicial.

Neste caso, corresponde na nomenclatura utilizada na norma ABNT NBR 6118:2007 e na norma ABNT NBR 8522:2008, ao módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial ( $E_{ci}$ ) que é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre  $\sigma_a = 0,5$  MPa e 30% da carga de ruptura ( $f_c$ ).

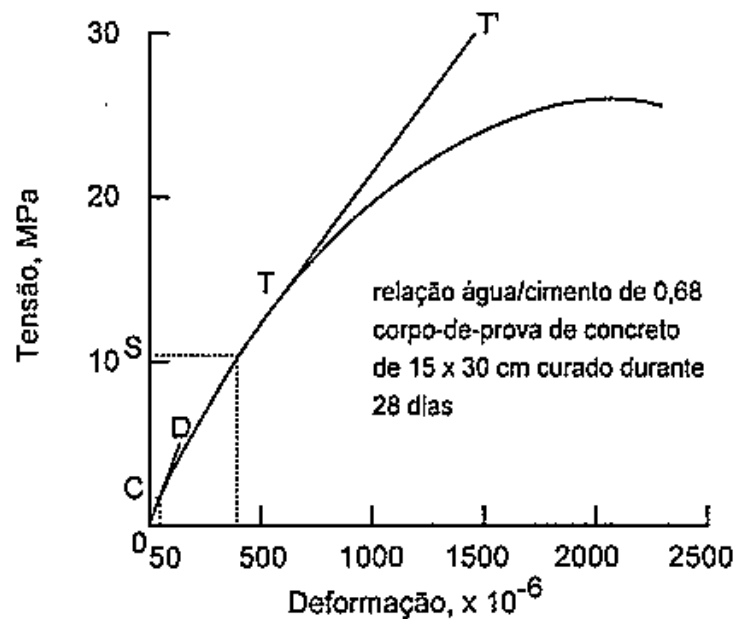
- b. Módulo secante é a relação entre uma tensão qualquer e a deformação a ela correspondente, isto é, o coeficiente angular da reta que liga os pontos da curva tensão-deformação correspondentes a essa tensão e a tensão igual a zero. Quando não se menciona a tensão, infere-se que o módulo secante seja relativo a uma tensão entre 40 e 50% da resistência à compressão.

Corresponde na nomenclatura utilizada na norma ABNT NBR 6118:2007 e na norma ABNT NBR 8522:2008 ao módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) a ser utilizado na determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço.

- c. Módulo cordal é definido pela reta que liga dois pontos quaisquer da curva tensão-deformação. É importante considerar que, sendo a menor tensão da reta relativa ao módulo cordal próxima de zero, os módulos cordal e secante para uma dada tensão praticamente se confundem e que, nos casos de concretos de resistência muito alta, os três módulos coincidem.

Além destes módulos de elasticidade outros tipos de módulo podem ser estabelecidos como módulo de elasticidade à flexão, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto entre outros (MELO E HELENE, 2002).

Na Figura 2.4 são representados os três tipos de módulo de elasticidade para um concreto de resistência à compressão ( $f_c$ ) de 26MPa.



O = origem  
 C = tensão correspondente a uma deformação longitudinal de  $50 \mu\text{m/m}$   
 S = tensão correspondente a  $40\%$  de  $f_c$

Figura 2.4 – Diferentes módulos de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O módulo tangente é dado pela declividade da reta  $TT'$ , tangente à curva tensão-deformação. O valor do módulo tangente inicial é dado pela declividade do segmento de reta correspondente às tensões O e D. O módulo secante é dado pela inclinação do segmento de reta correspondente às tensões O e S e, finalmente, o módulo cordal é dado pela inclinação do segmento correspondente às tensões C e S.

As normas brasileiras ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 8522:2008 adotam como segundo ponto da curva para a determinação dos módulos tangente e secante o valor correspondente a  $30\% f_c$  no lugar dos  $40\% f_c$  como definido anteriormente. O módulo de elasticidade é considerado igual ao um módulo de deformação devido ao fato do concreto, na tensão de  $30\% f_c$ , estar no regime elástico.

### 2.2.3 – Nomenclatura e modelos de previsão do módulo de elasticidade

Os tipos de módulo de elasticidade e terminologia adotada pela ABNT NBR 6118:2007 e pela ABNT NBR 8522:2008, estimativa do valor no caso de não serem feitos ensaios e em que tipo de análise devem ser utilizados encontram-se na Tabela 2.2.

Da mesma forma que a norma ABNT NBR 6118:2007, o ACI 318-08 e o CEB-FIP MC 90 estimam o módulo de elasticidade por meio de expressões empíricas a partir do conhecimento da resistência à compressão. Na Tabela 2.4 encontram-se as expressões indicadas para cada norma e sua faixa de aplicação.

As expressões da NBR 6118:2007 e do ACI 318-08 são praticamente a mesma com uma pequena diferença no arredondamento numérico, função da transformação de unidades imperiais para o sistema internacional, e abrangem um intervalo similar dentro das características dos concretos de resistência normal. Elas diferem no alerta do ACI que a faixa de valores medidos pode variar de 120 a 80% do valor estimado pelo fato de não ser considerada a natureza do agregado graúdo o que a norma brasileira não prevê.

O CEB-FIP MC 90 apresenta uma formulação com faixa de aplicação mais ampla (até 80 MPa) e considera no cálculo o valor da resistência aos 28 dias no lugar do valor característico adotado pela ABNT NBR 6118:2007 e pelo ACI 318-08.

Tabela 2.2 - Tipos de módulo de elasticidade e terminologia adotada pelas normas brasileiras, valor estimado e utilização (NBR 6118:2007)

Tipo de módulo de elasticidade e terminologia adotada pelas normas brasileiras	Valor estimado	Utilização
Módulo de elasticidade Módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% $f_c$ Módulo de deformação tangente à origem ou inicial Módulo de deformação secante ou cordal entre $\sigma_a$ e 30% $f_c$	$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2}$	Avaliação do comportamento global da estrutura e cálculo de perdas de protensão
Módulo de elasticidade secante Módulo de deformação secante	$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$	Análises elásticas, determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites últimos de utilização (ELU)

$E_{ci}$  e  $f_{ck}$  em MPa

De acordo com a ABNT NBR 12655:2006, a resistência à compressão característica do concreto é dada pela Equação 2.2.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad \text{Equação 2.2}$$

onde

$S_d$  = desvio padrão dos ensaios (MPa).

Quando  $S_d$  for desconhecido pode ser tomado ente 4 e 7 MPa dependendo da classe do concreto e do critério de medida dos componentes não podendo ser adotado  $S_d < 2$  MPa.

No caso do desvio-padrão ser desconhecido, deverá ser tomado o valor da Tabela 2.3, de acordo com as condições de preparo do concreto.

Tabela 2.3 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto (ABNT NBR 12655,2006)

Condição	Desvio-padrão (MPa)
A	4,0
B	5,5
C <sup>(1)</sup>	7,0

(1) Para condição de preparo C, e enquanto não se conhece o desvio-padrão, exige-se para os concretos de classe C15 o consumo mínimo de 350 kg de cimento por metro cúbico.

Conforme a mesma norma, as definições das condições de preparo são definidas a seguir:

- a) Condição A (aplicável às classes C10 até C80): o cimento e os agregados e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da unidade dos agregados.
- b) Condição B:
  - aplicável às classes C10 até C25: o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.

- aplicável às classes C10 até C25: o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. A umidade do agregado miúdo é determinada pelo menos três vezes durante o serviço do mesmo turno de concretagem. O volume de agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.

c) Condição C (aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15): o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

Na Figura 2.5 foram plotadas a equação preconizada pela ABNT NBR 6118:2007 e as equações do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90 nos seus limites superior e inferior. No caso da equação do CEB-FIP, o valor de  $f_{cm}$  foi substituído pelo valor do  $f_{ck}$  acrescentado de 8 MPa. Nesta representação é possível constatar as mesmas tendências entre as curvas. Pode-se notar também que a norma brasileira tende a ser uma média entre as bandas definidas pelo CEB e pelo ACI e que a variação do agregado acarreta em diferenças significativas do módulo de elasticidade.



Tabela 2.4 – Expressões empíricas da NBR 6118:2007, do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90 correlacionando o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão

Norma	Valor estimado do módulo de elasticidade secante (MPa)	Faixa de aplicação e características da reta
NBR 6118:2007	$E_{cs} = 4760 f_{ck}^{1/2}$	Para $f_{ck} \leq 50$ MPa. Secante traçada do ponto de tensão de 0,5 MPa até à tensão correspondente a 30% $f_c$ . $f_{ck}$ = resistência à compressão característica (MPa).
ACI 318-08	$E_c = 4730 f_c'^{1/2}$	Para $f_c' \leq 40$ MPa. Secante traçada do ponto de tensão nula até à tensão correspondente a 45% $f_c'$ . $f_c'$ = resistência a compressão especificada aos 28 dias (MPa) = $f_{ck}$ . A faixa de valores medidos pode variar de 120 a 80% do valor estimado.
CEB-FIP MC 90	$E_c = 18275 (f_{cm}/10)^{1/3}$	Para $f_{cm} \leq 80$ MPa. Secante traçada do ponto de tensão nula até à tensão correspondente a 40% $f_{cm}$ . Válida para agregados de granito e gnaiss. Para basalto, multiplicar por 1,2. Para calcário, multiplicar por 0,9. Para arenito, multiplicar por 0,7. $f_{cm}$ = resistência média à compressão = $f_{ck} + 8$ (MPa)

Notas:

1. Expressões para corpos de prova cilíndricos.
2. De acordo com o CEB-FIP MC 90,  $f_{cm} = f_{ck} + 8$  (MPa)

Se for tomado o caso de um concreto de resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa, a norma brasileira indicará um valor do módulo de elasticidade de 26,1 GPa sem considerar o agregado utilizado enquanto o valor indicado pelo CEB-FIP poderá ser de 20 ou 34,2 GPa, conforme o agregado. Relativamente à NBR 6118:2007, a faixa de variação conforme o CEB-FIP ficará então entre +31% e -23%, excessiva para fundamentar o cálculo das deformações de uma estrutura.

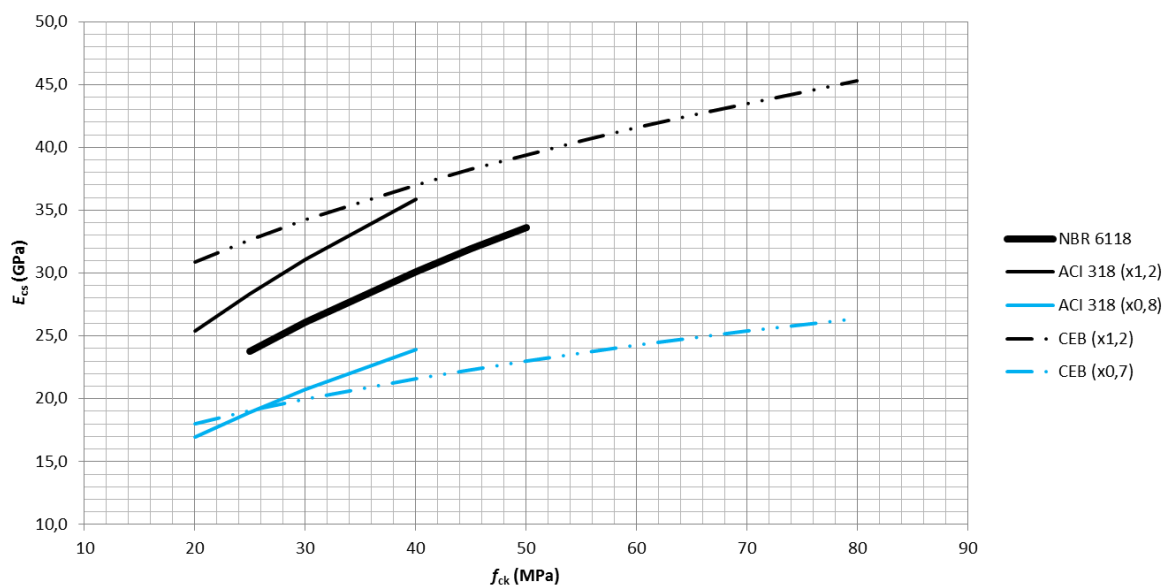


Figura 2.5 – Aplicação das expressões empíricas da NBR 6118:2007, do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90, nos seus limites inferior e superior, correlacionando o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ).

#### 2.2.4 - Fatores que afetam o módulo de elasticidade

O valor do módulo de deformação de um material é determinado por sua composição e, apenas indiretamente, relacionado com as demais propriedades mecânicas (Van Vlack, 1970). Segundo Vasconcelos e Giammusso (1998), Wan e Li (2006) e Mehta e Monteiro (2008), em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, características como a fração volumétrica, a massa específica, o módulo de deformação dos principais constituintes, as características da zona de transição e também os parâmetros de ensaio determinam o comportamento elástico do compósito.

Silva (2003) *apud* Barbosa (2009) estudou o módulo de elasticidade tangente inicial de concretos com 28 dias da região de Goiás para três tipos de agregados graúdos: calcário, seixo e basalto. Na pesquisa observaram-se valores mais elevados do módulo de elasticidade para o basalto seguido do calcário e por último o seixo.

O melhor desempenho do concreto com agregado basalto em relação ao concreto com calcário e este em relação ao concreto com seixo é explicado pelo fato do basalto ter porosidade<sup>1</sup> menor (<1,5%) que o calcário (5%) que, por sua vez, tem porosidade menor do que a do seixo (entre 20 e 47%). A menor porosidade determina uma maior rigidez que,

<sup>1</sup>A porosidade é dada pela razão entre o volume de vazios de uma amostra de rocha e o seu volume total.

deste modo, controla a capacidade do agregado restringir a deformação da matriz, acarretando num maior módulo de elasticidade.

Na Tabela 2.5 encontram-se as razões entre os valores do módulo de elasticidade do basalto relativamente aos outros dois agregados estudados por Silva (2003) nas diversas relações água/cimento além da razão entre os fatores de correção da equação que estima o módulo de elasticidade em função da resistência à compressão, relativamente ao basalto, como preconizado pelo CEB-FIP MC 90. Constatou-se que a relação entre os módulos, mesmo que não sejam iguais aos valores indicados pelo CEB-FIP (basalto = 1,2, calcário = 0,9 e arenito = 0,7), que a NBR 6118:2007 deveria contemplar a natureza do agregado graúdo na estimação do módulo de elasticidade.

Tabela 2.5 - Relação entre a razão dos módulos de elasticidade de concretos com diferentes agregados confrontado com os fatores de correção da expressão para determinação do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do CEB-FIP MC 90 (SILVA, 2003)

<b>Relação água/cimento</b>	<b>Relação entre <math>E_{ci}</math> basalto e <math>E_{ci}</math> calcário</b>	<b>Relação entre <math>E_{ci}</math> basalto e <math>E_{ci}</math> seixo</b>
0,35	1,29	1,50
0,50	1,23	1,43
0,70	1,20	1,45
Relação entre fatores de correção conforme CEB-FIP (basalto como referência)	$1,2/0,9 = 1,33$	$1,2/0,7 = 1,71$

Outras propriedades do agregado também influenciam o módulo de elasticidade do concreto. A dimensão, forma, textura superficial, distribuição granulométrica e composição do agregado podem influenciar a maior ou menor fissuração na zona de transição na interface e, assim, afetar a forma da curva tensão-deformação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ainda sobre a dimensão máxima do agregado, Barbosa *et al.*, (1999) estudaram concretos com agregado graúdo de basalto de dimensão máxima de 19,5 mm e 9,5 mm e constatou que os concretos produzidos com o agregado com maior dimensão máxima apresentaram um maior valor do módulo de elasticidade relativamente a concretos com agregado de menor dimensão máxima em todas as idades, como pode ser visto na Figura 2.6.

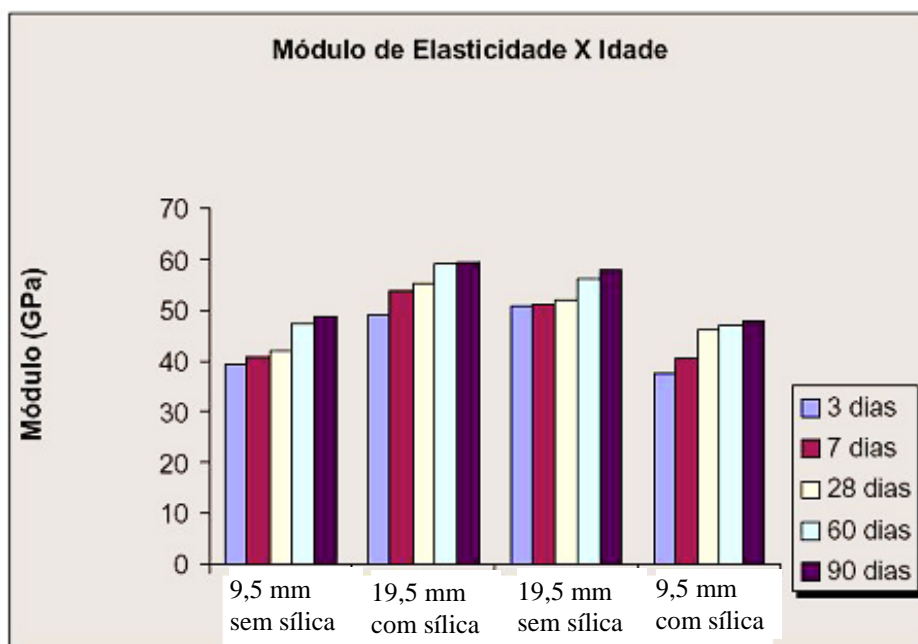


Figura 2.6 - Influência do tamanho do agregado e adição de microssílica no módulo de elasticidade (BARBOSA, 1999).

Gagliardo *et al.*,(2010) pesquisando o módulo de elasticidade para concretos com agregados de mesma mineralogia, verificaram uma ligeira variação nos valores do módulo de elasticidade em função das diferentes proporções adotadas para cada dimensão de agregado. O mesmo não aconteceu quando compararam concretos com mineralogias diferentes (basalto e gnaiss). Além disso, observaram um incremento do valor do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com maior teor de agregados com maior dimensão (brita 1) que nos concretos produzidos com agregados com menor dimensão (brita 0). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 2.7.

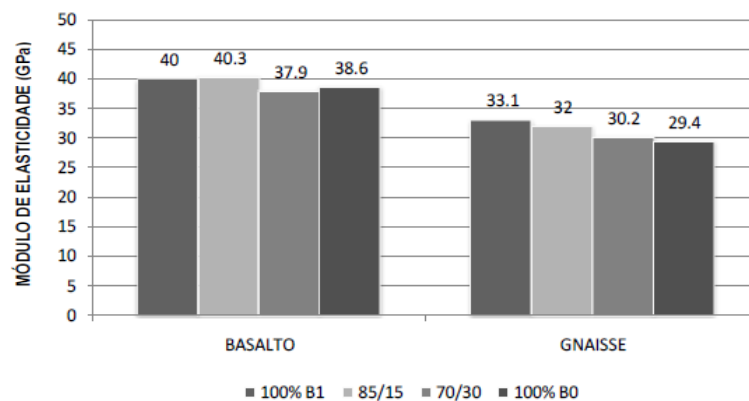


Figura 2.7 - Influência da mineralogia e tamanho do agregado no módulo de elasticidade (GAGLIARDO *et al.*, 2010).

Referente ao teor de agregados Melo e Helene (2002), diferentemente do que consta na bibliografia corrente como Li *et al.*, (1999), observaram na sua pesquisa uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregados para os traços de abatimento constante. Isto se deve ao fato que, ao se aumentar o teor de agregados, deve ser aumentada a relação água/cimento para que o abatimento se mantenha constante resultando numa pasta de cimento mais fraca, o que diminui o módulo de elasticidade. Caso seja mantida constante a relação água/cimento e seja aumentado o teor de agregados, ocorre um aumento do módulo de elasticidade em razão da maior quantidade de agregados graúdos, que possui um módulo de elasticidade maior do que o da pasta de cimento.

O módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado por sua porosidade. Os fatores preponderantes são a relação água/cimento, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento.

A importância da relação água/cimento pode ser observada na Figura 2.10, página 22. Nela pode ser constatado que, no caso do concreto produzido com agregado de origem calcária, a alteração da relação água/cimento de 0,35 para 0,70 diminuiu em 23,3% o valor do módulo de elasticidade.

Na Figura 2.3, conforme mostrado anteriormente na página 9, encontra-se o comportamento típico das curvas tensão-deformação dos componentes do concreto. Nela, observa-se que o comportamento elástico da pasta de cimento e do agregado são bastante diferentes do comportamento da curva do concreto.

Hashin e Monteiro (2002) estimaram o valor do módulo de elasticidade em 50% do valor do módulo de elasticidade da pasta de cimento que, segundo Mehta e Monteiro (2008), podem atingir valores entre 7 e 28 GPa.

Os parâmetros de mistura influem no módulo de elasticidade quando modificam a relação entre agregados e pasta de cimento. Na Figura 2.8 do trabalho original de Melo Neto e Helene (2002) é apresentada a variação do módulo de elasticidade com a variação do consumo de cimento mantendo-se a relação água/cimento constante onde se pode notar que, com o aumento do consumo de cimento, há um decréscimo do módulo de elasticidade.

A explicação reside no fato de que a manutenção da relação água/cimento acarreta numa diminuição do teor de agregados e conseqüentemente aumento da pasta de cimento que, como já visto, contribui de forma a diminuir o módulo de elasticidade.

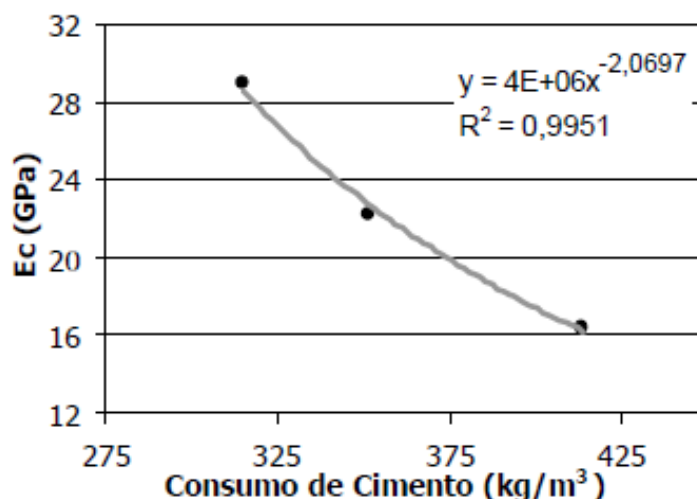


Figura 2.8 – Relação entre o módulo de elasticidade e o consumo de cimento mantendo a relação água/cimento constante (MELO NETO e HELENE, 2002).

Por outro lado, se o abatimento for mantido e o consumo de cimento for aumentado, a relação água/cimento diminuirá, aumentando o módulo de elasticidade como mostra a Figura 2.9.

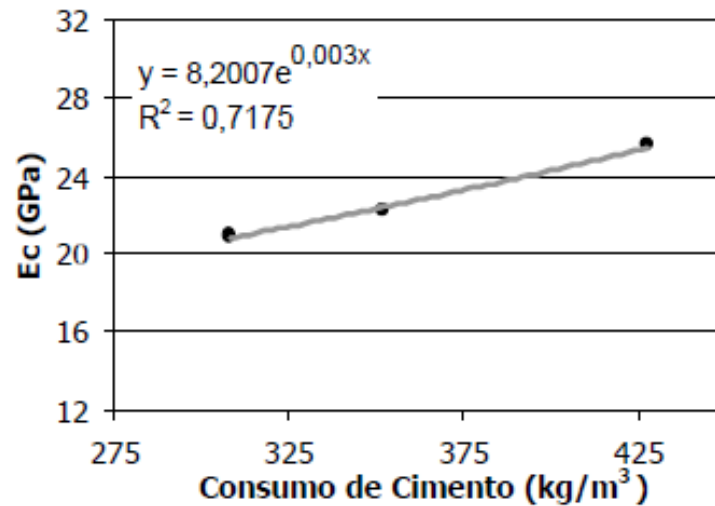


Figura 2.9 – Relação entre o módulo de elasticidade e consumo de cimento mantendo o abatimento constante (MELO e HELENE, 2002).

Silva (2003) *apud* Barbosa (2009) obteve na sua pesquisa uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da relação água/cimento para concretos com diferentes tipos de agregados, como apresentado na Figura 2.10. O paralelismo das curvas indica a independência entre os fatores relação água/cimento e característica do agregado graúdo.

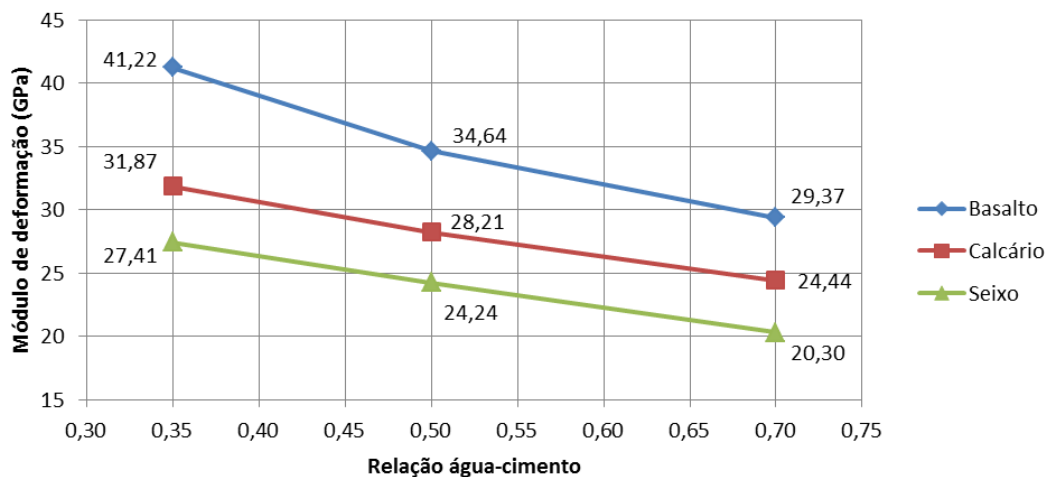


Figura 2.10 - Comportamento do módulo de elasticidade de concretos com 28 dias da região de Goiás com variação da relação a/c e agregado graúdo (SILVA, 2003).

É conhecido que o uso de adições minerais no concreto gera melhorias nas suas propriedades, especialmente na redução da zona de transição e no refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento que são fatores intervenientes no módulo de elasticidade. Do mesmo modo, as adições minerais atuam no processo de hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que é o principal

componente responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas (DAL MOLIN, 2011; ANDRADE e TUTIKIAN, 2011).

Pesquisadores como Dal Molin e Monteiro (1996), Barbosa *et al.*, (1999) e Vogt *et al.*, (2006) constataram que adição de sílica ativa e escória de alto-forno resultou no aumento do módulo de elasticidade.

Vogt *et al.*,(2006) observaram que alguns corpos de prova com adições (sílica e escória) apresentaram variações de até 20% no módulo de elasticidade. Estas variações podem ser visualizadas na Figura 2.11, onde são apresentados os valores médios aos 28 dias para o módulo de elasticidade dinâmico medido em dois corpos de prova para cada concreto em estudo (sem adição, 6% de adição de sílica e 35% de adição de escória). Pode-se observar que a adição de 35% de escória de alto forno granulada promove um pequeno aumento (10%) no módulo de elasticidade dinâmico e a adição de 6% de sílica ativa, não afeta o módulo de elasticidade dinâmico. Isto, segundo os autores, poderia estar relacionado com a proporção de poros presentes na amostra.

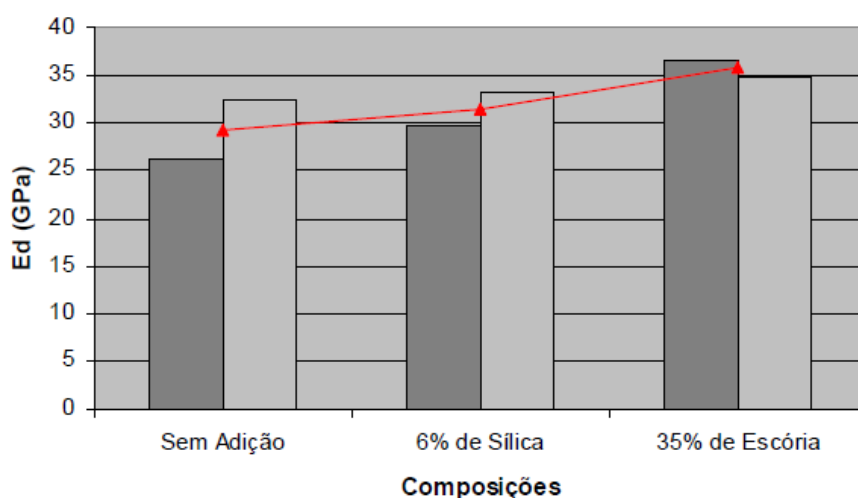


Figura 2.11 - Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico de dois corpos de prova em função de adições no concreto.

Outro fator que afeta o módulo de elasticidade do concreto são os parâmetros de ensaio. Segundo Mehta e Monteiro (2008) independentemente das dosagens ou do tempo de cura, corpos de prova de concreto que são ensaiados em condições úmidas apresentam módulo de elasticidade cerca de 15% mais alto do que corpos de prova quando ensaiados em condição seca. É interessante notar que a resistência à compressão do corpo de prova se



comporta de maneira oposta, ou seja, a resistência é cerca de 15% mais alta quando os corpos de prova são ensaiados em condição seca. A secagem do concreto parece influir no aumento da resistência da matriz da pasta de cimento por conta do aumento da força de atração de Van der Waals enquanto a zona de transição perde resistência devido à microfissuração. A resistência à compressão do concreto aumenta quando a matriz determina a resistência enquanto o módulo de elasticidade diminui sensivelmente com o aumento da microfissuração da zona de transição.

De acordo com Neville (1997) e Wang e Li (2006) as condições do corpo de prova avaliado também podem influenciar no valor do módulo de elasticidade. Já que saturado apresenta maiores módulos de elasticidade do que seco, como observado na Figura 2.12 (NEVILLE, 1997).

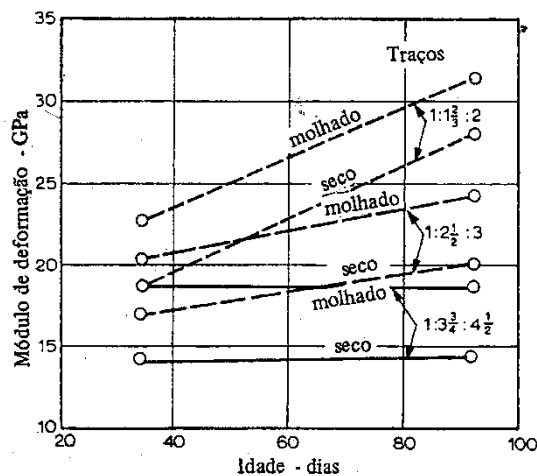


Figura 2.12 - Influência da condição de umidade do corpo de prova sobre o módulo secante de elasticidade (NEVILLE, 1997).

A taxa de aplicação da carga também influencia no módulo de elasticidade. O aumento da deformação, ou parte dela, durante o tempo longo de carga é devido à fluência do concreto e, de maneira oposta, quando a carga é aplicada muito rapidamente as deformações observadas são reduzidas enormemente (NEVILLE, 1997).

Da Figura 2.13 pode-se observar que, ao aumentar tempo de carregamento de 5 segundos até 2 minutos, a deformação do material pode aumentar até 15%. No entanto, entre 2 e 10 minutos, ou mesmo até 20 minutos, o aumento da deformação é bem pequeno. Pode-se dizer que um aumento aproximado de 15% na deformação equivale a cerca de 13% de redução do módulo de elasticidade.

O aumento da deformação apresentada durante o período de carregamento é devido à fluência do concreto, mas, como a deformação instantânea depende da velocidade de carregamento, torna-se difícil a distinção entre a deformação elástica e a deformação por fluência e o aumento subsequente é admitido tão somente como devido à fluência. Assim é adotado o seguinte critério: a deformação que ocorre durante o carregamento é considerada elástica e o aumento subsequente é admitido como devido apenas à fluência (FURNAS, 1997).

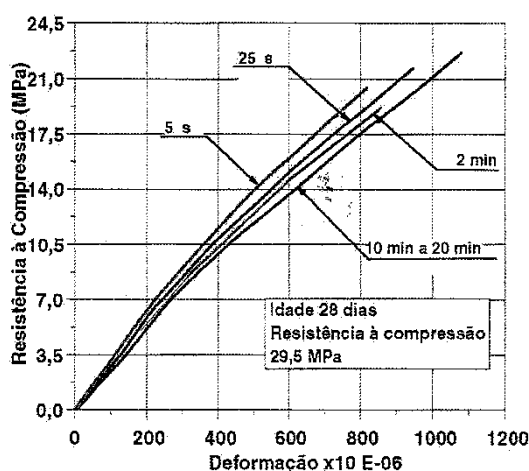


Figura 2.13 - Influência da velocidade de carga na determinação do módulo de elasticidade (TROXELL, 1968 *apud* E. FURNAS, 1997).

Outro fator interveniente no módulo de elasticidade é a dimensão dos corpos de prova, de acordo como Malaikah (2004), o módulo de elasticidade medido de corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm são maiores em 6 % que os obtidos de cilindros de 150 mm x 300 mm.

### 2.3 - RESISTÊNCIA DO CONCRETO À COMPRESSÃO

A resistência do concreto à compressão pode ser definida como a tensão última aplicada ao elemento que provoca sua desagregação. É a tensão máxima que uma peça de concreto é capaz de suportar sem romper ou apresentar deformação e/ou fissuração de tal modo excessivo que a torne inutilizável. É uma propriedade importante do concreto principalmente por ser um indicador direto da sua capacidade para resistir esforços.

Os ensaios de resistência à compressão são relativamente fáceis de realizar e, para tal, são utilizados corpos de prova padronizados. Assim como os corpos de prova, são padronizados, também, a moldagem, o tempo em que os corpos de prova ficam nas fôrmas, tempo e tipo de cura e velocidade de carregamento. São ensaios muito utilizados inclusive pela possibilidade de, a partir da resistência à compressão, se desenvolver correlações com outras propriedades cujos ensaios resultam mais complicados de ser realizados (OZYILDIRIM e CARINO, 2006).

A resistência do concreto é obtida de suas características na execução como a dosagem, trabalhabilidade, durabilidade, tipo e classe de cimento e relação água/cimento. A resistência à compressão é, portanto, a propriedade do concreto que geralmente direciona o projeto de uma estrutura. É amplamente usada como um índice para a determinação de todos os outros tipos de resistência (HELENE e TERZIAM, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O concreto é classificado em dois grupos de resistência à compressão de acordo com a norma ABNT NBR 8953:2009. Nos grupos I e II, os concretos com massa específica compreendida entre 2.000 kg/m<sup>3</sup> e 2.800 kg/m<sup>3</sup>, são designados pela letra C seguida de um número que representa a resistência característica ( $f_{ck}$ ), definidos como:

- Grupo I: C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50.
- Grupo II: C55, C60, C70, C80 e C100

### **2.3.1 - Fatores que afetam a resistência do concreto à compressão**

Na resistência do concreto podem intervir diversos fatores que podem ser divididos em três categorias: parâmetros da mistura, condições de cura e parâmetros de ensaio.

Como os agregados naturais são geralmente mais densos e resistentes que a matriz pasta de cimento, tanto a porosidade da matriz quanto a porosidade da zona de transição na interface entre a matriz e agregado graúdo normalmente determinam a resistência característica do concreto de densidade normal, isto é, concretos com resistência característica à compressão até 50 MPa (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em 1918, Duff Abrams percebeu a existência de uma relação entre relação água/cimento e resistência do concreto que ficou conhecida com lei de Abrams. Isso é explicado, em

concretos de baixa e média resistências, a partir da compreensão dos fatores responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada e do efeito do aumento da relação água/cimento na porosidade, pelo enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade função do aumento da relação água/cimento.

Neville (1997) afirma que a lei de Abrams, na realidade, é um caso particular da regra geral proposta por Fere em 1986 que leva em conta os vazios de ar.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) quando vazios de ar são incorporados ao sistema, ou como um resultado do adensamento inadequado ou pelo uso de aditivos incorporadores de ar, além dos efeitos desejáveis quanto, por exemplo, à trabalhabilidade do concreto, esses vazios também têm o efeito de aumentar a porosidade e, conseqüentemente, diminuir a resistência do sistema.

A Figura 2.14 mostra o comportamento da resistência à compressão no que concerne à relação água/cimento e o melhor desempenho do concreto vibrado comparado ao concreto submetido a adensamento normal.

De acordo com Jacintho e Giongo (2005) tanto a relação água/cimento quanto o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta de cimento endurecida. Sob condições-padrão de cura, o cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial) hidrata-se mais rapidamente que o cimento CP I (comum). Assim, um concreto produzido com CP V com pequena idade de hidratação e uma dada relação água/cimento, terá menor porosidade, acarretando uma matriz de maior resistência do que um concreto contendo CP I.

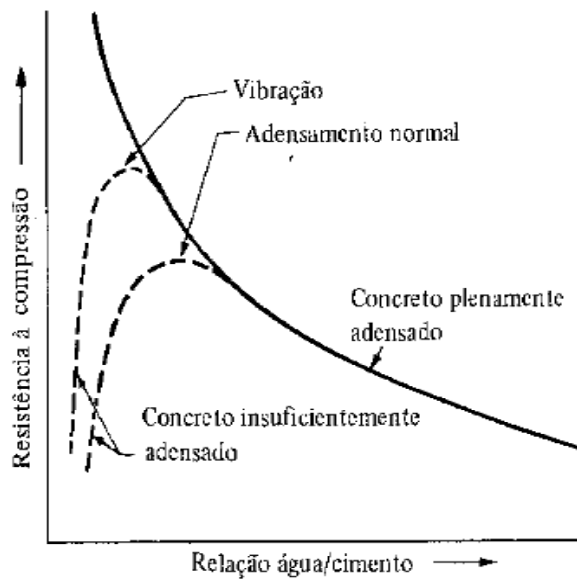


Figura 2.14 - Resistência em função da relação água/cimento (NEVILLE, 1997).

A Figura 2.15 mostra a influência da relação água/cimento e a idade na resistência à compressão do concreto submetido à cura úmida.

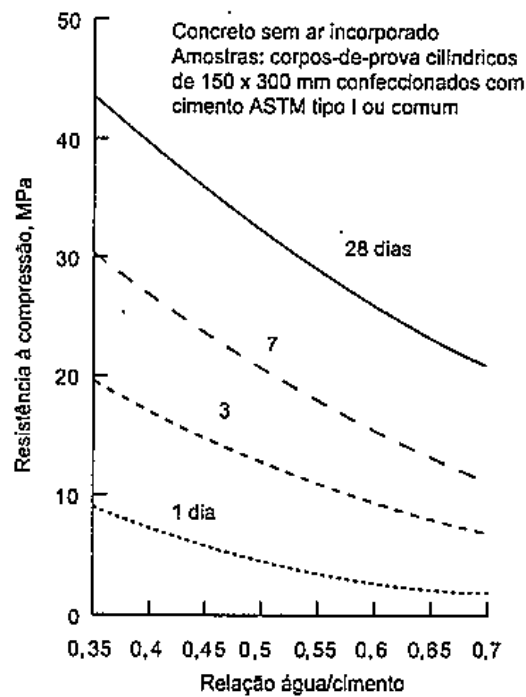


Figura 2.15 - Influência da relação a/c e a idade na resistência do concreto submetido a cura úmida (COUTINHO E GONÇALVES, 1994).

Para dosagens compreendidas ente  $200 \text{ kg/m}^3$  e  $400 \text{ kg/m}^3$ , a cada  $50 \text{ kg/m}^3$  de aumento da dosagem de cimento, a resistência do concreto sobe 20% na compressão e 10% na flexão. Estes crescimentos pressupõem, que a natureza do cimento, a trabalhabilidade e as condições de cura se mantêm constantes. A influência da dosagem de cimento na resistência à compressão e na resistência à flexão do concreto pode ser visualizada na Figura 2.16 (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

Apesar dos agregados naturais, por serem mais resistentes que a matriz pasta de cimento, não serem determinantes na resistência à compressão característica dos concretos de densidade normal, outras propriedades dos agregados além da resistência, tais como: dimensão, forma, textura superficial, granulometria (distribuição do tamanho das partículas) e mineralogia são conhecidas por afetar a resistência do concreto. Isto se deve pelo fato destas propriedades poderem determinar a alteração da relação água/cimento do concreto e consequentemente sua resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

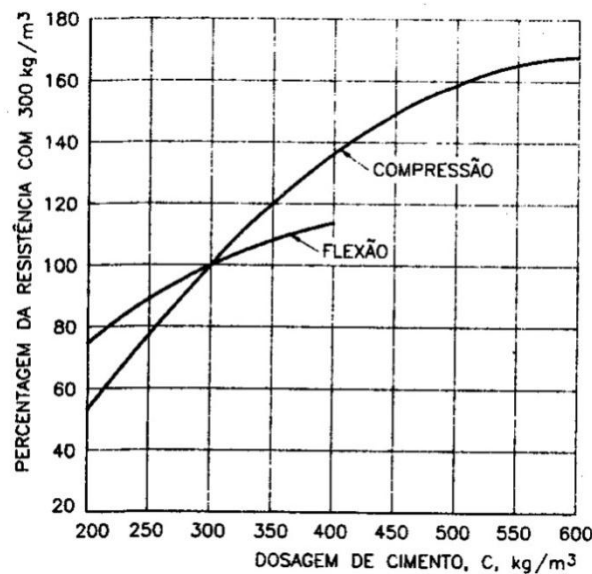


Figura 2.16- Influência da dosagem do cimento na resistência a compressão e na resistência à flexão (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

De acordo com Jacintho e Giongo (2005) concretos com partículas de agregados graúdos maiores, para o mesmo teor de cimento e mesma consistência, requerem menos água de amassamento do que concretos com partículas menores. No entanto, partículas grandes

tendem a formar zonas de transição mais fracas, contendo mais microfissuras. O efeito resultante variará com a relação água/cimento do concreto e a tensão aplicada.

Evangelista (2002) comparou as resistências de concretos com britas com  $D_{m\acute{a}x}$  de 19 mm e  $D_{m\acute{a}x}$  de 9,5 mm e observou que, para os concretos com relação a/c de 0,65 e 0,60, as diferenças são pequenas, cerca de 3% a 13 % maiores para os concretos com  $D_{m\acute{a}x}$  de 19 mm, como representado na Figura 2.17 (a). Quando a relação a/c diminui para 0,50, 0,45 e 0,40, as resistências dos concretos com  $D_{m\acute{a}x}$  de 19 mm passam a ser de 6% a 49% maiores, como representado na Figura 2.17 (b).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) uma mudança na dimensão máxima de um agregado graúdo com boa distribuição granulométrica de uma dada mineralogia pode ter dois efeitos opostos na resistência do concreto. Com o mesmo consumo de cimento e consistência, dosagens de concreto contendo partículas maiores de agregado requerem menos água de amassamento do que as que contêm agregados menores. Por outro lado, agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface mais fraca, contendo mais microfissuras.

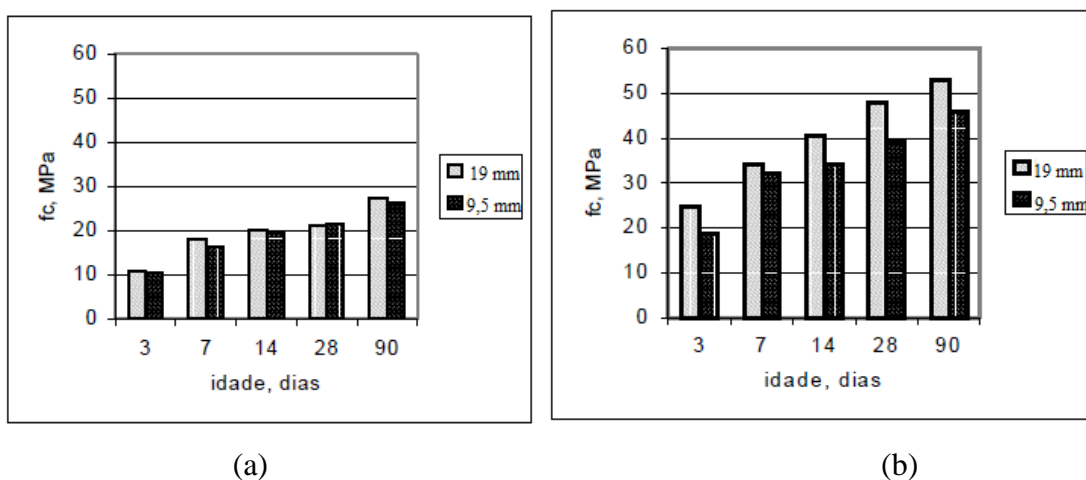


Figura 2.17 - Influência do  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado em  $f_c$  dos concretos com (a)  $a/c = 0,65$  e (b)  $a/c = 0,40$  (EVANGELISTA, 2002).

De outra forma, a distribuição granulométrica do agregado graúdo é alterada, mantendo constante a dimensão máxima e a relação água/cimento, pode influenciar a resistência do concreto devido à alteração da consistência e da exsudação da mistura. Assim, deve-se buscar uma distribuição granulométrica equilibrada que resultará em concretos mais trabalváveis e econômicos, além de proporcionar uma estrutura interna do concreto mais

fechada, com menos vazios, e uma maior dificuldade de penetração dos agentes agressivos (SBRIGHI NETO, 2005).

Os aditivos também têm influência na resistência à compressão. Os aditivos redutores de água podem gerar tanto um incremento da resistência inicial como na resistência final do concreto pela redução da relação a/c. Os retardadores e aceleradores têm influência no desenvolvimento da resistência, entretanto, as resistências finais podem não ser significativamente afetadas.

Já os incorporadores de ar podem melhorar a trabalhabilidade (abatimento e fluidez), aumentar a coesão da mistura e reduzir a segregação e exsudação. No entanto, quando a quantidade de ar é excedida, pode-se esperar um retardo da pega e redução da resistência à compressão (HARTMANN *et al.*, 2011).

As substituições do cimento por materiais pozolânicos formam um silicato de cálcio adicional, levando a uma redução da porosidade da matriz e da zona de transição, gerando um concreto mais impermeável e de maior resistência final. A reação pozolânica por ser mais lenta faz com que o concreto desenvolva a resistência mais tardiamente, entre 7 e 15 dias após a mistura (METHA e MONTEIRO, 2008).

A relação entre o acréscimo de resistência do concreto com o maior grau de hidratação do cimento fica evidenciada no estudo de Espinoza-Hijazin e Lopes (2010) sobre a cura interna de concreto<sup>2</sup> que constata aumento de 19% na tensão de compressão e diminuição de 30% na permeabilidade além do acréscimo do módulo de elasticidade de concretos quando submetidos à cura interna relativamente a concretos curados normalmente.

A Figura 2.18 mostra o ganho de resistência aos 90 dias de concretos submetidos a cura interna com relação água/cimento variando de 0,40 até 0,50.

---

<sup>2</sup> Cura interna é um método de cura normalmente aplicado a concretos com baixa relação a/c e que consiste na adição de reserva de água de cura no interior do concreto. Neste estudo foi usada argila expandida como agente de cura interna (Espinoza-Hijazin e Lopes 2010).



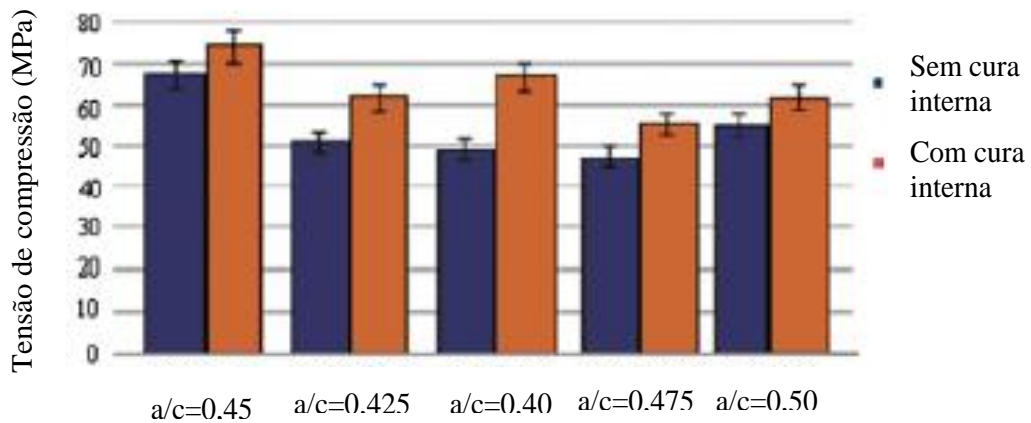
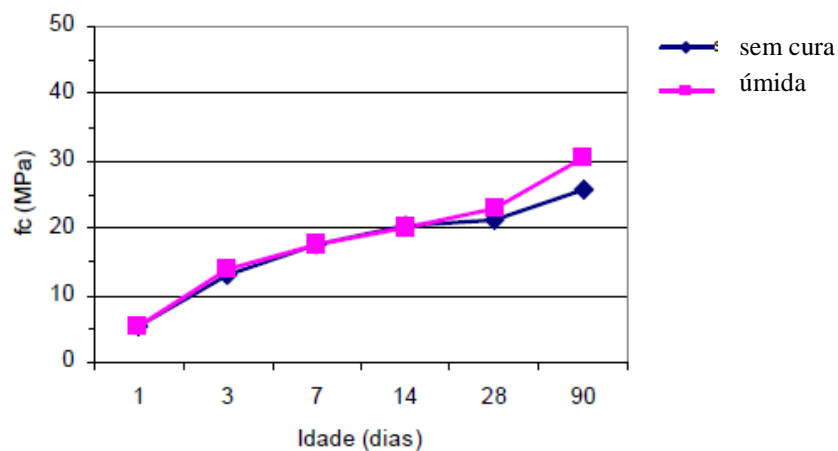


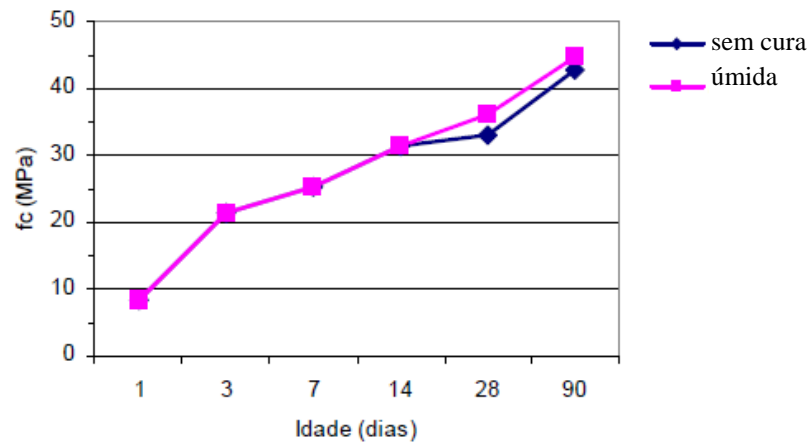
Figura 2.18 - Tensão de compressão aos 90 dias (ESZPINOZA-HIJAZIN e LOPES, 2010).

Câmara (2006) observou na sua pesquisa que a cura úmida apresentou uma influência positiva na evolução da resistência à compressão em todas as misturas de concreto, embora não semelhantes. O concreto com cura úmida de 20 MPa apresentou um ganho de 19% na resistência à compressão aos 90 dias, enquanto que para os concretos de 30 MPa foi de 4%, como observado na Figura 2.19.

De acordo com Coutinho e Gonçalves (1994) a presença de água nos poros do cimento hidratado permite a hidratação contínua do material o que acarreta no aumento da tensão de ruptura. Assim, devido ao fenômeno da condensação capilar, a quantidade de água livre no interior do concreto é função da umidade relativa do ar e, portanto, a progressão da resistência é diferente conforme a conservação seja feita na água ou ao ar, nas diversas umidades relativas (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).



(a)



(b)

Figura 2.19 - Influência do tipo de cura na resistência à compressão para concreto (a) 20MPa e (b) 30 MPa (CÂMARA, 2006).

Alguns parâmetros que podem ser mencionados são a geometria do corpo de prova, as condições de moldagem, a condição do topo e da base, a umidade do corpo de prova, além da influência das máquinas de ensaios e a velocidade de carregamento durante o ensaio.

A norma ABNT NBR 5739:2007 estabelece que os corpos de prova devem atender a relação altura/diâmetro nunca maior do que 2,02 e, caso de esta relação seja menor de que 1,94, devem ser efetuadas as correções dispostas nesta norma.

Segundo Coutinho e Gonçalves (1994) existem fatores que dificultam o estabelecimento de uma relação numérica precisa com relação às dimensões dos corpos de prova para a mensuração da resistência. Um deles é o aumento significativo do atrito existente entre o prato da prensa e o corpo de prova, com o acréscimo nas dimensões do mesmo. Quanto maior esta relação, menor será a resistência do corpo de prova como apresentado na Figura 2.20. É importante destacar que, atualmente, a relação altura/diâmetro igual a dois é a mais utilizada na avaliação da resistência à compressão axial dos concretos.

Outro fator é a ser considerado é o equipamento utilizado já que deve permitir controlar os níveis de carga sem influenciar na dinâmica do rompimento, pois os níveis de carga podem se elevar a valores nos quais não se pode garantir a indeformabilidade da prensa.

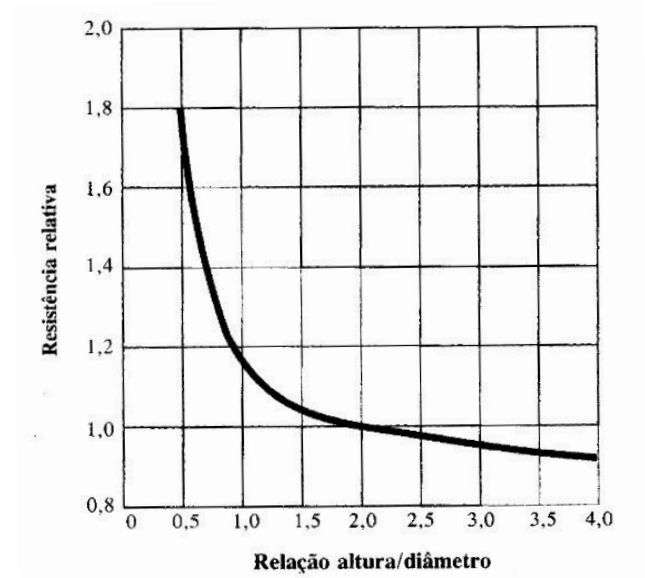


Figura 2.20- Influência da relação altura/diâmetro sobre a resistência aparente de um cilindro (NEVILLE,1997).

Devem ser também consideradas as condições das bases e topos dos corpos de prova para evitar transferências irregulares das tensões aplicadas ocasionado erros na determinação da resistência. Na Figura 2.21 se apresenta a interferência do desvio de plano na resistência à compressão em corpos de prova cúbicos.

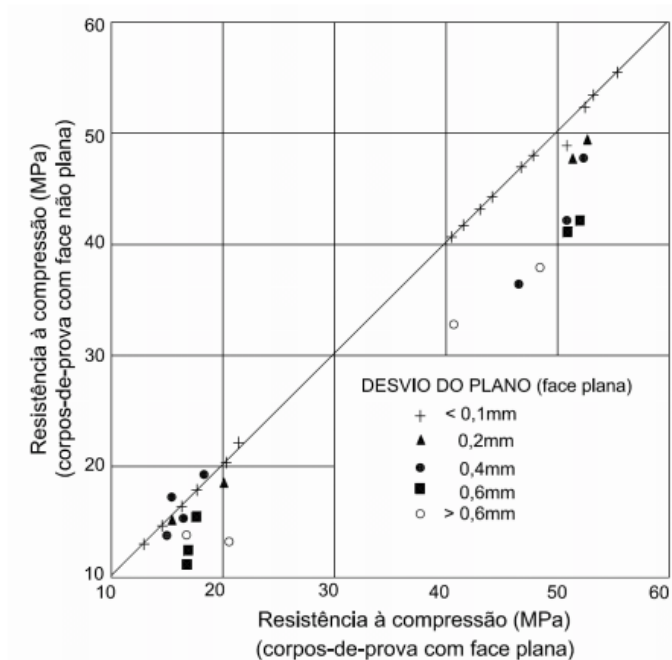


Figura 2.21 - Influência da planicidade da superfície de carga de corpos de prova cúbicos de concreto sobre a resistência à compressão (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983 *apud* BEZERRA, 2007).

A velocidade de carregamento também deve ser considerada. Com aumento da velocidade de aplicação do carregamento, os resultados do ensaio de resistência à compressão de um mesmo concreto tende a aumentar, como demonstrado por Bezerra (2007) e apresentado na Figura 2.22. Este resultado, que é uma propriedade geral dos materiais, deve-se ao aumento da deformação com o tempo, provocado pela fluência (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

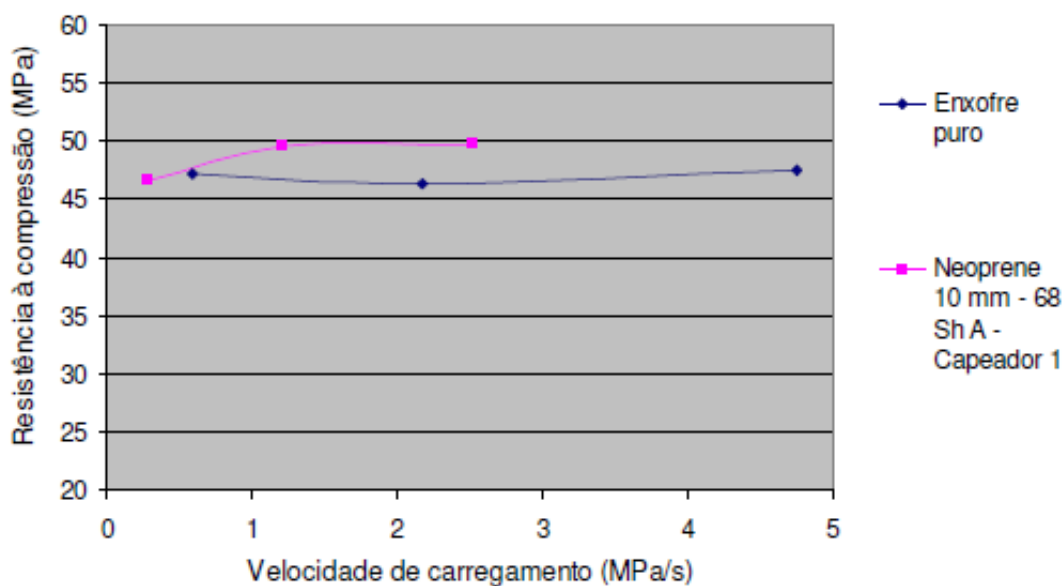


Figura 2.22 - Resistência à compressão do concreto ( $f_c = 47$  MPa, com enxofre e neoprene como capeamento) com incremento da velocidade de carregamento (BEZERRA, 2007).

#### 2.4 – RELAÇÃO ENTRE OS FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A relação direta entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto é decorrente de que ambos são afetados pela porosidade das fases constituintes, porém não no mesmo grau (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A Figura 2.23 mostra a evolução das fissuras em função da tensão de compressão do concreto. O concreto no estado endurecido, mesmo descarregado, apresenta microfissuras decorrentes do processo de hidratação do cimento e vazios oriundos do ar incorporado. As microfissuras diminuem a rigidez do material e, portanto, estão diretamente relacionadas com o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

No início do carregamento - faixa 1, entre 0 e 30% da tensão última - essas fissuras aumentam, mas ainda retomam ao valor inicial quando descarregado, o que leva o material a um comportamento elástico. Na fase seguinte - faixa 2, entre 30 e 50% da tensão última - essas fissuras aumentam, retornando a valor próximo ao inicial quando descarregado, levando o material a um comportamento aproximadamente elástico. Com o acréscimo da carga - faixa 3, entre 50 e 75% da tensão última - as fissuras aumentam e não retornam à mesmas dimensões quando a peça é descarregada o que leva o material a se comportar de modo não elástico. No trecho final - faixa 4, entre 75 e 100% da tensão última - as fissuras se propagam pela argamassa, a partir da zona de transição, e se interligam até o rompimento do concreto.

A medida das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão é realizada em diferentes estados de tensão. O módulo de elasticidade é tomado na faixa 2, entre 30 e 45% da tensão de ruptura, dependendo da norma utilizada, enquanto a resistência à compressão é medida na ruptura, faixa 4. Em concretos normais a ruptura ocorre na argamassa, elo mais fraco do compósito, definindo assim a preponderância desta fase na medida da resistência à compressão. Por sua vez, a determinação do valor do módulo de elasticidade é feita numa tensão em que as fases mantêm certa integridade. O maior valor da rigidez do agregado contribui para aumentar a rigidez do conjunto o que faz com que o agregado tenha grande influência no módulo de elasticidade.

Situação diferente ocorre com o concreto de alto desempenho. As adições realizadas neste tipo de concreto melhoram de tal ordem às características da zona de transição e a argamassa que a ruptura do material passa a ocorrer também no agregado, aumentando assim a participação do agregado no valor da resistência à compressão e diminuindo sua importância na medida do módulo de elasticidade relativamente ao concreto de resistência normal.

A porosidade se apresenta como fator comum e fundamental tanto na determinação da resistência à compressão quanto na medida do módulo de elasticidade. O fato de ser preponderante em graus e em fases constituintes diferentes decorre do motivo que, além de tratarmos de propriedades diferentes, de modo que sejam atendidos os critérios de dimensionamento estrutural, as medidas são tomadas em estágios diferentes, isto é com as peças em estados de tensão distintos.

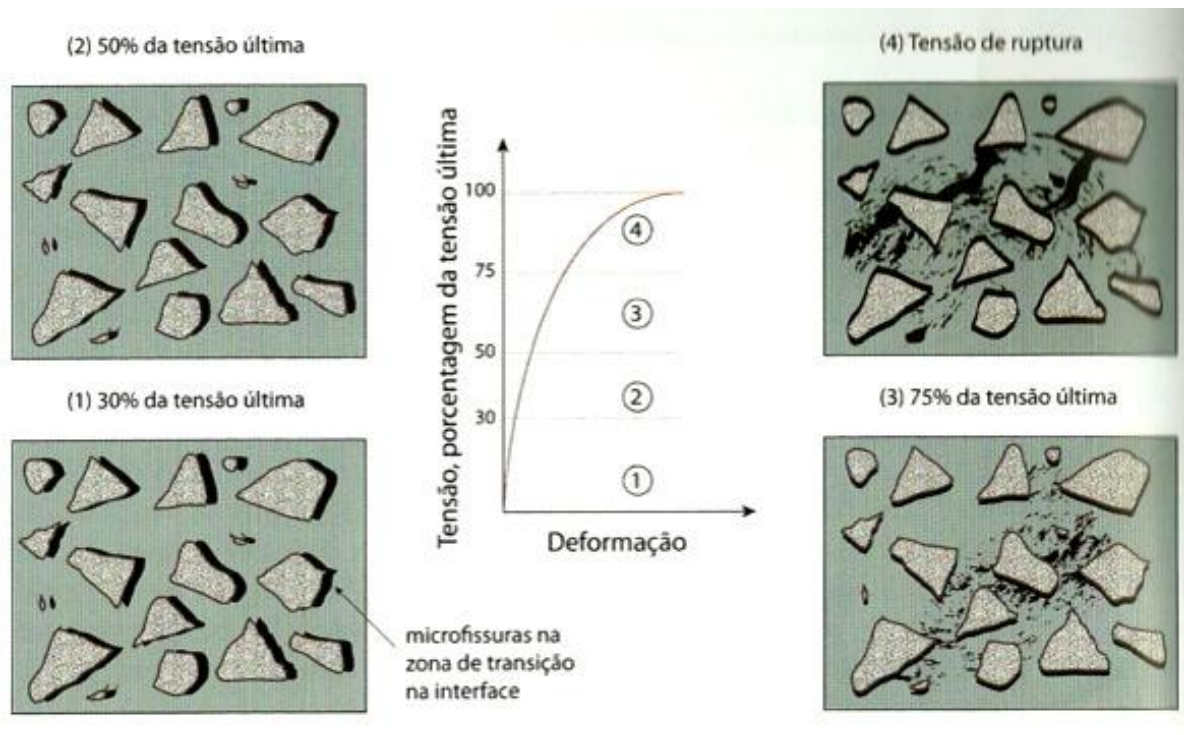


Figura 2.23 - Representação esquemática do comportamento do concreto sob compressão uniaxial. (MEHTA e MONTEIRO 2008).

## 2.5 – RESISTÊNCIA DO CONCRETO À TRAÇÃO

A resistência à tração do concreto está diretamente relacionada à durabilidade da estrutura concreto, à aderência da armadura ao concreto, à resistência ao cisalhamento de elementos estruturais sem armadura transversal e, no caso do dimensionamento do concreto simples, à estimativa da carga que promove o início da fissuração. É uma propriedade importante em estruturas submetidas à tração na flexão como pavimentos, lajes e vigas; tração pura como em tirantes e reservatórios cilíndricos e em estruturas de barragens (SILVA, 1997; MENDES, 2002; GOMES, 1995).

É uma propriedade do concreto regida pela existência de falhas. Essas falhas resultam em concentrações acentuadas de tensões no material sob carga, de modo que se atingem tensões muito elevadas em volumes muito pequenos do elemento, tendo, como consequência, o aparecimento de rupturas microscópicas, enquanto a tensão média nominal no elemento todo é relativamente baixa (NEVILLE, 1997).

De acordo com Chen, *apud* Mehta e Monteiro (2008) o comportamento relativamente frágil da ruptura do concreto à tração se deve ao início e crescimento de cada nova fissura

reduzir a área disponível para suporte da carga aumentando as tensões nas extremidades das fissuras críticas. Desta forma, a ruptura à tração é causada por poucas fissuras unidas e não por numerosas fissuras como acontece no caso da compressão.

A razão entre as resistências à tração axial e à compressão geralmente varia de 0,07 a 0,11 (Mehta e Monteiro, 2008). Normalmente os fatores que influenciam a resistência à compressão são os mesmos que interferem na resistência à tração exceto as condições de cura e velocidade de carregamento que afetam mais os ensaios de tração do que à compressão (NEVILLE, 1997; HATANO *apud* SILVA, 1987).

No dimensionamento de uma peça de concreto armado, a resistência do concreto à tração é desprezada quando se verifica no estado limite último (ELU), isto é, no colapso da estrutura, todo o esforço de tração deverá ser absorvido pela armadura. Porém, em serviço – que é a situação em que a estrutura será predominantemente submetida ao longo de sua vida útil e, portanto, uma condição diretamente ligada à sua durabilidade -, a estrutura deve ser verificada no estado limite de formação de fissuras (ELS-F) além do estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF). Nessas condições a resistência à tração se torna importante, pois, a partir da fissuração da peça, a estrutura sai do regime elástico passando a trabalhar fissurada com implicações nas suas características geométricas e conseqüentemente nos valores de abertura de fissuras e de deformações (ABNT NBR 6118:2007).

A resistência à tração pode ser determinada por ensaio de tração direta (utilizada como referência) que raramente é aplicado devido aos dispositivos de fixação provocar tensões secundárias importantes. Os ensaios normalmente aplicados são o ensaio por compressão diametral e o ensaio à flexão com carregamento nos terços do vão (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A Figura 2.24 mostra a forma que deve ter o corpo de prova de concreto simples para ensaio de tração axial onde a resistência à tração direta,  $f_{ct}$ , é determinada aplicando-se tração axial até a ruptura. A seção central é retangular com 9 cm x 15 cm, e as extremidades são quadradas, com 15 cm de lado.

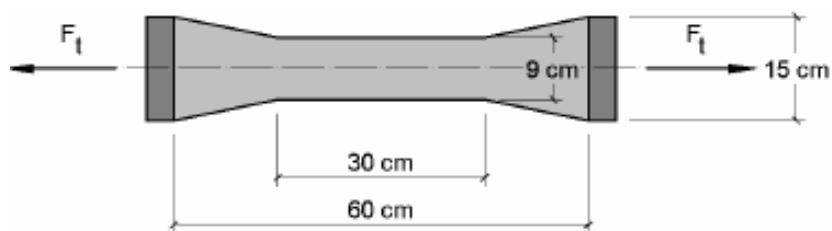


Figura 2.24 - Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração axial (MEHTA e MONTEIRO 2008 adaptado por PINHEIRO *et al.*, 2012).

Na Figura 2.25 encontra-se esquematizado o ensaio de tração na flexão. Este ensaio é realizado num corpo de prova de seção prismática submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até à ruptura. O ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços” e é utilizado para que a seção do meio do vão esteja submetida à flexão pura como se pode ver nos diagramas da Figura 2.26. Os valores encontrados para a resistência à tração na flexão,  $f_{ct,f}$ , são maiores que os encontrados nos ensaios de tração direta e de compressão diametral.

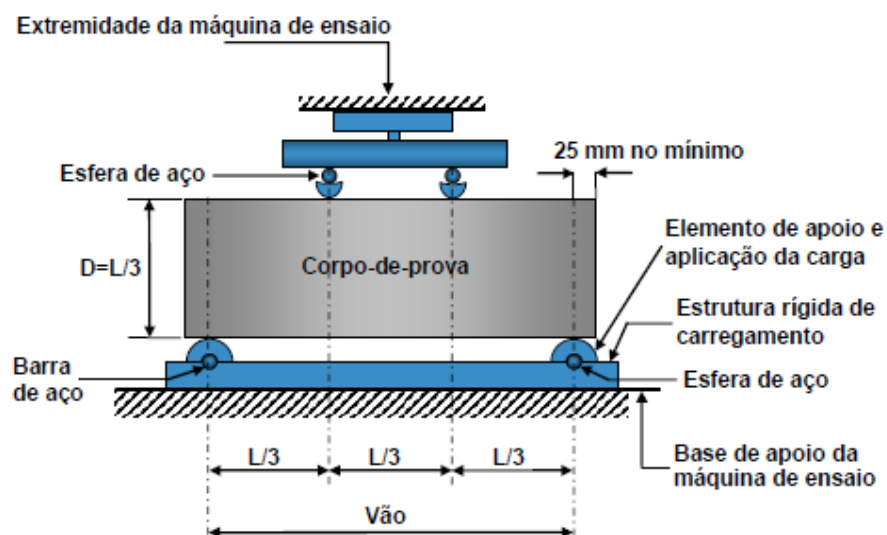


Figura 2.25 - Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração na flexão. Esquema de carregamento. (MEHTA e MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO *et al.* 2012).



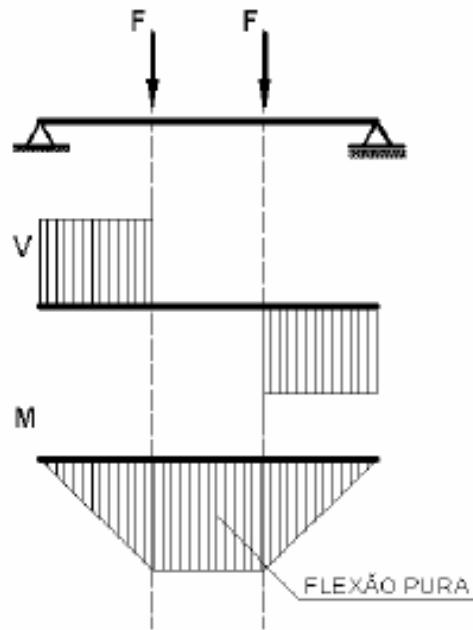


Figura 2.26 - Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração na flexão. Diagrama de esforço cortante e esforço de flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO *et al.*, 2012).

A Figura 2.27 esquematiza o ensaio à tração por compressão diametral também conhecido por ensaio brasileiro ou de fendilhamento. Foi idealizado pelo engenheiro Lobo Carneiro, sendo o ensaio mais utilizado por sua simplicidade. Para a sua realização, o corpo de prova cilíndrico é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da máquina de ensaio. O contato entre o corpo de prova e os pratos deve ocorrer somente ao longo de duas geratrizes, onde são colocadas tiras padronizadas de madeira, diametralmente opostas. É aplicada uma força até a ruptura do concreto por fendilhamento, devido à tração indireta. A Figura 2.28 mostra a distribuição de tensões ao longo do diâmetro do corpo de prova apresentando tensão de compressão nos extremos e inversão para tração numa distância menor que  $1/6$  do diâmetro. O valor da resistência à tração por compressão diametral,  $f_{ct,sp}$ , encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta.

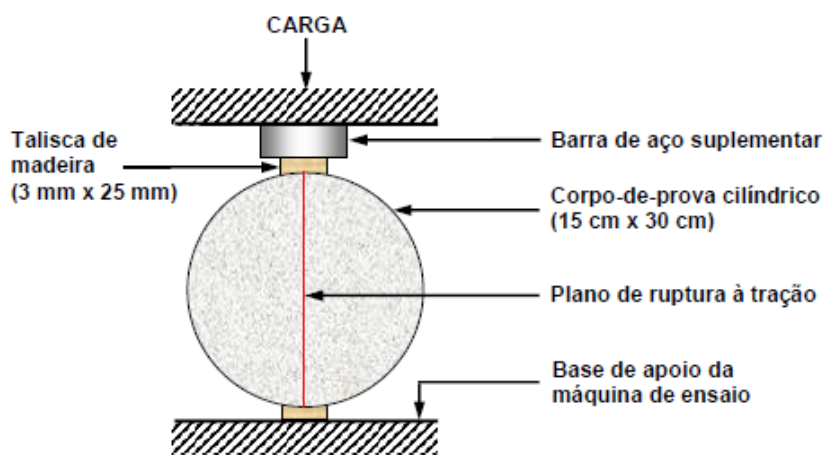


Figura 2.27 - Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração por compressão diametral. (MEHTA e MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO *et al.*, 2012).

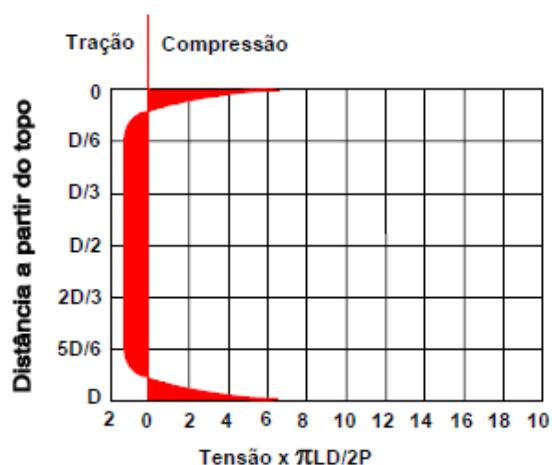


Figura 2.28 - Ensaio para determinação da resistência à tração do concreto. Tração por compressão diametral. Desenvolvimento das tensões de compressão e tração ao longo do diâmetro. (MEHTA e MONTEIRO, 2008 adaptado por PINHEIRO *et al.*, 2012).

A tensão de tração direta,  $f_{ct}$ , pode ser obtida em relação aos outros dois ensaios como segue:

$$f_{ct} = 0,7 f_{ct,f} \quad (\text{tração na flexão}) \quad \text{Equação (2.2)}$$

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (\text{compressão diametral}) \quad \text{Equação (2.3)}$$

### **3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de subsidiar a investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.

O módulo de elasticidade do concreto, juntamente com a tensão a que uma estrutura de concreto armado está submetida, define o seu grau de deformação. Esta grandeza se impõe cada vez mais importante no projeto estrutural tendo em vista a esbeltez das peças e o processo construtivo atuais, com a retirada do escoramento cada vez mais cedo.

Neste programa experimental foram definidas as amostras, implantadas rotinas e definidos os tipos de ensaios a ser realizados, resultando no conhecimento não só do módulo de elasticidade, mas também da resistência à compressão e da resistência à tração, apresentando uma caracterização mais completa do concreto e incluindo o seu comportamento ao longo do tempo.

#### **3.1 - METODOLOGIA**

No início deste estudo, que se realizou entre os meses de maio e outubro de 2011, por meio de levantamento direto com os maiores fornecedores de concreto de Brasília, verificou-se que o concreto de densidade normal C30 ( $f_{ck} = 30$  MPa), bombeável e com abatimento de  $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ , de acordo com a classificação da norma ABNT NBR 8953:2011, foi o mais utilizado na região. Deste modo, o concreto classe C30 foi indicado como o concreto-foco deste estudo e a variável independente adotada foi a resistência à compressão.

As propriedades físico-mecânicas e o comportamento ao longo do tempo dos concretos da região de Brasília foram obtidos da análise de amostras coletadas diretamente na usina de três concreteiras diferentes, CA, CB e CC. Além disso, foi feito um estudo de caso onde foram analisadas amostras coletadas no canteiro de obras, CO, suprido pela concreteira CB, porém produzidas em usina diferente da que forneceu os concretos CB.

Foram analisados concretos de diferentes classes de resistência. Das concreteiras CA e CB foram analisados os concretos das classes C20 ( $f_{ck} = 20$  MPa), C30 ( $f_{ck} = 30$  MPa) e C40 ( $f_{ck} = 40$  MPa). Da concreteira CC somente o concreto da classe C30 ( $f_{ck} = 30$  MPa) e o concreto coletado na obra, CO, somente da classe C40 ( $f_{ck} = 40$  MPa).

Em duas concreteiras pesquisadas, a CA e a CB, além do concreto-foco, C30, foram estudados também concretos de classe mais resistente, C40, e menos resistente, C20, que a do concreto-foco, como mostra esquema na Figura 3.1.

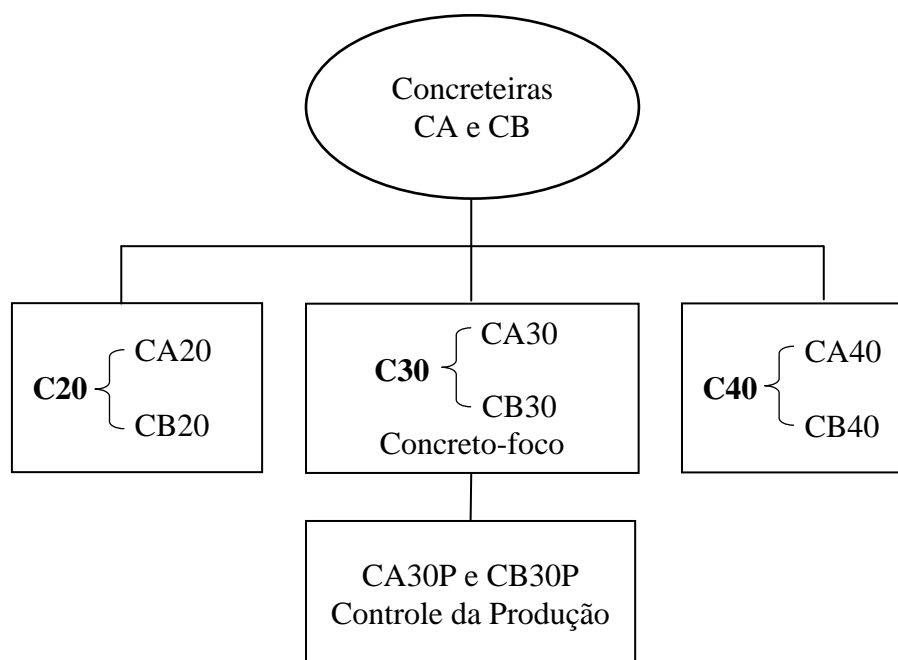


Figura 3.1 – Concretos estudados das concreteiras CA e CB.

O acréscimo destas outras duas classes de concreto foi feito com a finalidade de criar parâmetros de referência. Os componentes destes concretos são os mesmos utilizados no concreto-foco e foram coletados nas mesmas datas e, de modo a atingir às diferentes classes de resistência, C20 e C40, foram alterados somente os traços. Este procedimento justificou-se pela expectativa de analisar o comportamento do concreto em função dos parâmetros de mistura além de criar um indicador que detectasse qualquer discrepância que se apresentasse no estudo, isto é, uma tendência apresentada num concreto de determinada classe de resistência necessariamente deveria ser constada nos concretos das outras classes.

Com o objetivo de se verificar as possíveis alterações na produção do concreto na usina, o concreto-foco foi investigado também pela sua replicação em laboratório. Além disso, foi averiguada uma possível alteração das características físico-mecânicas do concreto-foco no passar do tempo devido às condições de produção, da modificação da origem ou mudança da qualidade dos materiais utilizados no concreto. Para isto, foi feita uma segunda coleta

em data posterior, superior a três meses, à da primeira coleta. A Figura 3.2 mostra este desdobramento da análise do concreto-foco.

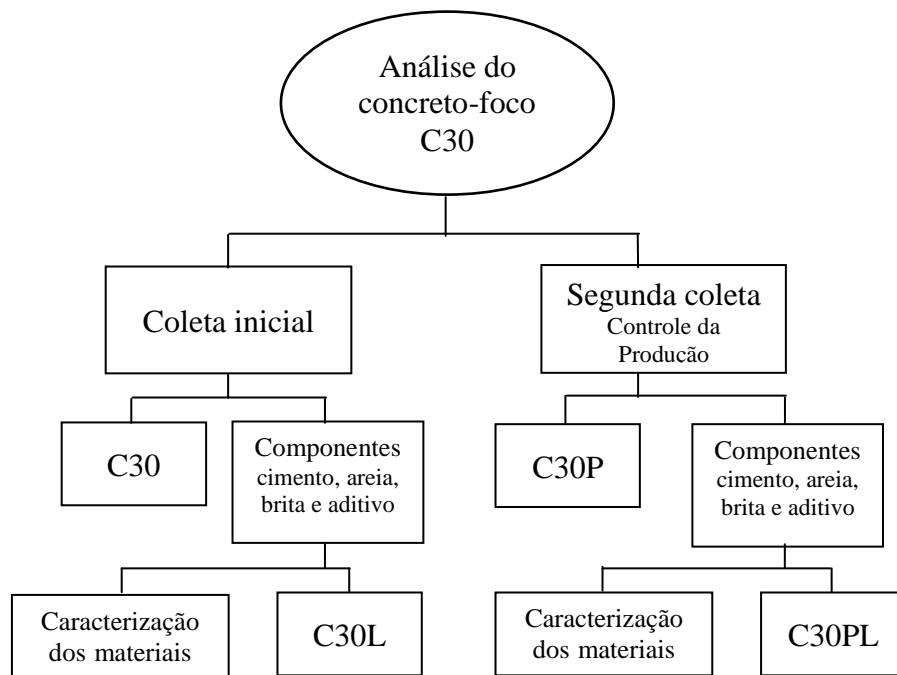


Figura 3.2 – Desdobramento da análise do concreto-foco (“L” = replicação em laboratório; “P” = segunda coleta, controle da produção).

Da terceira concreteira pesquisada, concreteira CC, somente o concreto-foco foi analisado, em uma única amostragem coletada na usina. A Figura 3.3 mostra o esquema da análise do concreto da concreteira CC.

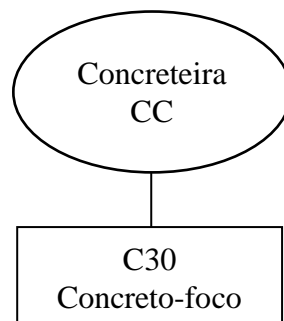


Figura 3.3 – Concreto estudado da concreteira CC.

Finalmente, foi acrescentado um estudo de caso à pesquisa contemplando uma situação normal de produção, onde foram analisadas amostras, CO, colhidas num canteiro de obras em diferentes datas. O concreto estudado foi fornecido pela concreteira CB com origem em usina diferente da utilizada no outro fornecimento desta concreteira. Os concretos CO são da classe C40 e as amostras foram obtidas por meio de onze coletas feitas em diferentes datas. A Figura 3.4 mostra o esquema mostrado da análise dos concretos CO.

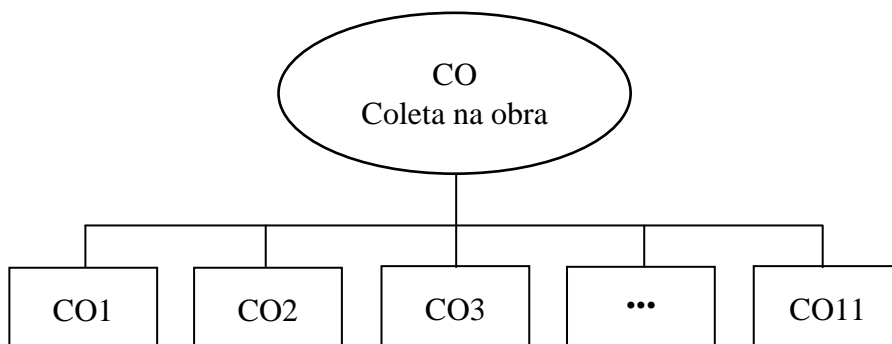


Figura 3.4 – Concreto estudado com coleta feita diretamente na obra (CO).

### 3.1.1 – Amostras

As amostras foram compostas de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura de acordo com a norma de ensaio utilizada (ver Tabela 3.3, página 48). O conjunto de corpos de prova por unidade de ensaio foi definido como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Quantidade de corpos de prova por tipo de ensaio realizado

<b>Ensaio</b>	<b>Quantidade de corpos de prova</b>
Resistência à compressão	5
Módulo de elasticidade	3
Tração por compressão diametral	2
Absorção de água	3

Para a determinação da resistência à compressão foram utilizados os resultados do rompimento de cinco corpos de prova. Desses cinco corpos de prova, dois foram rompidos para a definição do plano de carregamento do ensaio para determinação do módulo de elasticidade e outros três foram rompidos após a determinação das deformações do mesmo ensaio. A nomenclatura das amostras adotada encontra-se resumida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Nomenclatura das amostras

<b>Identificação</b>	<b>Concreteira</b>	<b>Classe de resistência</b>	<b>Local de moldagem</b>	<b>Observação</b>
CA20	CA	C20	usina	
CA30	CA	C30	usina	
CA30L	CA	C30	laboratório	
CA30P	CA	C30	usina	para controle da produção
CA30PL	CA	C30	laboratório	para controle da produção
CA40	CA	C40	usina	
CB20	CB	C20	usina	
CB30	CB	C30	usina	
CB30L	CB	C30	laboratório	
CB30P	CB	C30	usina	para controle da produção
CB30PL	CB	C30	laboratório	para controle da produção
CB40	CB	C40	usina	
CC30	CC	C30	obra	
CO1	CB	C40	obra	
CO2	CB	C40	obra	
....	...	...	...	
CO11	CB	40	obra	

A moldagem foi realizada no procedimento de coleta na usina de produção do concreto. Antes da moldagem das amostras foi determinada a consistência do concreto por meio ensaio de abatimento do tronco de cone conforme a norma ABNT NBR NM 67:1998. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2003 com utilização de adensamento manual.

Após este procedimento, os corpos de prova foram mantidos em local abrigado de onde foram transportados cuidadosamente, 48 horas depois, para as dependências do Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB - LEM. No laboratório, após a desmoldagem, foram submetidos a processo de cura em câmara úmida, como prescreve a norma ABNT NBR 5738:2003.

A preparação das bases e dos topos dos corpos de prova foi feita por meio de retificação com coroa de desbaste, de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007, realizada horas antes dos procedimentos de ensaio. A Figura 3.5 mostra a determinação do abatimento de uma amostra e os corpos de prova logo após a moldagem.



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) medição do abatimento; (b) corpos de prova após a moldagem.

### 3.1.2 Propriedades estudadas e métodos

Foram estudados o módulo de elasticidade longitudinal, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova coletados na usina e moldados no laboratório, além de suas das características dimensionais.

A caracterização dos aglomerantes utilizados no concreto foi feita por meio da determinação da resistência à compressão do cimento. Dos agregados foram determinados o teor de material pulverulento, a massa específica, a distribuição granulométrica e a identificação da origem.



De maneira complementar, foram realizados ensaios de determinação da velocidade do pulso ultrassônico de determinação da absorção de água do concreto.

Na Tabela 3.3 encontra-se discriminada a metodologia utilizada para cada tipo de ensaio e caracterização de componentes realizados.

Tabela 3.3– Ensaios e caracterização de componentes realizados e normas utilizadas para determinação das propriedades estudadas

<b>Ensaio</b>	<b>Norma ABNT</b>
Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos	NBR 5739: 2007
Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão	NBR 8522:2008
Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	NBR 7222: 2011
Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	NBR 8802:1994
Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica	NBR 9778: 2009
<b>Caracterização dos componentes</b>	<b>Norma ABNT</b>
Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão	NBR 7215:1996
Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos	NBR 7219:1987
Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52:2003
Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água	NBR NM 53:2009
Agregados - Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248:2003

### **3.1.3- Variáveis estudadas em função da idade do concreto**

Para os concretos-foco coletados em usina (CA30 e CB30), foi realizada uma bateria completa de ensaios que consistiu na determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade longitudinal e da resistência à tração por compressão diametral aos 3, 7, 28 e 91 dias, além do ensaio de índice de absorção de água aos 28 dias. As demais amostras destas concreteiras, por se tratarem de amostras auxiliares, tiveram a quantidade de ensaios reduzida resultando no esquema mostrado na Figura 3.6 na próxima página.

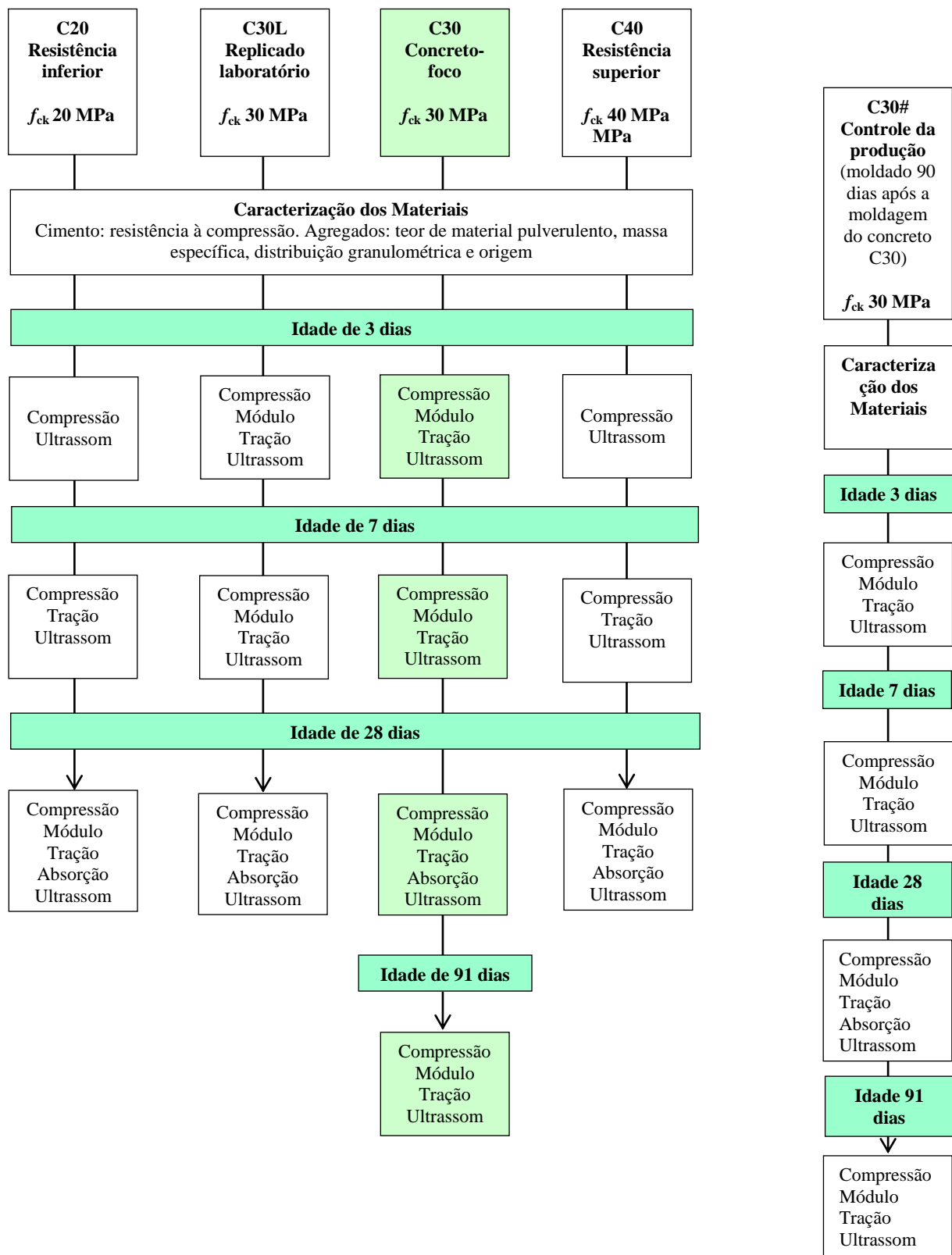


Figura 3.6 - Variáveis estudadas em função da idade dos concretos produzidos pelas concreteiras CA e CB.

Da concreteira CC foi estudado somente o concreto-foco. A Figura 3.7 resume as variáveis estudadas e idades em que os ensaios foram realizados no concreto produzido pela concreteira CC.

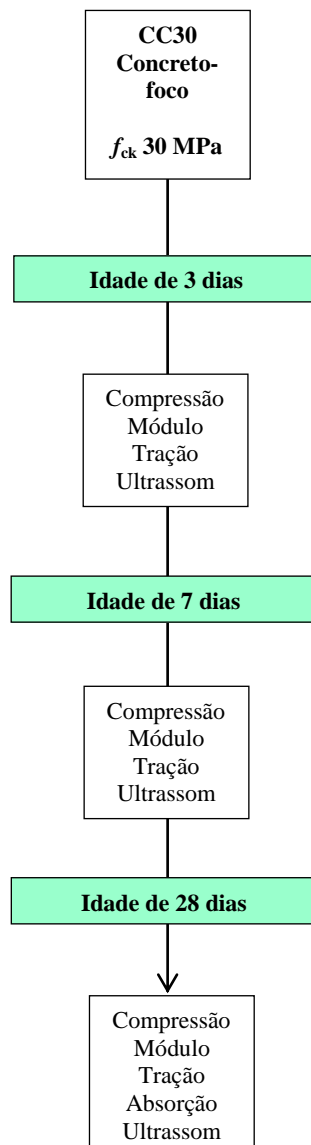


Figura 3.7 - Variáveis estudadas em cada idade do concreto produzido pela concreteira CC.

As amostras CO coletadas na obra, produzidas pela concreteira CB, foram ensaiadas à compressão, tração, módulo de elasticidade e absorção de água. A Figura 3.8 resume as variáveis estudadas e idades dos ensaios realizados.

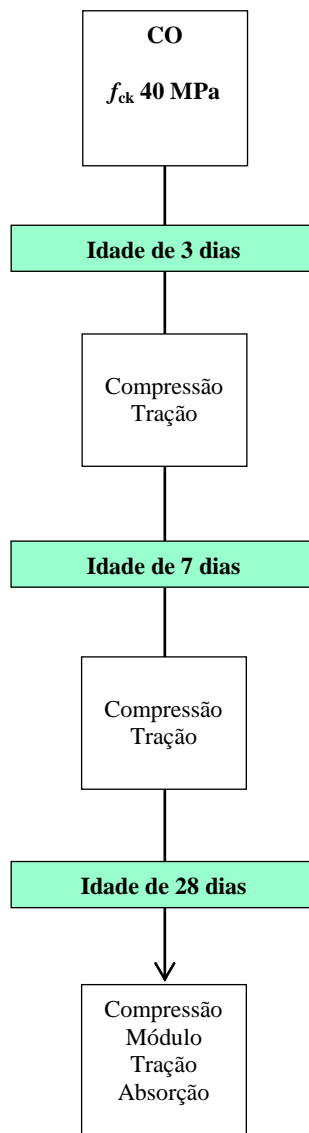


Figura 3.8 - Variáveis estudadas em cada idade do concreto produzido pela concreteira CB coletado na obra.

### 3.1.4 - Rotina para a determinação das propriedades físico-mecânicas

A rotina empregada para a determinação das propriedades físico-mecânicas dos concretos contemplou desde a preparação das formas cilíndricas até a compilação dos resultados dos ensaios em planilhas e o cálculo dos resultados. Na Figura 3.9 encontra-se esquematizada a rotina empregada.

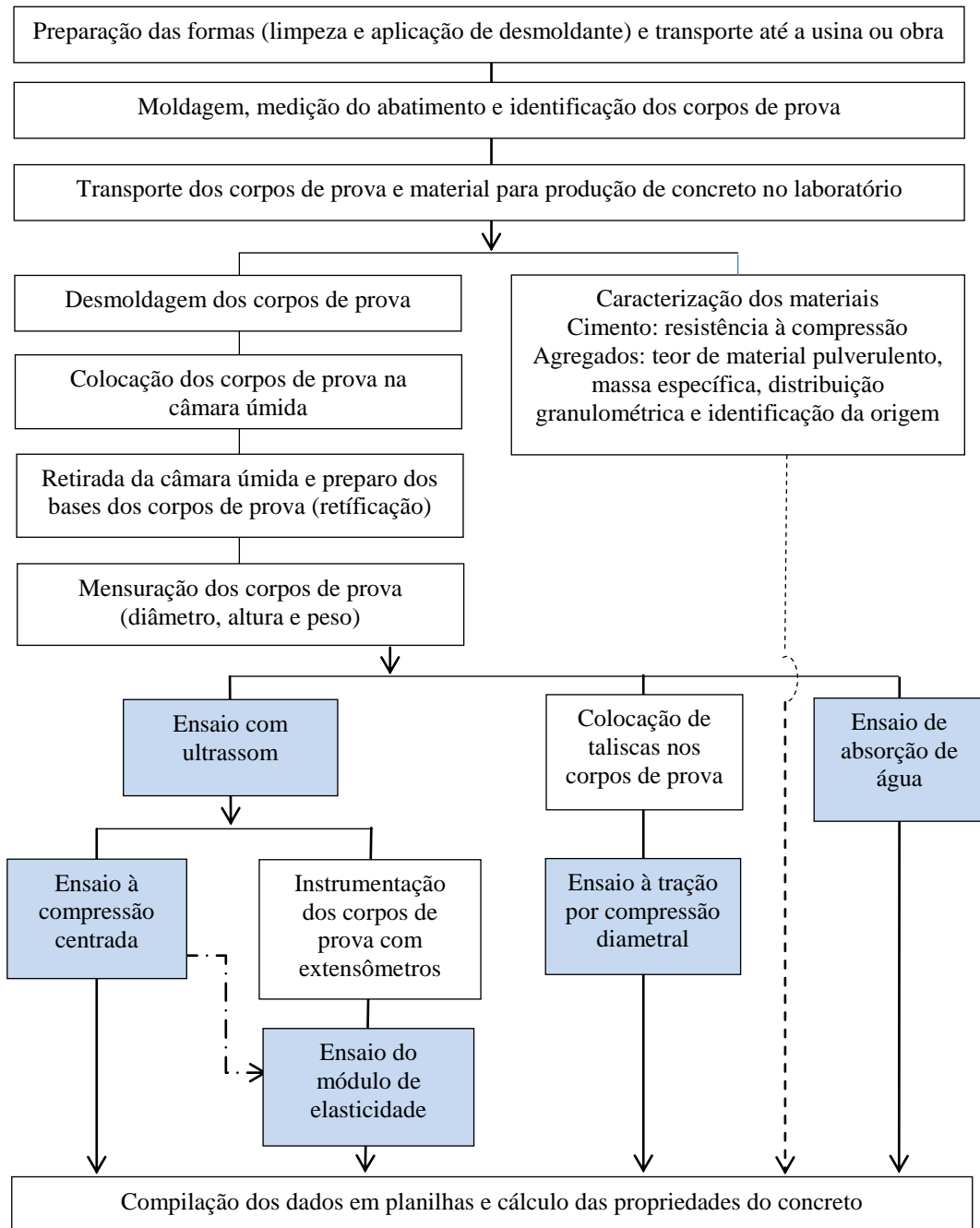


Figura 3.9 – Rotina para a determinação das propriedades físico-mecânicas.

## **3.2 – ENSAIOS**

A determinação das características mecânicas das amostras estudadas foi feita por meio dos ensaios de resistência à compressão, de módulo de elasticidade e tração por compressão diametral. Estes ensaios mecânicos foram realizados de acordo com o estabelecido pela ABNT e suas rotinas estão descritas nos próximos itens. Todos os ensaios foram realizados nas dependências e com equipamentos do Laboratório de Ensaio de Materiais – LEM, da Universidade de Brasília.

Além destes ensaios, foram realizados, complementarmente, os ensaios para a determinação da velocidade do pulso ultrassônico e para a determinação da absorção de água do concreto.

O diâmetro dos corpos de prova foi determinado por meio da média de duas medidas realizadas em direções ortogonais com precisão de 0,1 mm. Do mesmo modo a altura foi determinada pela medida de duas geratrizes. Foi tomada a massa de cada corpo de prova com precisão 0,001 kg.

### **3.2.1 - Determinação da resistência à compressão, resistência à compressão característica e módulo de elasticidade**

A determinação da resistência à compressão das amostras desta pesquisa foi feita de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007 que prescreve o método pelo qual devem ser ensaiados os corpos de prova cilíndricos de concreto moldados e extraídos. Nesta norma são previstas as classes da aparelhagem admitidas para o ensaio, a taxa de aplicação da força, o sistema de medição de forças, as especificações para os pratos de compressão e as condições de verificação da máquina de ensaio.

A compressão foi exercida por meio de prensa hidráulica marca Forney, modelo F – 25 EX, classe 1, com capacidade de 1100 kN e é aferida anualmente. Esta prensa possui prato de compressão inferior removível e prato superior com diâmetro igual a 165 mm e espessura de 45 mm. O prato superior é provido de articulação, tipo rótula esférica, com 108 mm de diâmetro. Todas estas medidas ficaram dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 5739:2007.

A leitura da carga aplicada foi feita por um decodificador de sinal digital, com indicação de pico do mesmo fabricante, modelo Copilot, com precisão de 50 N. A Figura 3.10 mostra o equipamento utilizado.



(a)



(b)

Figura 3.10 – Prensa hidráulica utilizada: (a) conjunto; (b) detalhe do decodificador de sinal.

A relação altura/diâmetro dos corpos de prova ensaiados ficou na faixa de 2,02 a 1,94, como preconiza a ABNT NBR 5739:2007.

Como determinado pela norma ABNT NBR 5738:2003, os corpos de prova permaneceram em processo de cura úmida até a preparação das bases, que foi feita por meio de retificação com disco de corte, executada no máximo duas horas antes de ser ensaiados.

A aplicação da carga nos corpos de prova foi realizada como prescrito pela norma ABNT NBR 5739:2007 que determina que a carga de ensaio deve ser aplicada continuamente e constantemente, sem choques, com velocidade de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. Os resultados da resistência devem foram obtidos pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, e expressos em MPa.



Nesta pesquisa, buscando averiguar a variabilidade do ensaio, no cálculo da resistência à compressão foi medida a tensão de ruptura de cada corpo de prova individualmente para cada conjunto de cinco corpos de prova de cada amostra.

No estudo, o cálculo do valor da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) foi feito de acordo com a Equação 3.1 da norma ABNT NBR 12655:2006.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d \quad \text{Equação 3.1}$$

A condição de preparo dos concretos em estudo se enquadrou na condição A (o cimento e os agregados estão medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados). Deste modo, o desvio padrão adotado foi de 4,0 MPa e a parcela  $1,65 S_d$  resultou em 6,6 MPa.

A norma ABNT NBR 8522:2008 estabelece os procedimentos para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto endurecido, em corpos de prova cilíndricos que podem ser moldados ou extraídos da estrutura. Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade das amostras estudadas nesta pesquisa seguiu o preconizado nesta norma.

Devido à facilidade de montagem e a precisão dos resultados (Montija, 2007), a medição das deformações foi feita por extensômetros elétricos de ancoragem do tipo clip gage mantidos contra o corpo de prova por meio de anéis de borracha (o-rings). O equipamento utilizado foi da marca Ahlborn, modelo Almemo MSI ZA – 9650 – FS1V. A leitura da deformação foi feita por um decodificador do mesmo fabricante, modelo Almemo 2390-5 com precisão de 0,001 mm. Foram usadas duas bases de medida com 100 mm de comprimento situadas em geratrizes equidistantes no perímetro do corpo de prova.

A Figura 3.11 mostra os equipamentos utilizados, que constaram de prensa hidráulica, extensômetros, decodificador e microcomputador com planilha para compilação e cálculo das deformações. A compressão exercida nos corpos de prova foi feita por meio da mesma prensa hidráulica descrita no item 3.2.1 na página 54.

A preparação dos corpos de prova, da aparelhagem, bem como todo o procedimento realizado para o ensaio foram realizados como descrito no Projeto de Norma Interna de Trabalho - LEM NIT XXX do Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (2011), baseado na norma ABNT NBR 8522:2008 e que se encontra no Anexo A.

De acordo com a norma ABNT NBR 8522:2008 foi determinada a resistência à compressão do concreto em dois corpos de prova para a elaboração de um plano de carregamento definindo a tensão limite superior, equivalente a 30% da tensão de ruptura ( $f_c$ ), que os corpos de prova foram submetidos para o ensaio do módulo de elasticidade.

Foram utilizados corpos de prova do mesmo tamanho e forma dos que foram utilizados para determinar o módulo de elasticidade, provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições e, de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 5738:2008, foram ensaiados à compressão de acordo com a ABNT NBR 5739:2007.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.11 - Instrumentação para medição da deformação: (a) conjunto de equipamentos instalados; (b) extensômetros montados; (c) decodificador de sinal; (d) detalhe da lâmina em balanço e das hastes rígidas com 100 mm do clip.

Para cada determinação do módulo de elasticidade devem ser ensaiados três corpos de prova com carregamentos e descarregamentos obedecendo a velocidade de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s conforme a Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  ou Metodologia B - Deformação específica  $\epsilon_a$  fixa. Em ambos os casos o procedimento é similar com alteração dos parâmetros de tensão para deformação, conforme o método.

Nesta pesquisa, foi utilizada a Metodologia A, porém foi descrita também a Metodologia B cujos procedimentos serão destacados quando diferirem da Metodologia A. O ensaio obedeceu a quatro etapas como descrito a seguir:

### **Etapa 1**

Carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e mantê-la neste nível por 60 s. Essa tensão  $\sigma_b$  corresponde a 30 % da tensão de ruptura ( $f_c$ ) obtida através do ensaio de resistência à compressão ou outra tensão especificada em projeto.

Em seguida, descarregar o corpo de prova até uma força próxima de zero ou da primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. O prato superior da máquina de ensaios não deve perder o contato com o topo do corpo de prova.

### **Etapa 2**

Carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e mantê-la neste nível por 60 s.

#### **Para Metodologia B**

Carregar o corpo de prova até o medidor de deformação acusar a leitura de deslocamento correspondente à deformação específica de  $50 \times 10^{-6}$  e mantê-la neste nível por 60 s.

Em seguida, carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e manter a força neste nível por 60 s.

Descarregar o corpo de prova até uma força próxima de zero ou da primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. O prato superior da máquina de ensaio não deve perder o contato com o topo do corpo de prova.

### **Etapa 3**

Esta etapa deve ser conduzida conforme prescrições para a etapa 2.

### **Etapa 4**

Carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e mantê-la neste nível por 60 s. Registrar as deformações lidas,  $\varepsilon_a$ , tomadas em no máximo 30 s.

#### **Para Metodologia B**

Carregar o corpo de prova até o medidor de deformação acusar a leitura de deslocamento correspondente à deformação específica de  $50 \times 10^{-6}$  e mantê-la neste nível por 60 s. Registrar a força lida em no máximo 30 s.

Em seguida, carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_b$ ) e mantê-la neste nível por 60 s. Registrar as deformações lidas,  $\varepsilon_b$ , tomadas em no máximo 30 s.

Após a leitura das deformações, liberar a instrumentação, se necessário, e carregar o corpo de prova na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas até que se produza a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ). Se  $f_{c,ef}$  diferir de  $f_c$  em mais de 20 %, os resultados do corpo de prova devem ser descartados.

Na Figura 3.12 encontra-se a representação esquemática do plano de carregamento para a Metodologia A onde podem ser notados os quatro ciclos de carregamento, a limitação da tensão de ensaio equivalente a 30% de  $f_c$  e tempo de manutenção da tensão em cada ciclo.

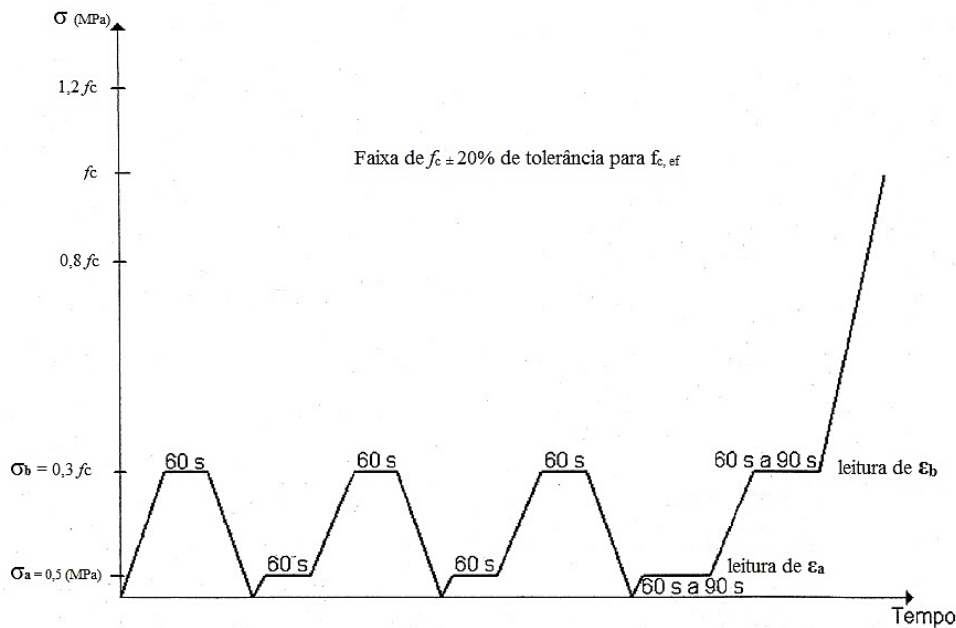


Figura 3.12 - Representação esquemática do carregamento para a Metodologia A (ABNT NBR 8522:2008).

Seguindo a Metodologia A, o módulo de elasticidade,  $E_{ci}$ , em gigapascals, é dado pela Equação 3.1:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior (MPa); ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ ) ou outra tensão especificada em projeto.  
 0,5 é a tensão básica (MPa).  
 $\sigma_a$  é a tensão básica correspondente à deformação específica  $50 \times 10^{-6}$  em MPa.  
 $\varepsilon_b$  é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior.

De acordo com a Metodologia B, o módulo de elasticidade,  $E_{ci}$ , em gigapascals, é dado pela Equação 3.2:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior (MPa); ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ ) ou outra tensão especificada em projeto.  
 0,5 é a tensão básica (MPa).  
 $\varepsilon_b$  é a deformação específica média, ( $\varepsilon = \Delta l/L$ ), dos corpos de prova sob a tensão

maior.

$\epsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

Nesta pesquisa, buscando averiguar a variabilidade do ensaio, no cálculo do módulo de elasticidade não foi utilizada a deformação específica média de três corpos de prova sob a tensão maior e sim a deformação específica média de cada corpo de prova individualmente, diferentemente do preconizado pela norma ABNT NBR 8522:2008. Obteve-se assim os valores individuais (por corpo de prova), possibilitando a determinar do coeficiente de variação do ensaio.

### 3.2.2 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Este método mede a resistência à tração do concreto de modo indireto. A norma ABNT NBR 7222:2011 define a aparelhagem a ser usada e admite a utilização de corpos de prova de relação comprimento/diâmetro entre 1 e 2.

O ensaio consistiu na aplicação de carga de compressão ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas dos corpos de prova cilíndricos. A carga foi aplicada continuamente, sem choque, a uma velocidade constante  $0,05 \pm 0,02$  MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A Figura 3.13 mostra um corpo de prova na prensa e ao final do ensaio, já rompido.



(a)



(b)

Figura 3.13 – Ensaio por compressão diametral: (a) corpo-de-prova colocado na prensa; (b) corpo-de-prova rompido.

Deste modo, a resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 3.3:

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

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

F = carga máxima obtida no ensaio (N)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

L = altura do corpo de prova (mm)

### 3.3 – ENSAIOS COMPLEMENTARES

Além dos ensaios anteriormente descritos, foram realizados, complementarmente, os ensaios para a determinação da velocidade do pulso ultrassônico e para a determinação da absorção de água do concreto.

#### 3.3.1 - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Este método se baseia no fato de que um pulso de onda de propagação ao colidir com a interface de um material com densidade e propriedades elásticas distintas tem uma parte da energia da onda dispersa do seu caminho original, alterando a velocidade deste pulso. Pode ser usado, também, para detectar fissuração interna e outros defeitos além de estimar a resistência do concreto (NAIK *et al.*, 2004).

A aplicação do método da velocidade do pulso ultrassônico consiste na medição do tempo em que um pulso de onda de compressão ultrassônica (também chamada de longitudinal ou onda P) percorre uma distância conhecida, através de um meio, entre um emissor e um receptor. A Figura 3.14 mostra esquematicamente um circuito de teste de velocidade de pulso ultrassônico que consiste de um gerador de pulso, transdutores de transmissão e recepção, um receptor amplificador e unidades de medição além de um osciloscópio opcional.

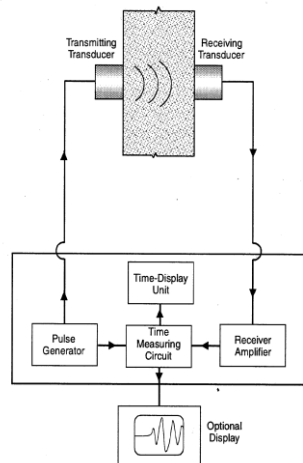


Figura 3.14 - Diagrama esquemático do circuito de teste da velocidade de pulso. (NAIK *et al.*, 2004 adaptado de ASTM Test Designation C 597-02).

Para um meio sólido homogêneo e elástico a velocidade de onda de compressão ( $V$ ) é dada pela Equação 3.4 (ACI 228). No caso específico do concreto,  $V$  tipicamente varia entre 3000 e 5000 m/s (NAIK *et al.*, 2004).

$$V = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}} \quad \text{Equação 3.4}$$

com:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:

$V$  = velocidade da onda de compressão (km/s)

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

$\rho$  = massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )

$\nu$  = coeficiente de Poisson dinâmico

A aplicação do método da velocidade do pulso ultrassônico no concreto pode estimar a resistência à compressão, a homogeneidade, a hidratação do cimento. Auxilia também no estudo da durabilidade devido a danos provocados por meios agressivos, profundidade de fissuras e, se os valores do coeficiente de Poisson e densidade são conhecidos ou presumidos, pode avaliar o módulo de elasticidade dinâmico (NAIK *et al.*, 2004).

A norma ABNT NBR 8802:1994 estabelece os procedimentos para a determinação para a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Ela prescreve o método



de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto.

Esta norma estabelece as seguintes definições:

- Frequência ultrassônica é frequência de vibração de onda longitudinal acima de 20 kHz.
- Onda longitudinal é a vibração ou distúrbio que percorre o interior do material onde o modo de vibração das partículas, em cada instante, tem o deslocamento na mesma direção da propagação do distúrbio.
- Velocidade de propagação é a relação entre distância percorrida por uma vibração ou distúrbio durante um intervalo de tempo.
- Acoplante (graxas de silicone ou mineral e vaselina) é o material a ser utilizado entre as faces dos transdutores e do material a ser ensaiado, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies, na menor espessura possível.

O acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores e do corpo de prova ou componente que está sendo ensaiado devem ser considerados satisfatórios quando for obtido o valor mínimo de leitura com variação de até  $\pm 1\%$ .

O cálculo dos resultados segundo a norma deve seguir a Equação 3.6:

$$V = L/t \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:

V = velocidade de propagação (m/s)

L = distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m)

t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s)

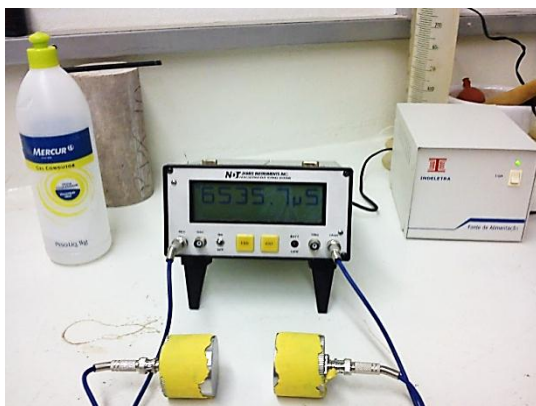
### **Procedimento e equipamento utilizados**

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 8802:1994 e o equipamento utilizado neste ensaio foi o fabricado por James Instrument Inc. com receptor com precisão de 0,1  $\mu$ s, transdutores de 50 mm diâmetro a frequência de 54 kHz.

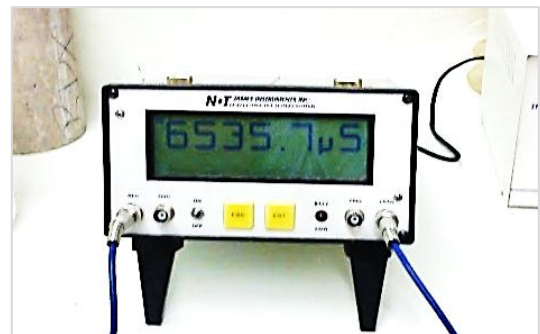
Para garantir o perfeito contato entre os transdutores e a superfície do corpo de prova foi utilizado como material acoplante graxa de silicone. Foram utilizados corpos de prova úmidos, recém-saídos da câmara úmida, com bases retificadas e isentas de sujeira.

Para cada corpo de prova foi lido o tempo gasto nos cabos condutores tomado do contato direto entre os dois transdutores. Em seguida foi lido o tempo mínimo decorrido desde a emissão até a recepção da onda com os transdutores posicionados de maneira direta, isto é, nas faces opostas dos corpos de prova.

O tempo efetivo é o tempo mínimo despendido menos o tempo gasto nos cabos condutores. Alimentando a Equação 3.6 com o tempo mínimo e a altura do corpo de prova foi determinado o valor da velocidade de propagação da onda ultrassônica na amostra. A Figura 3.15 mostra o gerador/receptor e os transdutores utilizados e a realização de uma medição.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.15 – Equipamento utilizado e medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica. (a) gerador/receptor e os transdutores; (b) detalhe do painel; (c) realização do ensaio.

### 3.3.2 - Determinação da absorção de água do concreto

O índice de absorção de água mede a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total do concreto. É um fenômeno motivado por tensões capilares que ocorrem imediatamente após o contato superficial do líquido com o concreto. Normalmente é medido secando-se uma amostra até a constância de massa a uma temperatura de  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , imergindo-a em água a uma temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e determinando-se o acréscimo de massa expressa em porcentagem da massa seca. A absorção não pode, portanto, ser usada como medida da qualidade de um concreto, mas grande parte dos concretos, considerados de boa qualidade, tem absorção bem abaixo de 10% (NEVILLE, 1997).

Para a medida desta propriedade foi utilizada metodologia da norma ABNT NBR 9778:2009 que prescreve como deve ser realizado o ensaio. A rotina consistiu na secagem das amostras em estufa a uma temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  por 72 horas. Em seguida, após serem retiradas da estufa, foram resfriadas ao ar até a temperatura ambiente. Dando sequência, procedeu-se a saturação das amostras em água a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  em três etapas: 1/3 do volume imerso por 4 horas, 2/3 por mais 4 horas e completamente imersas por mais 64 horas. Em cada etapa foi feita a comparação da massa das amostras com a massa encontrada previamente após secagem em estufa. A Figura 3.16 mostra corpos de prova com 1/3 do seu volume imerso em água (primeira etapa) e seu aspecto após a retirada do recipiente para a pesagem.



Figura 3.16 – Ensaio de absorção de água: (a) corpos de prova com 1/3 do volume imerso em recipiente com água (1ª etapa da saturação); (b) aspecto dos corpos de prova fora do recipiente.

## 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados do módulo de elasticidade além das propriedades resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água e propagação de onda ultrassônica das amostras estudadas.

Para cada concreteira, serão apresentadas as composições do concreto, os resultados encontrados dos ensaios realizados e discutidos os comportamentos e as correlações existentes entre as propriedades estudadas.

As amostras foram coletadas em três concreteiras e num canteiro de obras, como já descrito no item 3.1 Metodologia, página 42. Serão apresentados os resultados obtidos das amostras compostas de 3 corpos de prova para o módulo de elasticidade, de 5 para resistência à compressão e de 2 corpos de prova para resistência à tração por compressão diametral, para cada idade.

As coletas nas usinas (CA, CB e CC) foram feitas diretamente no caminhão betoneira antes da sua saída para a obra. A coleta do concreto do estudo de caso (CO) foi realizada no segundo caminhão fornecido para a concretagem e do seu terço médio. O cimento CP V ARI usado pelas concreteiras CA e CB foi produzido pelo mesmo fabricante.

Para determinação de valores espúrios, no tratamento dos dados da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade foram admitidos como válidos os valores do intervalo definido na Equação 4.1.

$$\frac{\Delta}{sd} = \begin{cases} +3 \\ -3 \end{cases} \quad \text{Equação 4.1}$$

onde

$\Delta$  = diferença entre um valor individual e a média dos valores  
 $Sd$  = desvio-padrão da amostra

Na Tabela C.1 do Anexo C encontram-se os valores obtidos da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, da resistência à tração por compressão diametral, da velocidade

de propagação de onda ultrassônica e do índice de absorção de água de todas as amostras de concreto ensaiadas. Nesta tabela estão apresentados os valores encontrados em cada corpo de prova além da média, desvio-padrão e coeficiente de variação do ensaio.

O cálculo do valor da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ), de acordo com o item 3.2.1. pág. 54, foi feito como mostra a Equação 4.2

$$f_{ck} = f_{cj} - 6,6 \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 4.2}$$

A condição de preparo dos concretos em estudo se enquadrou na condição A (o cimento e os agregados estão medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados). Deste modo, o desvio padrão adotado foi de 4,0 MPa e a parcela  $1,65 S_d$  resultou em 6,6 MPa.

#### 4.1 – CONCRETEIRA CA

As proporções em massa utilizadas nas amostras dos concretos da concreteira CA estão na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 estão apresentadas outras características destes concretos como os traços em volume, a determinação da consistência, pelo abatimento do tronco de cone e a identificação da origem dos agregados. Encontram-se também nesta tabela o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e a relação água/materiais secos (H). Em todos os casos foi utilizado o cimento CP V - ARI RS e aditivo plastificante. O cimento utilizado pelas concreteiras CA e CB foi produzido pelo mesmo fabricante.

Tabela 4.1 – Proporção em massa dos concretos da concreteira CA

Concreto	Coleta	Traço em massa <sup>1</sup>	Cimento (kg/m³)	Areia natural (kg/m³)	Areia artificial (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (l)	Aditivo (kg/m³)	a/c
CA20	1ª	1 : 1,59 : 2,18 : 0,61 : 3,47 : 0,84	246	391	537	150	854	206	1,47	0,84
CA30	1ª	1 : 1,12 : 1,27 : 0,47 : 2,67 : 0,66	320	357	407	151	855	212	2,24	0,66
CA30P	2ª	1 : 1,12 : 1,53 : 0,47 : 2,67 : 0,60	320	357	489	151	855	192	2,24	0,60
CA40	1ª	1 : 0,67 : 0,92 : 0,33 : 2,12 : 0,48	454	304	419	152	961	216	2,72	0,48

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento: areia natural: areia artificial: brita 0: brita 1: água

Tabela 4.2 – Proporção em volume dos concretos da concreteira CA

Concreto	Coleta	Traço em volume <sup>1</sup>	Abatimento (mm)	$\alpha$ (%)	H (%)	Areia natural	Areia artificial e brita	Adição de escória
CA20	1ª	1 : 1,96 : 2,64 : 0,65 : 3,67 : 1,20	100	54	9,5	quartzo	calcário	não
CA30	1ª	1 : 1,38 : 1,54 : 0,50 : 2,83 : 0,95	100	52	10,1	quartzo	calcário	não
CA30P	2ª	1 : 1,10 : 1,48 : 0,50 : 2,83 : 0,86	100	54	8,8	quartzo	calcário	não
CA40	1ª	1 : 0,83 : 1,11 : 0,35 : 2,24 : 0,68	100	51	9,4	quartzo	calcário	não

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento : areia natural : areia artificial : brita 0 : brita 1 : água

A partir destes dados foi construído o gráfico apresentado na Figura 4.1 onde é possível a comparação direta da composição dos concretos estudados em volume. Neste gráfico pode-se notar o modo como os parâmetros foram alterados para atingir a resistência à compressão desejada. Como esperado, o consumo de cimento foi maior nos concretos mais resistentes. Houve pouca variação no volume de água e o volume de agregados total utilizados.

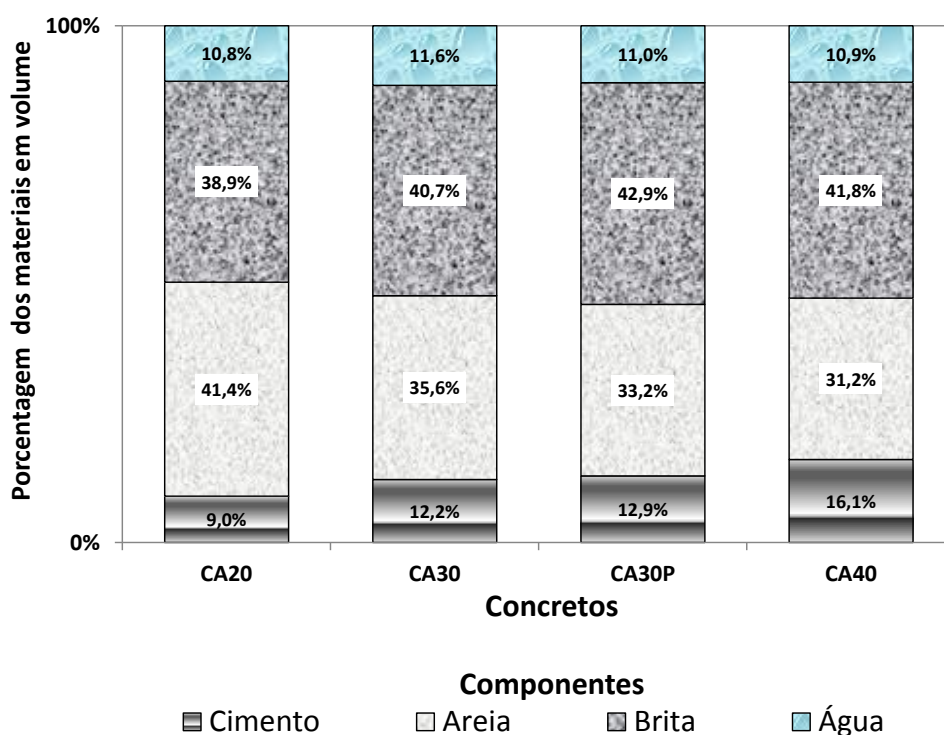


Figura 4.1 – Composição dos concretos da concreteira CA em volume.

#### 4.1.1 - Resistência à compressão

Na Tabela 4.3 estão apresentados os valores da resistência à compressão das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CA.

Os valores da resistência à compressão dos concretos CA20, CA30 e CA40 foram compatíveis com a classe de cada concreto como pode ser constatado na Figura 4.2, onde se pode observar que a curva idade do concreto - resistência à compressão do concreto CA30 está posicionada entre os concretos de menor resistência (CA20) e o de maior resistência (CA40).

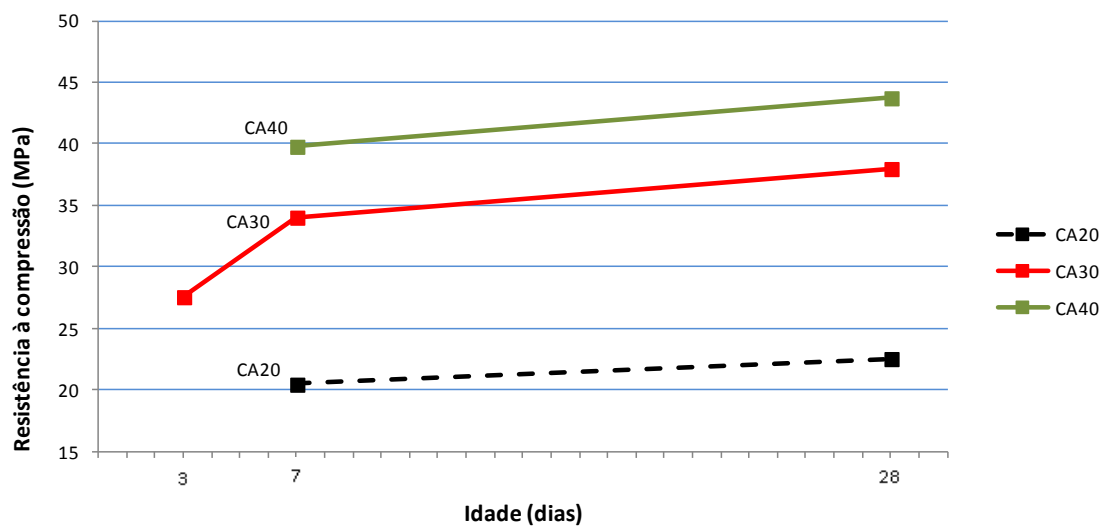


Figura 4.2 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CA20, CA30 e CA40 produzidos pela concreteira CA.

Tabela 4.3 – Resistência à compressão dos concretos da concreteira CA

Concreteira CA	Idade (dias)	Resistência à compressão						S <sub>d</sub> (MPa)	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)			
CA20	7	21,8	19,1	NR	NR	NR	20,4	1,9	9,4	15,9
	28	23,0	22,8	24,0	21,2	21,7	22,5	1,1	4,9	
CA30	3	29,5	28,5	29,2	25,9	24,7	27,6	2,1	7,8	31,4
	7	33,7	35,1	35,3	32,0	34,1	34,0	1,3	3,9	
	28	36,8	40,0	39,1	38,6	35,5	38,0	1,8	4,8	
	91	44,6	43,8	44,7	44,8	43,2	44,2	0,7	1,5	
CA30L	3	28,1	31,7	30,1	29,1	24,4	28,7	2,7	9,6	35,8
	7	31,2	34,2	38,0	37,0	38,0	35,7	2,9	8,2	
	28	41,5	39,6	43,0	43,6	44,3	42,4	1,9	4,4	
CA30P	3	25,4	26,8	25,8	26,3	24,7	25,8	0,8	3,2	24,3
	7	28,2	28,8	28,7	28,4	NR	28,5	0,3	1,0	
	28	29,4	30,8	28,4	33,9	32,1	30,9	2,2	7,0	
CA30PL	3	23,5	26,7	24,0	23,1	20,9	23,7	2,1	8,8	23,2
	7	27,5	26,9	27,7	28,6	27,4	27,6	0,6	2,3	
	28	30,0	30,1	31,0	28,0	NR	29,8	1,3	4,2	
CA40	7	37,4	42,2	NR	NR	NR	39,8	3,4	8,5	36,4
	28	42,7	43,5	46,9	43,9	41,8	43,0	0,9	2,2	

1) NR = valor não obtido

2)  $f_{ck} = f_c - 6,6$  (MPa)

O concreto CA30 e a reprodução do mesmo em laboratório CA30L apresentaram uma diferença na resistência à compressão de 3,8%, 4,5% e 10,4% aos 3, 7 e 28 dias respectivamente sempre a favor do concreto CA30L. Acredita-se que esta diferença pode ser creditada às condições mais favoráveis na produção do concreto no laboratório tais como o controle mais rígido da pesagem e da umidade dos materiais além da diferença do tipo de misturador empregado.

Pode-se constatar que os concretos CA30P e CA30PL, utilizados para o controle ao longo do tempo, apesar de coerentes entre si aos 28 dias, apresentaram um valor bem reduzido relativamente ao concreto CA30. A diferença da resistência à compressão aos 28 dias entre os concretos CA30 e CA30P foi de 23,0%. Este comportamento pode ser creditado ao fato que o estudo, feito propositalmente num outro momento de produção, tenha constatado uma possível alteração na produção e/ou nos materiais utilizados.

De acordo com o critério de cálculo da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) adotado, somente os concretos CA30 e CA30L superaram o valor da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) nominal. Os demais concretos apresentaram valores



inferiores em 20,5%, 19,0%, 22,7% e 9,0% para os concretos CA20, CA30P, CA30PL e CA40 respectivamente. Há a possibilidade de que o desvio-padrão da usina seja menor do que o adotado na determinação do  $f_{ck}$  da pesquisa.

Foi observado que o coeficiente de variação dos ensaios (CV) se apresentou na faixa compreendida entre 1,0 e 9,6%. Percebeu-se que os maiores valores do coeficiente de variação dos ensaios se deram nas idades mais baixas. Acredita-se que o baixo grau de hidratação leva a maior dispersão dos resultados função da diminuição da precisão na medição de menores cargas.

O comportamento do concreto-foco da concreteira CA no intervalo de 3 a 28 dias pode ser visualizado na Figura 4.3 e na Figura 4.4. Nelas, nota-se o ganho acentuado na resistência à compressão nas primeiras idades coerente com o cimento utilizado (CP V ARI - RS).

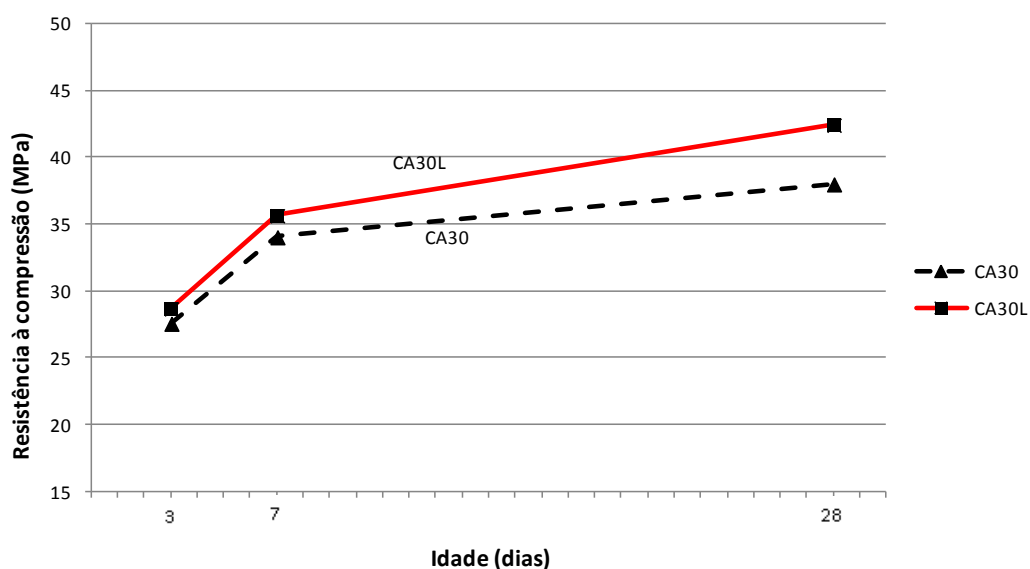


Figura 4.3 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concretos CA30 e CA30L produzidos pela concreteira CA (“L” = moldado no laboratório).

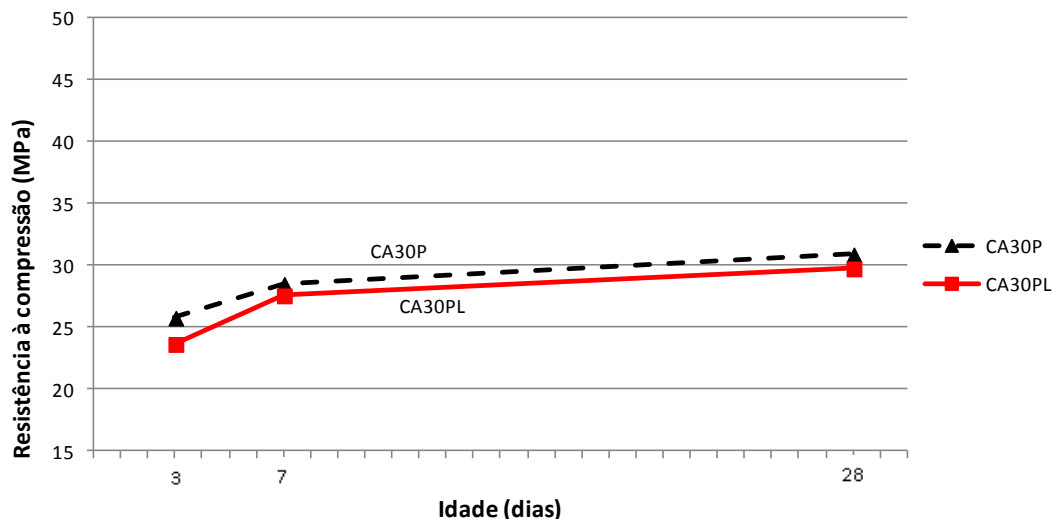


Figura 4.4 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos produzidos pela concreteira CA (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório).

A Figura 4.5, mostra a relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento dos concretos CA20, CA30 e CA40 aos 28 dias, nela pode ser observado que estes parâmetros se comportaram de maneira inversa, isto é, o crescimento da relação a/c implica numa diminuição da resistência à compressão, coerentemente com a lei de Abrams.

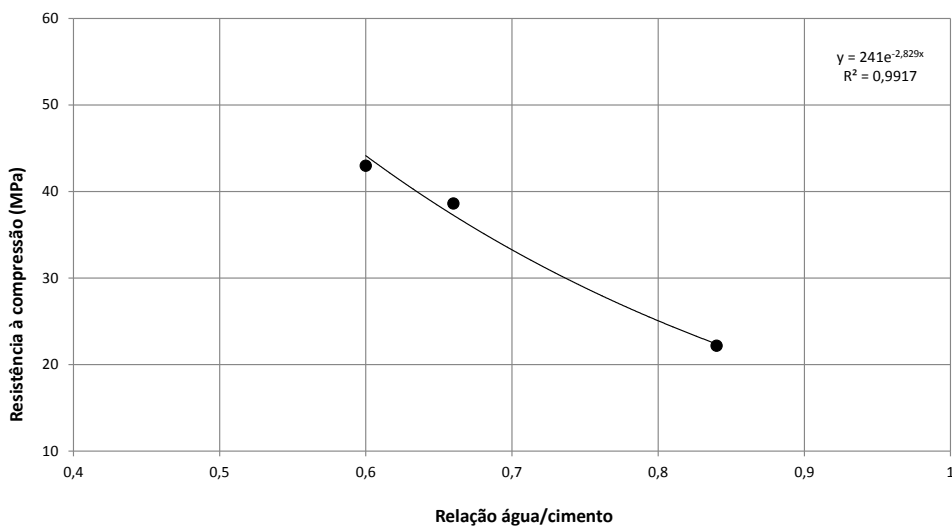


Figura 4.5 – Relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento para os concretos CA20, CA30 e CA40 aos 28 dias.

#### 4.1.2 Resistência à tração

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores da resistência à tração por compressão diametral. No gráfico da Figura 4.6 foram plotados os valores da relação entre a resistência à tração direta, equivalente a 90% da resistência à tração por compressão diametral, e a resistência à compressão aos 28 dias de cada concreto estudado. A resistência à tração dos concretos da concreteira CA apresentou grande variabilidade, mas se manteve dentro da faixa entre  $7\% f_c$  e  $11\% f_c$  em que geralmente os concretos variam, de acordo com Mehta e Monteiro (2008).

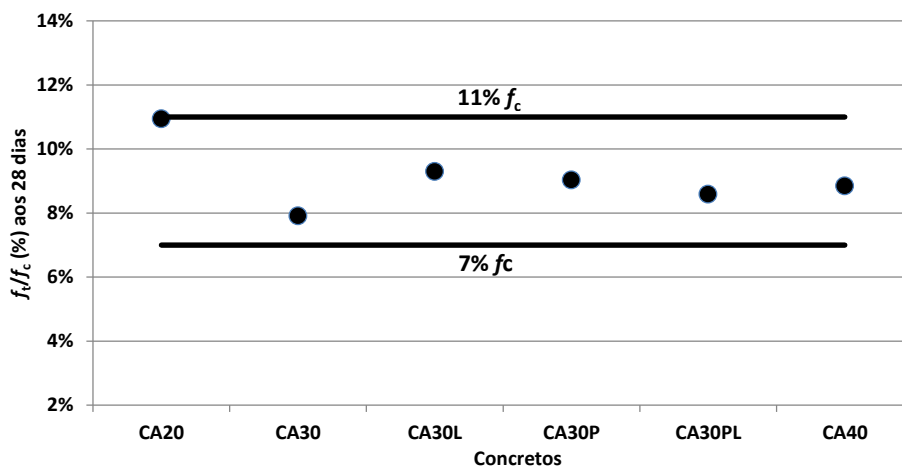


Figura 4.6 – Relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da concreteira CA.

Foi possível observar que os valores da resistência à tração por compressão diametral cresceram de maneira direta e coerente com as classes de concreto CA20, CA30 e CA40. Além disso, pode-se notar a manutenção do ganho da resistência à tração do concreto CA30 entre os 28 e 91 dias de idade, chegando a uma diferença de 29,0%.

Tabela 4.4 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos da concreteira CA

Concreteira CA	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral			S <sub>d</sub> (MPa)	CV (%)
		CP1 (MPa)	CP1 (MPa)	Média (MPa)		
CA20	7	2,27	2,77	2,52	0,4	14,1
	28	3,02	2,46	2,74	0,4	14,5
CA30	3	NR	NR	NR	-	-
	7	3,55	3,07	3,31	0,3	10,2
	28	3,20	3,48	3,34	0,2	5,9
	91	4,21	4,41	4,31	0,1	3,1
CA30L	3	3,80	3,42	3,61	0,3	7,5
	7	4,44	4,58	4,51	0,1	2,3
	28	4,69	4,08	4,38	0,4	9,7
CA30P	3	3,48	3,07	3,28	0,3	8,8
	7	2,67	4,24	3,46	1,1	32,2
	28	3,27	2,92	3,10	0,3	7,9
CA30PL	3	2,69	2,97	2,83	0,2	6,9
	7	3,78	3,49	3,63	0,2	5,5
	28	2,65	3,02	2,84	0,3	9,3
CA40	7	4,02	3,50	3,76	0,4	9,8
	28	4,10	4,50	4,30	0,3	6,6

NR = valor não obtido

#### 4.1.3 Absorção de água e propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 4.5, página 77, encontram-se os valores médios observados para a absorção de água aos 28 dias e a velocidade de propagação de onda ultrassônica das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CA aos 3, 7, 28 e 91 dias, quando ensaiados. Nesta mesma tabela foram informados também os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de forma a se comparar estas propriedades com os valores encontrados.

Os valores de absorção de água encontrados foram menores do que 10%, tido como referencial para concretos considerados de boa qualidade (NEVILLE, 1997). Observou-se

também que, mesmo para concreto com elevado valor da relação  $a/c$ , como no caso do concreto CA20 com relação  $a/c = 0,84$ , o índice de absorção foi de 6,80%, próximo aos demais valores encontrados nos concretos da mesma concreteira.

Os valores da velocidade da propagação de onda ultrassônica observados se situaram numa faixa entre 6881 e 11915 m/s, muito maiores que a velocidade típica para concretos, que varia entre 3000 e 5000 m/s (NAIK *et al.*, 2004). Apesar disso, exceto para a medida aos 91 dias do concreto CA30PL, os valores observados dentro de uma mesma amostra foram coerentes, mantendo uma relação direta entre a velocidade e a idade e entre a velocidade e a resistência à compressão. Não foi encontrada associação entre a velocidade e o módulo de elasticidade.

Tabela 4.5 – Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CA

Concreteira	Amostra	Idade (dias)												
		3			7			28				91		
		V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	Absorção de água (%)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)
CA	CA20	NR	NR	NR	NR	20,5	NR	10.766	22,5	30,622	6,80	NR	NR	NR
	CA30	10.108	27,6	30,281	10.811	34,0	35,261	11.410	38,0	33,706	6,10	9.361	44,2	36,874
	CA30L	10.789	28,7	32,800	8.779	35,6	29,765	8.813	42,4	31,980	6,55	6.881	31,5	NR
	CA30P	8.362	25,8	29,162	8.607	28,5	32,195	8.687	30,9	31,774	5,27	NR	NR	NR
	CA30PL	8.552	23,7	31,037	8.823	27,6	31,003	8.917	29,8	33,053	NR	NR	NR	NR
	CA40	NR	NR	NR	NR	39,8	NR	11.915	43,7	37,598	6,13	NR	NR	NR

NR = valor não obtido

#### 4.1.4 Módulo de elasticidade

Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores do módulo de elasticidade das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CA. Na Figura 4.7 o maior valor de módulo de elasticidade do concreto CA30 para 7 dias, em relação aos 28 dias, pode ser explicado pelo maior desvio-padrão dessa amostra.

O valor do módulo de elasticidade dos concretos CA20, CA30 e CA40 foram compatíveis com a classe de cada concreto como pode ser constatado na Figura 4.7, onde se pode observar que o valor do módulo de elasticidade aos 28 dias do concreto CA30 está posicionado entre os concretos de menor resistência (CA20) e o de maior resistência (CA40).

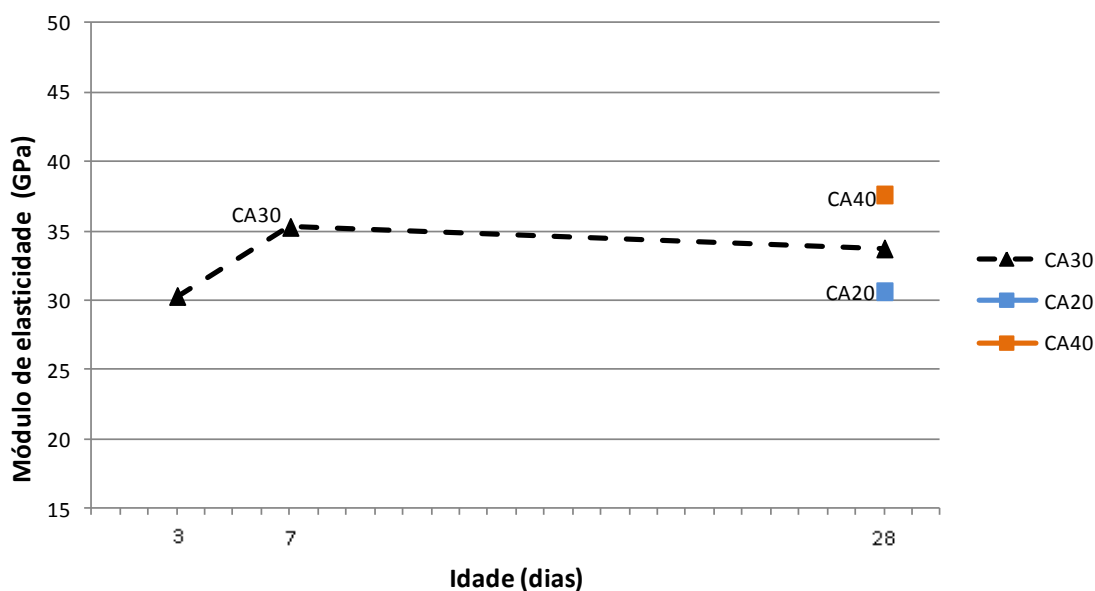


Figura 4.7 – Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto CA30 e aos 28 dias dos concretos CA20 e CA40.

O concreto CA30 e a reprodução do mesmo em laboratório, CA30L, apresentaram resultados diferentes aos 3 dias e aos 7 dias chegando aos 28 dias com valores próximos, 33,706 GPa para o concreto CA30 e 31,980 GPa para o concreto CA30L.

Constatou-se que, tanto o traço replicado no laboratório CA30L quanto os concretos de controle da produção, CA30P e CA30PL, recolhidos 148 dias após a primeira coleta, mantiveram resultados aos 28 dias próximos ao do concreto-foco, CA30.

Tabela 4.6 – Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CA

Concreteira	Idade (dias)	Módulo de elasticidade				S <sub>d</sub> (GPa)	CV (%)
		CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	CP3 (GPa)	Média (GPa)		
CA20	7	NR	NR	NR	-	-	-
	28	31,831	30,178	29,858	30,622	1,059	3,5
CA30	3	28,285	33,583	28,974	30,281	2,881	9,5
	7	32,741	38,648	34,395	35,261	3,047	8,6
	28	32,834	31,385	36,900	33,706	2,859	8,5
	91	37,554	33,943	39,124	36,874	2,657	7,2
CA30L	3	36,985	29,711	31,703	32,800	3,759	11,5
	7	26,997	29,645	32,653	29,765	2,830	9,5
	28	32,209	33,004	30,728	31,980	1,155	3,6
CA30P	3	29,192	27,830	30,465	29,162	1,318	4,5
	7	31,477	32,913	NR	32,195	1,015	3,2
	28	30,315	32,378	32,628	31,774	1,269	4,0
CA30PL	3	29,371	31,870	31,870	31,037	1,443	4,6
	7	31,546	31,513	29,951	31,003	0,911	2,9
	28	33,604	32,501	NO	33,053	0,780	2,4
CA40	7	NR	NR	NR	-	-	-
	28	39,293	39,103	34,399	37,598	2,772	7,4

NR = valor não obtido

O comportamento do módulo de elasticidade do concreto-foco e os de controle ao longo do tempo aos 3, 7 e 28 dias pode ser visualizado na Figura 4.8 e na Figura 4.9. Nelas, percebe-se que todos eles chegaram aos 28 dias com valor muito próximo, porém os concretos CA30L e CA30PL apresentaram um comportamento inesperado, com o módulo de elasticidade diminuindo entre os 3 e 7 dias de idade. Fato semelhante ocorreu com o concreto CA30, porém com decréscimo entre os 7 e 28 dias, neste caso, o crescimento foi retomado até os 91 dias como pode ser visto na Figura 4.23, página 107. Nos três casos, CA30, CA30L e CA30PL, este comportamento não teve correspondência nem com a resistência à compressão (ver Figura 4.3 e Figura 4.4, página 72) nem com a propagação de onda ultrassônica (ver página 77) desses concretos.

O coeficiente de variação dos ensaios (CV) se situou numa faixa de 2,4 a 11,5%. No caso do CA-30L, o módulo aos 3 dias teve um elevado desvio padrão, sendo que a média dos 3 valores é superior a média aos 7 dias. Atribui-se essa tendência anômala principalmente à elevada dispersão aos 3 dias.



Percebeu-se que os maiores valores do coeficiente de variação dos ensaios se deram nas idades mais baixas. Acredita-se que o baixo grau de hidratação leva a maior dispersão dos resultados função da diminuição da precisão na medição de menores cargas.

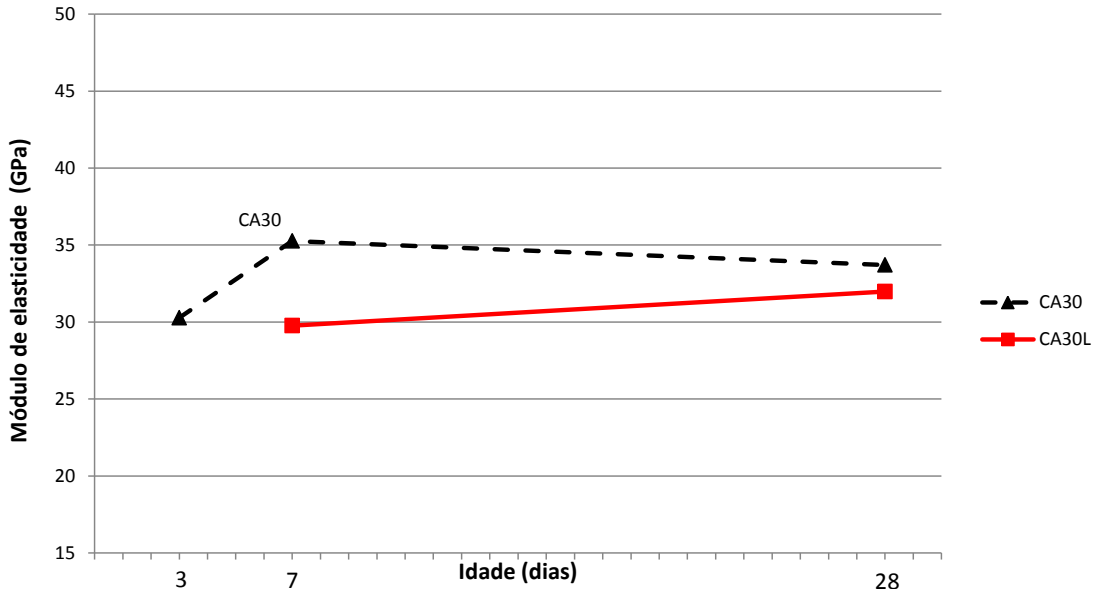


Figura 4.8 Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CA (“L” = moldado no laboratório).

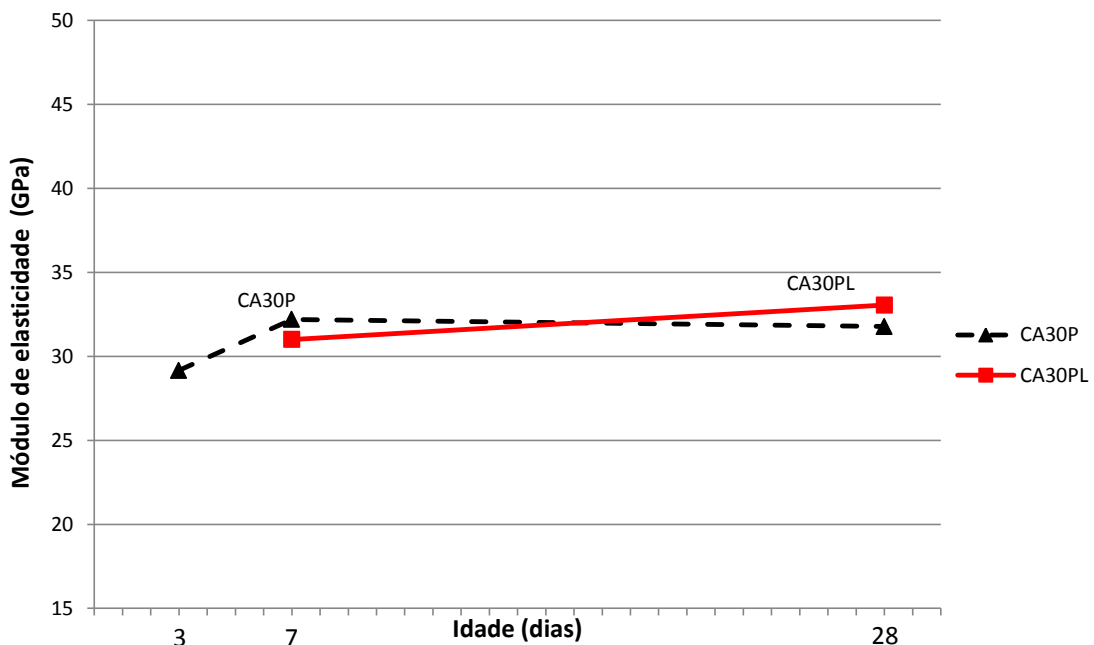


Figura 4.9 Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CA (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório).

## 4.2 – CONCRETEIRA CB

As proporções em massa utilizadas nas amostras dos concretos da concreteira CB estão na Tabela 4.7. Na Tabela 4.8 estão apresentadas outras características destes concretos como os traços em volume, a determinação da consistência, pelo o abatimento do tronco de cone e a identificação da origem dos agregados. Encontram-se também nesta tabela o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e a relação água/materiais secos (H). Em todos os casos foi utilizado o cimento CP V - ARI RS e aditivo plastificante. O cimento utilizado pelas concreteiras CA e CB foi produzido pelo mesmo fabricante. Deve ser ressaltado que o concreto de controle de produção foi coletado numa usina diferente da que forneceu a primeira coleta.

Tabela 4.7 – Proporção em massa dos concretos da concreteira CB

Concreto	Coleta	Traço em massa <sup>1</sup>	Cimento (kg/m³)	Areia natural (kg/m³)	Areia artificial (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Água (l)	Aditivo (kg/m³)	a/c
CB20	1ª	1 : 2,10 : 1,94 : 0,00 : 4,17 : 0,91	230	483	447	0	958	209	1,84	0,91
CB30	1ª	1 : 1,48 : 1,34 : 0,00 : 3,42 : 0,64	300	443	403	0	1025	192	2,40	0,64
CB30P	2ª	1 : 1,49 : 1,38 : 0,62 : 2,49 : 0,62	310	461	427	193	772	192	2,48	0,62
CB40	1ª	1 : 1,11 : 1,02 : 0,00 : 2,78 : 0,52	370	409	376	0	1028	193	2,96	0,52

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento : areia natural : areia artificial : brita 0 : brita 1 : água.

Tabela 4.8 – Proporção em volume dos concretos da concreteira CB

Concreto	Coleta	Traço em volume <sup>1</sup>	Abatimento (mm)	$\alpha$ (%)	H (%)	Areia natural	Areia artificial e brita	Adição de escória
CB20	1ª	1 : 2,59 : 2,35 : 0,00 : 4,41 : 1,30	100	55	9,9	quartzo	calcário	não
CB30	1ª	1 : 1,82 : 1,62 : 0,00 : 3,62 : 0,91	100	53	8,8	quartzo	calcário	não
CB30P	2ª	1 : 1,47 : 1,60 : 0,66 : 2,64 : 0,88	100	55	8,9	quartzo	calcário	não
CB40	1ª	1 : 1,36 : 1,23 : 0,00 : 2,94 : 0,75	100	53	8,8	quartzo	calcário	não

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento : areia natural : areia artificial : brita 0 : brita 1 : água.

A partir destes dados foi construído o gráfico apresentado na Figura 4.10 onde é possível a comparação direta da composição dos concretos estudados em volume. Neste gráfico pode-se notar o modo como os parâmetros foram alterados para atingir a resistência à compressão desejada. Como esperado, o consumo de cimento foi maior nos concretos mais resistentes. Houve pouca variação no volume de água e o volume de agregados total

utilizados com exceção do concreto CB20, onde a diminuição do consumo de cimento foi compensada com a utilização de um maior volume de água e de agregados.

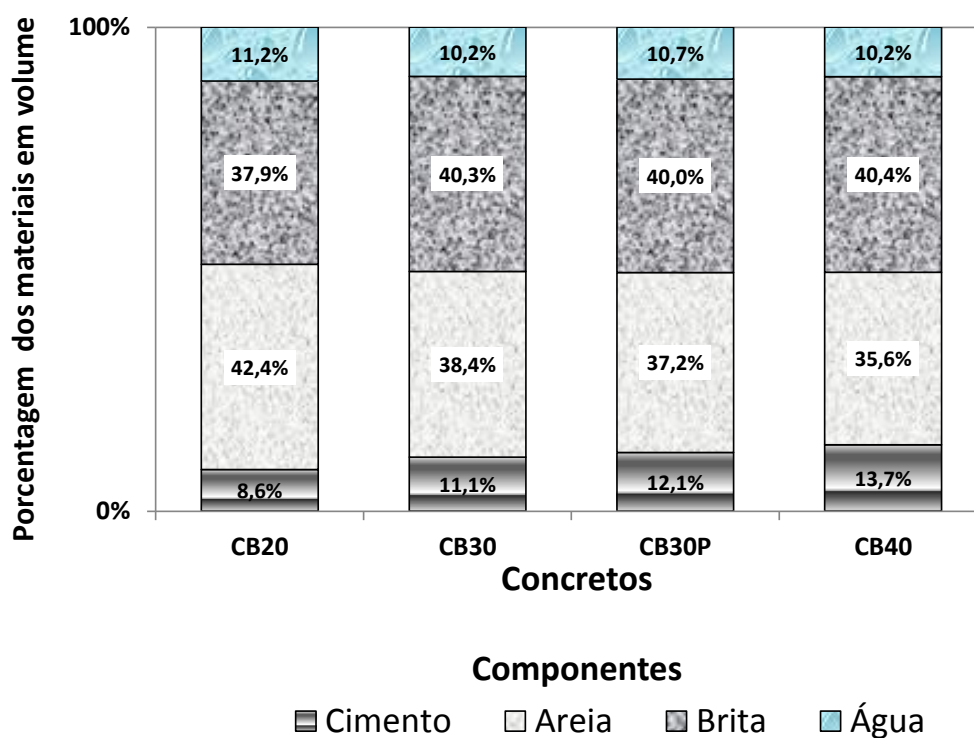


Figura 4.10 – Composição dos concretos da concreteira CB em volume

#### 4.2.1 - Resistência à compressão

A resistência à compressão das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CB está apresentada na Tabela 4.9.

Os valores da resistência à compressão dos concretos CB20, CB30 e CB40 encontrados foram compatíveis com a classe de cada concreto como pode ser constatado na Figura 4.11, onde se pode observar que a curva idade do concreto - resistência à compressão do concreto CB30 está posicionada entre os concretos de menor resistência (CB20) e o de maior resistência (CB40).

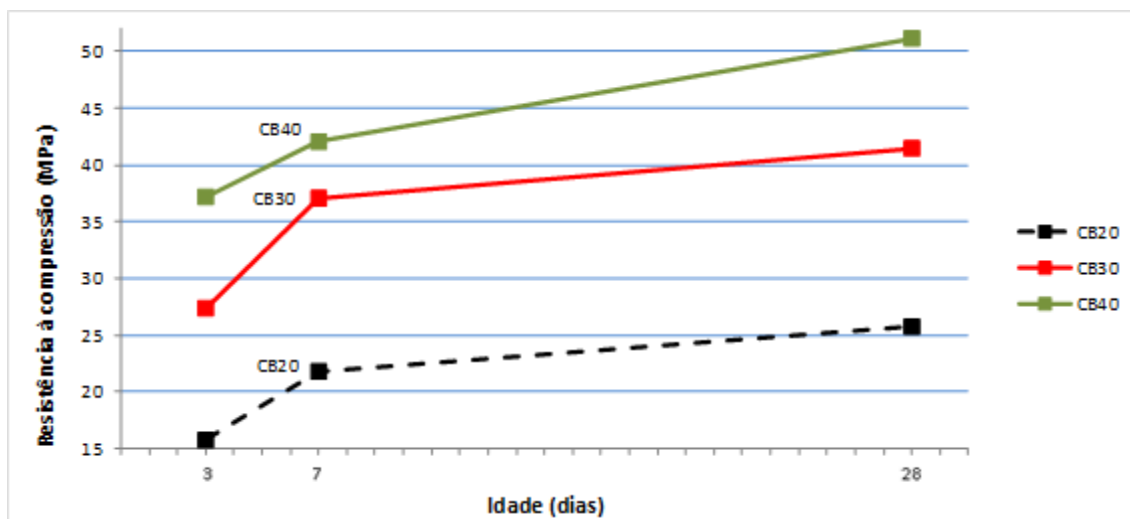


Figura 4.11 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CA20, CA30 e CA40 produzidos pela concreteira CB.

Tabela 4.9 – Resistência à compressão dos concretos da concreteira CB

Concreteira CB	Idade (dias)	Resistência à compressão					Média (MPa)	$S_d$ (MPa)	CV (%)	$f_{ck}$ (MPa)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)				
CB20	7	22,1	21,9	22,0	21,7	21,4	21,8	0,3	1,3	19,2
	28	25,3	26,1	24,9	26,2	26,2	25,8	0,6	2,4	
CB30	3	31,1	26,1	28,4	26,5	24,8	27,4	2,5	9,0	34,9
	7	35,7	36,5	37,4	36,3	39,4	37,1	1,4	3,9	
	28	43,0	37,8	39,8	45,6	41,2	41,5	3,0	7,2	
	91	43,4	43,2	40,1	46,3	41,3	42,9	2,4	5,5	
CB30P	3	NR	19,9	20,7	20,8	NR	20,5	0,5	2,3	19,1
	7	21,6	21,1	21,4	25,1	24,2	22,7	1,8	8,1	
	28	25,2	23,0	28,2	26,3	26,0	25,7	1,9	7,3	
CB30PL	3	22,3	24,0	25,5	25,9	23,1	24,1	1,5	6,3	23,2
	7	26,1	26,5	22,7	25,7	24,1	25,0	1,6	6,4	
CB40	7	38,7	40,5	49,0	41,6	40,6	42,1	4,0	9,6	44,6
	28	53,0	53,1	49,3	49,4	51,1	51,2	1,9	3,7	

1) NR = valor não obtido

2)  $f_{ck} = f_c - 6,6$  (MPa)

O comportamento do concreto-foco da concreteira CB no intervalo de 3 a 28 dias pode ser visualizado na Figura 4.12 aonde se pode perceber que concreto CB30 apresentou um ganho acentuado na resistência à compressão nas primeiras idades coerente com o cimento utilizado (CP V - ARI RS) e que o mesmo não ocorreu com os concretos CB30P e CB30PL.

Pode-se constatar que a resistência à compressão dos concretos CB30P e CB30PL, utilizados para o controle ao longo do tempo, não evoluiu rapidamente nas primeiras idades, como esperado quando se utiliza o cimento CP V - ARI RS. Além disso, estes concretos quando comparados ao concreto CB30 apresentaram um valor de resistência à compressão aos 28 dias bem reduzido, menor 37,8% e 28,2% respectivamente. Este comportamento pode ser creditado ao fato que o estudo, feito propositalmente num outro momento de produção, tenha constatado uma alteração na produção do concreto e/ou nos materiais utilizados, lembrando que o concreto de controle de produção foi coletado numa usina diferente da que forneceu a primeira coleta.

O concreto CB30P e a reprodução do mesmo em laboratório CB30PL apresentaram curvas com mesma tendência, porém com valores sempre superiores para o concreto CB30PL. Esta diferença pode ser creditada às condições mais favoráveis na produção do concreto no laboratório tais como o controle mais rígido da pesagem e da umidade dos materiais além da diferença do tipo de misturador empregado.

De acordo com o critério de cálculo da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) adotado, somente os concretos CB30 e CB40 superaram o valor da resistência à compressão característica nominal. Os demais concretos apresentaram valores inferiores em 4,0%, 36,3% e 22,7% para os concretos CB20, CB30P e CB0PL respectivamente. Há a possibilidade de que o desvio-padrão da usina seja menor do que o adotado na determinação do  $f_{ck}$  da pesquisa.

Foi observado que o coeficiente de variação dos ensaios (CV) se apresentou na faixa compreendida entre 1,3 e 9,6%

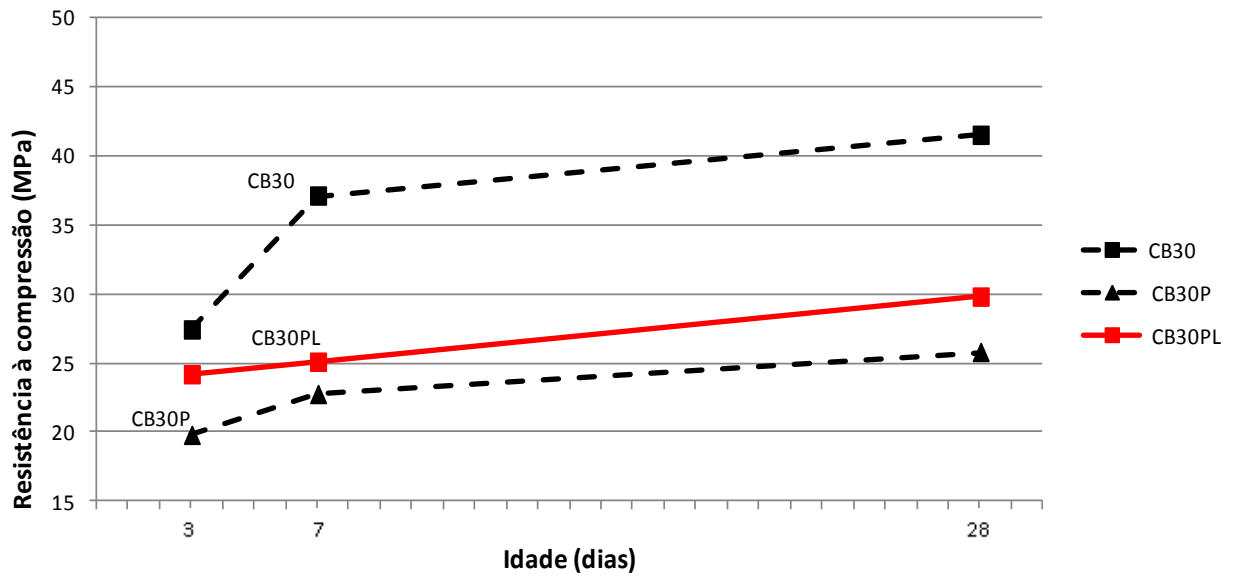


Figura 4.12 Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CB (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório).

Na Figura 4.13 que mostra a relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento dos concretos CB20, CB30 e CB40 aos 28 dias, é possível notar que estes parâmetros se comportam de maneira inversa, isto é, o crescimento da relação água-cimento implica numa diminuição da resistência à compressão, coerentemente com a lei de Abrams.

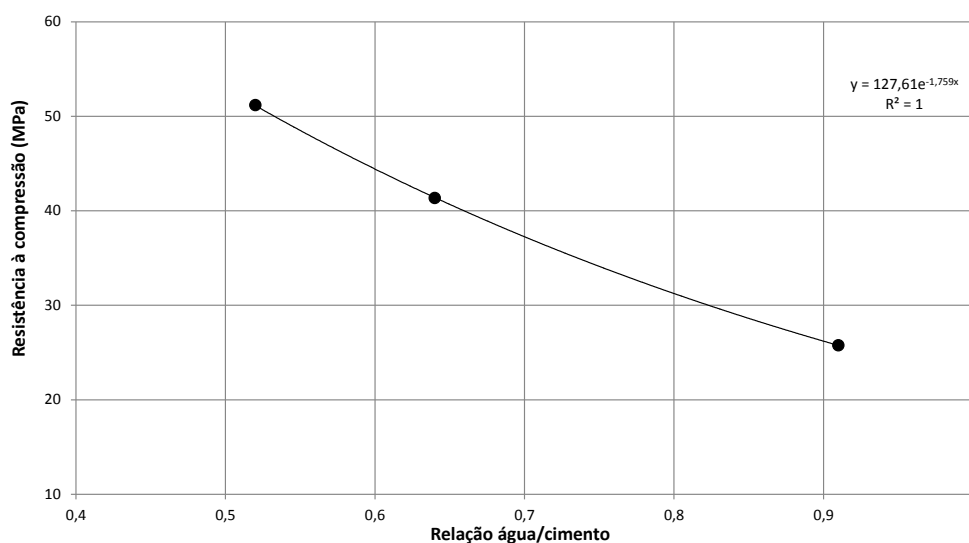


Figura 4.13 – Relação entre a resistência à compressão e a relação água-cimento para os concretos CB20, CB30 e CB40 aos 28 dias.

#### 4.2.2 Resistência à tração

Na Tabela 4.10 encontram-se os valores da resistência à tração por compressão diametral. No gráfico da Figura 4.14 foram plotados os valores da relação entre a resistência à tração direta, equivalente a 90% da resistência à tração por compressão diametral, e a resistência à compressão aos 28 dias de cada concreto estudado. A resistência à tração dos concretos da concreteira CB apresentou grande variabilidade, mas se manteve dentro da faixa entre 7%  $f_c$  e 11%  $f_c$  em que geralmente os concretos variam, de acordo com Mehta e Monteiro (2008).

Foi possível observar que os valores da resistência à tração por compressão diametral cresceram de maneira direta e coerente com as classes de concreto CB20, CB30 e CB40.

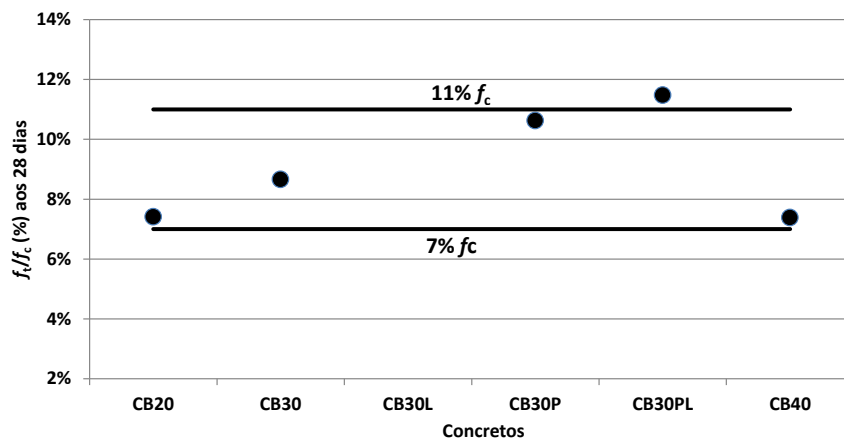


Figura 4.14 – Relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias dos concretos da concreteira CB.

Tabela 4.10 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos da concreteira CB

Concreteira	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral			S <sub>d</sub> (MPa)	CV (%)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	Média (MPa)		
CB20	7	2,22	2,51	2,37	0,20	8,6
	28	1,94	2,30	2,12	0,26	12,3
CB30	3	2,87	3,16	3,02	0,20	6,8
	7	2,70	2,70	2,70	0,00	0,2
	28	3,93	4,05	3,99	0,09	2,2
	91	3,47	3,97	3,72	0,35	9,5
CB30P	3	2,70	2,82	2,76	0,09	3,1
	7	3,71	3,62	3,66	0,06	1,7
	28	3,19	2,89	3,04	0,21	7,0
CB30PL	3	3,49	3,72	3,61	0,16	4,5
	7	2,51	4,16	3,33	1,16	34,9
	28	3,92	3,57	3,74	0,25	6,6
CB40	7	4,96	4,14	4,55	0,58	12,8
	28	4,18	4,22	4,20	0,03	0,6

#### 4.2.3 Absorção de água e propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 4.11, página 89, encontram-se os valores médios observados para a absorção de água aos 28 dias e a velocidade de propagação de onda ultrassônica das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CB nas diversas idades ensaiadas. Nesta mesma tabela foram informados também os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de forma a se comparar estas propriedades com os valores encontrados.

Os valores de absorção de água encontrados foram menores do que 10%, tido como referencial para concretos considerados de boa qualidade (NEVILLE, 1997). Observou-se também que, mesmo para concreto com elevado valor da relação a/c, como no caso do CB20 com relação a/c = 0,91, o índice de absorção foi de 4,95%, próximo aos demais valores encontrados nos concretos da mesma concreteira.



Os valores da velocidade de propagação de onda ultrassônica observados se situaram numa faixa entre 6488 e 10186 m/s, muito maiores que a velocidade típica para concretos, que varia entre 3000 e 5000 m/s (NAIK *et al.* 2004). Apesar disso, exceto para a medida aos 7 dias do concreto CB20, os valores observados dentro de uma mesma amostra foram coerentes, mantendo uma relação direta entre a velocidade e a idade e entre a velocidade e a resistência à compressão. A mesma associação foi encontrada associação entre a velocidade e o módulo de elasticidade exceto no caso do concreto CB40.

Tabela 4.11 – Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CB

Concreteira	Amostra	Idade (dias)												
		3			7			28				91		
		V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	Absorção de água (%)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)
CB	CB20	7.827	15,7	NR	6.488	21,8	29,721	8.634	25,8	33,595	4,95	NR	NR	NR
	CB30	9.062	27,4	38,042	9.355	37,1	41,137	9.819	41,5	41,892	3,58	10.186	42,9	45,2
	CB30P	8.268	19,7	25,114	8.604	22,7	27,442	8.624	25,8	28,977	7,52	NR	NR	NR
	CB30PL	8.712	24,1	29,816	9.040	25,0	33,805	9.182	29,8	35,660	6,55	NR	NR	NR
	CB40	9.104	37,2	NR	9.332	42,1	42,273	9.615	51,2	41,987	3,32	NR	NR	NR

NR = valor não obtido

#### 4.2.4 Módulo de elasticidade

Na Tabela 4.12 encontram-se os valores do módulo de elasticidade das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CB.

O valor do módulo de elasticidade dos concretos CB20, CB30 e CB40 encontrados estão apresentados Figura 4.15, onde se pode observar que o valor do módulo de elasticidade aos 28 dias do concreto CB30 é superior ao do concreto CB20, porém muito próximo ao CB40. Confrontando esses resultados com os dos concretos da concreteira CA, percebe-se que tanto os concretos das classes C20 e C40 de ambas as concreteiras se mostraram com valores aproximados, ficando a diferença por conta dos maiores valores do módulo de elasticidade atingidos pelo concreto CB30 relativamente ao CA40, se aproximando assim do concreto CB40.

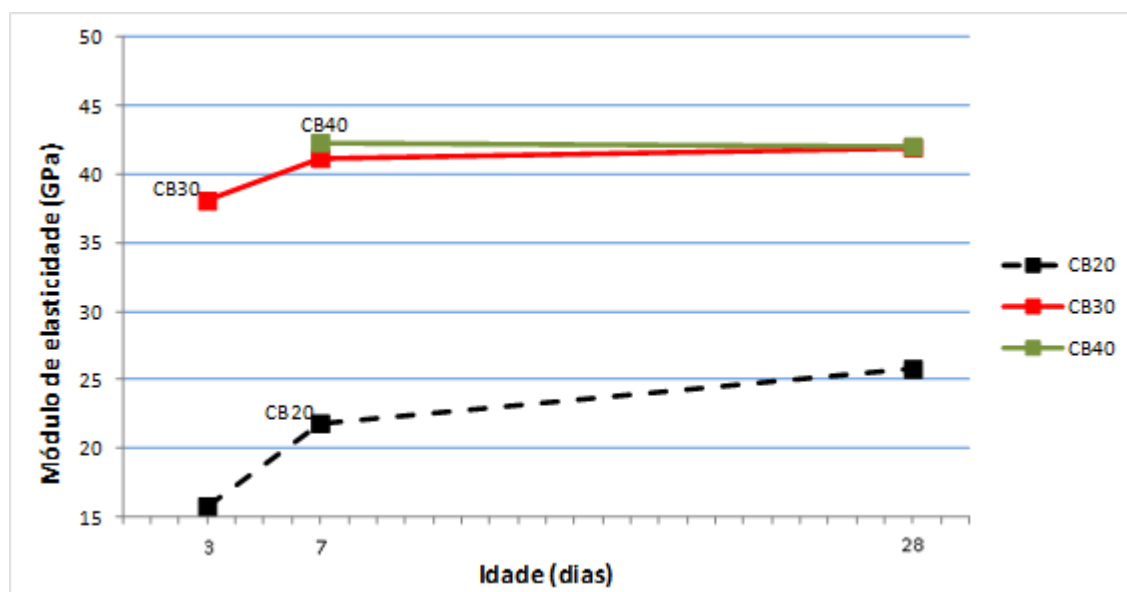


Figura 4.15 – Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias dos concretos CB20 e CB30 e aos 7 e 28 dias do concreto CB40.

Tabela 4.12 – Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CB

Concreteira CB	Idade (dias)	Módulo de elasticidade				S <sub>d</sub> (GPa)	CV (%)
		CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	CP3 (GPa)	Média (GPa)		
CB20	7	30,307	29,332	29,524	29,721	0,516	1,7
	28	34,465	33,862	32,459	33,595	1,029	3,1
CB30	3	35,735	37,376	41,016	38,042	2,703	7,1
	7	41,089	41,661	40,662	41,137	0,501	1,2
	28	41,500	43,193	40,984	41,892	1,156	2,8
	91	46,720	44,169	44,678	45,189	1,350	3,0
CB30P	3	24,551	25,677	NR	25,114	0,796	3,2
	7	26,683	29,155	26,489	27,442	1,486	5,4
	28	26,685	30,196	30,051	28,977	1,987	6,9
CB30PL	3	30,131	30,195	29,123	29,816	0,601	2,0
	7	35,126	31,869	34,420	33,805	1,713	5,1
	28	33,651	37,668	NR	35,660	2,840	8,0
CB40	7	41,885	41,798	43,137	42,273	0,749	1,8
	28	43,253	41,225	41,484	41,987	1,104	2,6

NR = valor não obtido

Os valores do módulo de elasticidade das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CB, diferentemente do ocorrido com a concreteira CA, apresentaram variação significativa aos 28 dias entre os concretos CB20 e CB30 (19,8%), porém dentro do esperado, em se tratando de concretos com diferentes resistências, e pouca variação entre o concreto CB30 e o CB40 (menos que 1%). Constatou-se também uma grande diferença entre o concreto-foco, CB30, e os concretos de controle da produção, CB30P e CB30PL, colhidos 97 dias após primeira coleta. Observou-se que o coeficiente de variação do ensaio da concreteira CB foi menor que o da concreteira CA: 3,8 e 6,1% respectivamente.

O concreto CB30P e a reprodução do mesmo em laboratório CB30PL apresentaram grande diferença no valor do módulo de elasticidade aos 28 dias (18,7%). Esta diferença pode ser creditada às condições mais favoráveis na produção do concreto no laboratório tais como o controle mais rígido da pesagem e da umidade dos materiais além da diferença do tipo de misturador empregado.

Pode-se constatar que os concretos CB30P e CB30PL, utilizados para o controle ao longo do tempo, apresentaram aos 28 dias um valor reduzido relativamente ao concreto CB30, de

30,8% para o CB30P e de 14,9% para o concreto CB30PL. Este comportamento pode ser creditado ao fato que o estudo, feito propositalmente num outro momento de produção, pode ter constatado uma alteração na produção e/ou nos materiais utilizados, lembrando que o concreto de controle de produção foi coletado numa usina diferente da que forneceu a primeira coleta.

O comportamento do módulo de elasticidade dos concretos CB30 ao longo do tempo pode ser visualizado na Figura 4.16. Nela, nota-se, com exceção do concreto CB30P, o ganho acentuado do módulo de elasticidade entre os 3 dias e 7 dias e pequena diferença entre os 7 e 28 dias devido à pouca evolução da hidratação do cimento nesse período, coerente com o esperado para o cimento utilizado (CP V ARI - RS). Percebe-se um comportamento quase que paralelo entre as curvas e a grande diferença entre os valores do concreto-foco, CB30, relativamente aos concretos de controle.

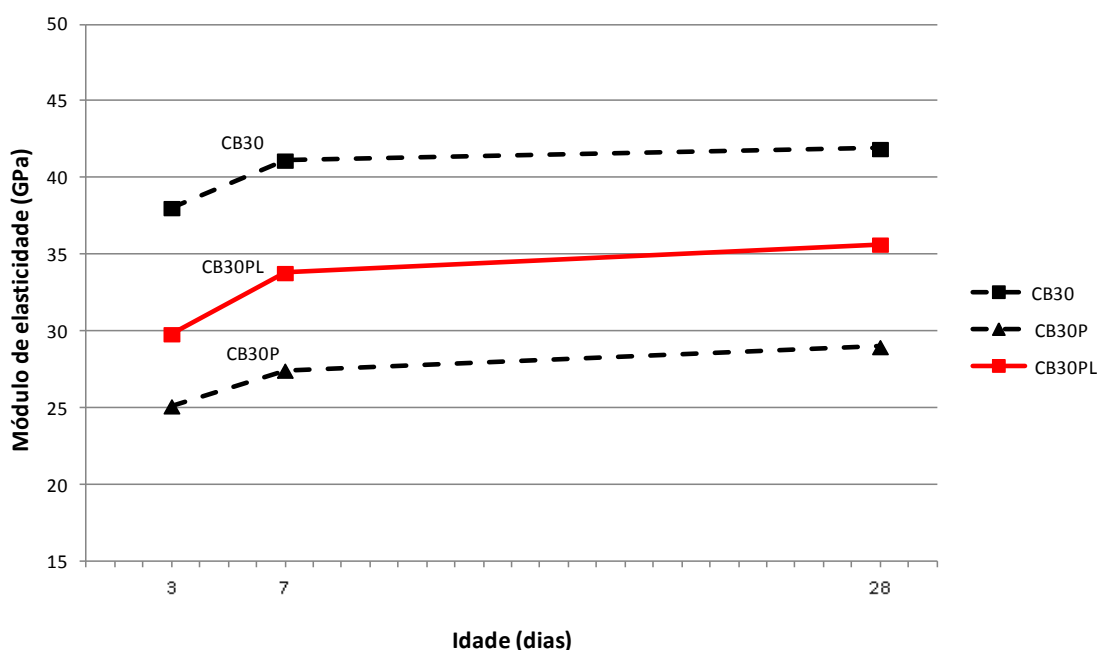


Figura 4.16 - Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto-foco produzido pela concreteira CB (“P” = controle ao longo do tempo; “PL” = controle ao longo do tempo e moldado no laboratório).

### 4.3 – CONCRETEIRA CC

As proporções em massa utilizadas na amostra do concreto da concreteira CC está na Tabela 4.13. Na Tabela 4.14 estão apresentadas outras características deste concreto como o traço em volume, a determinação da consistência, pelo o abatimento do tronco de cone, e a identificação da origem dos agregados. Encontram-se também nesta tabela o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e a relação água/materiais secos (H). Nesta formulação foi utilizado o cimento CP V - ARI RS com adição de escória e aditivo plastificante. Na quantidade indicada para o cimento está considerada a escória adicionada.

Tabela 4.13 – Proporção em massa dos concretos da concreteira CC

Concreto	Coleta	Traço em massa <sup>1</sup>	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Escória (kg/m <sup>3</sup> )	Areia natural (kg/m <sup>3</sup> )	Areia artificial (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l)	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	água/aglo- merante
CC30	1ª	1 : 0,32 : 1,09 : 1,34 : 0,00 : 2,61 : 0,62	271	88	390	482	0	938	223	2,25	0,62

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento : escória : areia natural : areia artificial : brita 0 : brita 1 : água.

Tabela 4.14 – Proporção em volume dos concretos da concreteira CC

Concreto	Coleta	Traço em volume <sup>1</sup>	Abati- mento (mm)	$\alpha$ (%)	H (%)	Areia natural	Areia artificial e brita	Relação escória/ci- mento (%)
CC30	1ª	1 : 0,32 : 1,75 : 2,13 : 0,00 : 3,65 : 1,18	100	57	4,7	quartzo	calcário	32,5

1 - A composição do traço esta na ordem: cimento : escória : areia natural : areia artificial : brita 0 : brita 1 : água.

A partir destes dados foi construído o gráfico apresentado na Figura 4.17 onde é possível a visualização da composição em volume do concreto estudado. Neste gráfico pode-se notar que o volume de aglomerante utilizado, 13,2%, foi maior que o volume de aglomerante utilizado nos concretos CA30 e CB30, 12,2 e 11,1% respectivamente. O volume de água adotado de 11,7% foi próximo ao do concreto CA30 (11,6%) e maior que o do concreto CB30 (10,2%).

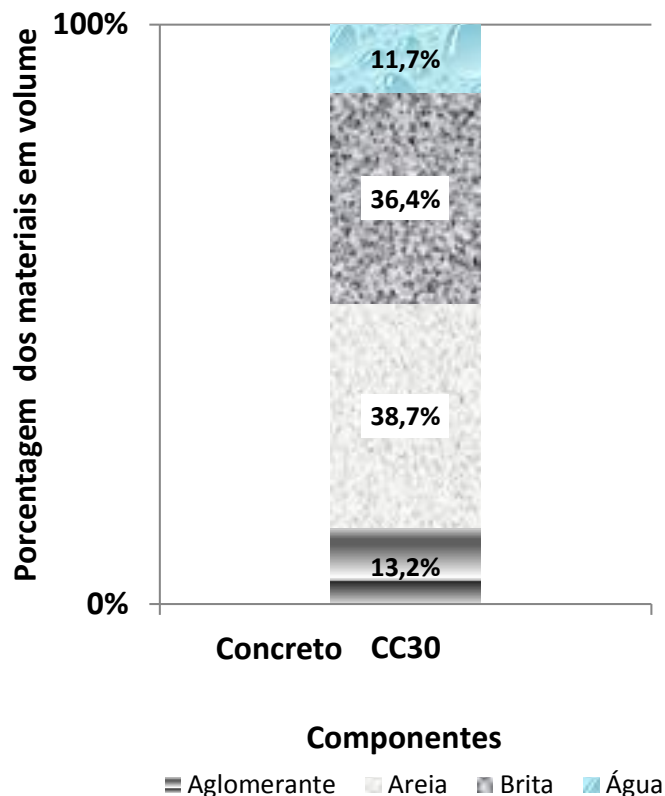


Figura 4.17 – Composição do concreto da concreteira CC em volume.

#### 4.3.1 Resistência à compressão

Na Tabela 4.15 encontram-se os valores da resistência à compressão das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CC. O coeficiente de variação dos ensaios (CV) apresentou somente um valor (6,2%).

A evolução da resistência à compressão dos 3 aos 28 dias obtidos nesta análise pode ser vista graficamente na Figura 4.18. Percebeu-se um ganho acentuado (27,8%) da resistência à compressão do concreto CC30 entre os 7 dias e os 28 dias. Este comportamento se mostrou diferente do acontecido com os concretos CA30 e CB30, apesar dos três concretos utilizarem cimento CP V ARI nas suas composições. O aumento da resistência à compressão dos concretos CA30 e CB30 no mesmo período foi de 11,8% e de 4,6% respectivamente. Acredita-se que este comportamento seja decorrente do menor grau de hidratação do cimento nas primeiras idades promovido pela adição de escória na composição do concreto CC30. Deste modo, mesmo utilizando-se um cimento CP V ARI

observou-se um crescimento da resistência menor entre os 3 e 7 dias de idade e uma evolução mais acentuada entre os 7 e 28 dias relativamente aos traços que utilizaram somente o cimento CP V sem a adição de escória (ESPINOZA-HIJAZIN e LOPES, 2010).

De acordo com o critério de cálculo da resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) adotado, o valor encontrado, 25,6 MPa, é inferior ao nominal. Há a possibilidade de que o desvio-padrão da usina seja menor do que o adotado na determinação do  $f_{ck}$  da pesquisa.

Tabela 4.15 – Resistência à compressão do concreto da concreteira CC

Concreteira CC	Idade (dias)	Resistência à compressão						$S_d$ (MPa)	CV (%)	$f_{ck}$ (MPa)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)			
CC30	3	21,8	22,3	24,5	24,0	21,2	22,8	1,4	6,2	27,0
	7	26,4	25,2	26,9	27,2	25,9	26,3	0,8	3,0	
	28	31,1	34,0	33,6	35,6	34,0	33,6	1,6	4,8	

1)  $f_{ck} = f_c - 6,6$  (MPa)

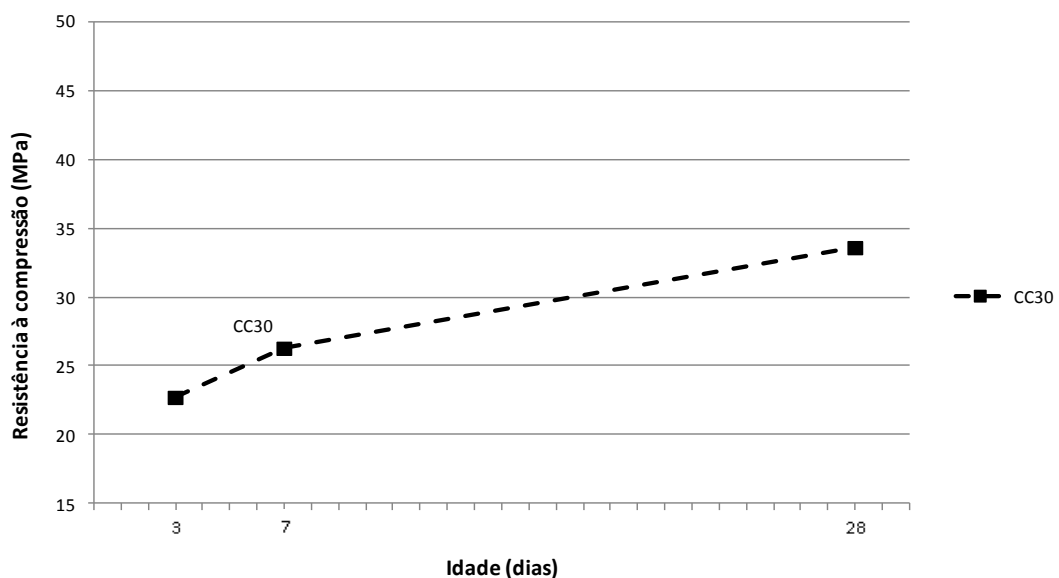


Figura 4.18 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto CC30.



### 4.3.2 Resistência à tração

Na Tabela 4.16 encontram-se os valores da resistência à tração por compressão diametral. A relação entre a resistência à tração direta, equivalente a 90% da resistência à tração por compressão diametral, e a resistência à compressão do concreto estudado aos 28 dias foi de 9,9% dentro, portanto, da faixa entre 7%  $f_c$  e 11%  $f_c$  em que geralmente os concretos variam, de acordo com Mehta e Monteiro (2008).

Tabela 4.16 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto CC30

Concreteira	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral			S <sub>d</sub> (MPa)	CV (%)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	Média (MPa)		
CC30	3	1,96	2,09	2,02	0,09	4,4
	7	2,80	2,20	2,50	0,43	17,1
	28	3,14	3,52	3,33	0,27	8,0

### 4.3.3 Absorção de água e propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 4.17 encontram-se os valores médios observados da absorção de água aos 28 dias e a velocidade da propagação de onda ultrassônica deste concreto. Nesta mesma tabela foram informados também os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de forma a se comparar estas propriedades com os valores encontrados.

O valor observado da absorção de água do concreto produzido pela concreteira CC foi igual a 4,79%, menor do que 10%, tido como referencial para concretos considerados de boa qualidade (NEVILLE, 1997).

Os valores da velocidade de propagação de onda ultrassônica observados se situaram numa faixa entre 8869 e 9359 m/s, muito maiores que a velocidade típica para concretos, que varia entre 3000 e 5000 m/s (NAIK *et al.*, 2004). Apesar disso, os valores observados foram coerentes, mantendo uma relação direta entre a velocidade e a idade, entre a velocidade e a resistência à compressão e entre a velocidade e o módulo de elasticidade

foram coerentes, mantendo uma relação direta entre a velocidade e a idade, entre a velocidade e a resistência à compressão e a velocidade e o módulo de elasticidade.

Tabela 4.17 – Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos da concreteira CC

Concreteira	Amostra	Idade (dias)									
		3			7			28			
		V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	Absorção de água (%)
CC	CC30	8.869	22,8	35,683	9.050	26,3	41,538	9.358	33,6	41,619	4,79

### 4.3.4 Módulo de elasticidade

Da concreteira CC foi analisado somente o concreto-foco coletado na obra sem a utilização dos concretos de controle no tempo e dos concretos rodados no laboratório. Os valores do módulo de elasticidade encontrados estão mostrados na Tabela 4.18.

A evolução do módulo de elasticidade dos 3 aos 28 dias obtidos nesta análise pode ser vista graficamente na Figura 4.19. Percebeu-se que, assim como o ocorrido no concreto CA30, mostrado anteriormente, o concreto CC30 apresentou um pequeno decréscimo do módulo de elasticidade entre os 7 e 28 dias de idade e que este comportamento não encontra similaridade com o da resistência à compressão nem com o da velocidade de propagação da onda ultrassônica. O coeficiente de variação dos ensaios (CV) apresentou somente um valor (13,0%).

Tabela 4.18 – Módulo de elasticidade dos concretos da concreteira CC

Concreteira	Idade (dias)	Módulo de elasticidade				S <sub>d</sub> (GPa)	CV (%)
		CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	CP3 (GPa)	Média (GPa)		
CC	3	30,309	38,473	38,267	35,683	4,655	13,0
CC30	7	41,208	43,016	40,391	41,538	1,343	3,2
	28	39,690	41,301	43,865	41,619	2,106	5,1

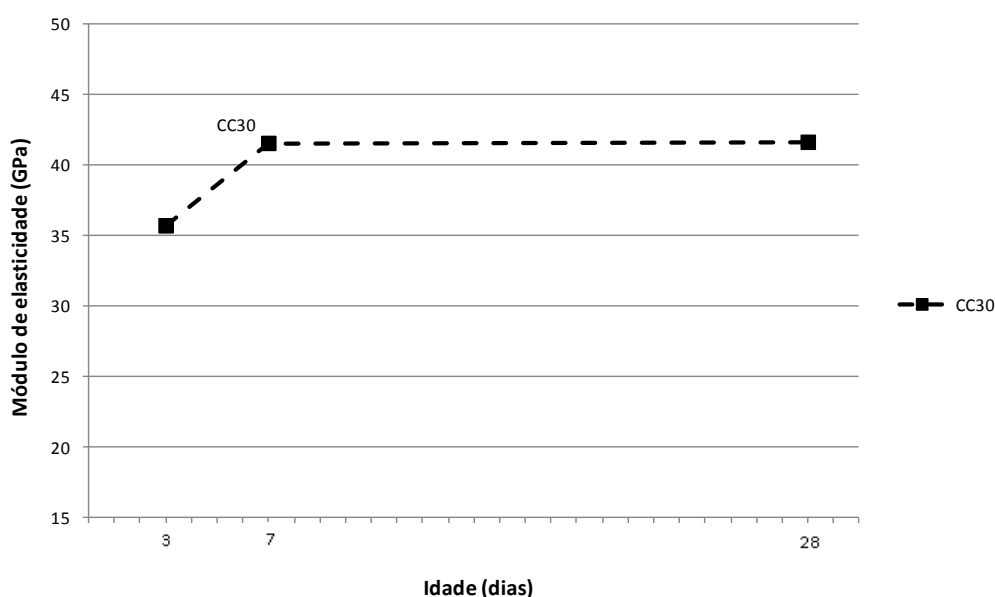


Figura 4.19 - Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7 e 28 dias do concreto CC30.

#### 4.4 – ESTUDO DE CASO (CO)

Este concreto, coletado no canteiro de obras, foi produzido pela concreteira CB. A resistência à compressão característica nominal ( $f_{ck}$ ) nominal foi de 40 MPa e o abatimento do tronco de cone foi de 140 ( $\pm 20$  mm).

##### 4.4.1 Resistência à compressão

O valor da resistência à compressão aos 28 dias das amostras do concreto CO pode ser visualizado na Tabela 4.19.

Dentro de cada amostra, o coeficiente de variação máximo encontrado dos ensaios de resistência à compressão foi de 6,8%. Quando se considerou o conjunto das 11 amostras, o coeficiente de variação foi elevado, de 17,0% para um valor médio de 51,5 MPa e desvio padrão de 8,70 MPa.

Tabela 4.19 – Resistência à compressão do concreto do estudo de caso (CO)

Estudo de caso CO	Idade (dias)	Resistência à compressão						$S_d$ (MPa)	CV (%)	$f_{ck}$ (MPa)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	CP4 (MPa)	CP5 (MPa)	Média (MPa)			
CO1	28	51,0	52,3	51,4	51,1	48,8	50,9	1,3	2,5	44,3
CO2	28	68,6	65,3	62,5	70,3	70,7	67,5	3,5	5,2	60,9
CO3	28	70,4	64,5	64,2	62,2	67,2	65,7	3,2	4,9	59,1
CO4	28	55,1	55,4	55,6	52,0	60,0	55,6	2,9	5,1	49,0
CO5	28	48,3	46,9	46,6	NR	NR	47,3	0,9	1,9	40,7
CO6	28	47,8	47,9	51,0	48,2	48,1	48,6	1,3	2,8	42,0
CO7	28	53,9	53,3	54,2	51,1	49,2	52,3	2,1	4,1	45,7
CO8	28	40,6	41,8	45,9	46,3	45,2	44,0	2,6	5,9	37,4
CO9	28	51,9	52,8	51,9	49,3	49,0	51,0	1,7	3,4	44,4
CO10	28	47,5	47,1	42,5	43,5	40,8	44,3	2,9	6,6	37,7
CO11	28	41,3	37,4	43,3	36,8	39,4	39,6	2,7	6,8	33,0

1) NR = valor não obtido

2)  $f_{ck} = f_c - 6,6$  (MPa)

##### 4.4.2 Resistência à tração

Na Tabela 4.20 encontram-se os valores da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias das amostras do concreto CO. No gráfico da Figura 4.20 foram plotados os valores da relação entre a resistência à tração direta, equivalente a 90% da resistência à tração por compressão diametral, e a resistência à compressão de cada concreto estudado.

A resistência à tração dos concretos coletados na obra apresentou grande variabilidade e, na metade das observações, ficou abaixo do limite inferior da faixa entre  $7\% f_c$  e  $11\% f_c$  em que geralmente os concretos variam, de acordo com Mehta e Monteiro (2008). Esta tendência, diferente nos demais concretos estudados, talvez seja decorrente dos altos valores de resistência à compressão encontrados nestes concretos (média de 51,5 MPa) que faz com que a relação resistência à tração/resistência à compressão diminua.

Tabela 4.20 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto do estudo de caso (CO)

Estudo de caso	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral			S <sub>d</sub> (MPa)	CV (%)
		CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	Média (MPa)		
CO1	28	-	-	-	-	-
CO2	28	5,84	5,84	5,84	0,00	0,0%
CO3	28	3,70	3,97	3,84	0,19	5,0%
CO4	28	-	-	-	-	-
CO5	28	4,34	4,04	4,19	0,21	5,1%
CO6	28	-	-	-	-	-
CO7	28	2,22	2,53	2,38	0,22	9,2%
CO8	28	2,81	2,83	2,82	0,01	0,5%
CO9	28	3,40	3,96	3,68	0,40	10,8%
CO10	28	3,40	3,56	3,48	0,11	3,3%
CO11	28	4,15	2,94	3,55	0,86	24,1%
<b>Todos</b>	28	-	-	3,72	1,03	27,7%

NR = valor não obtido

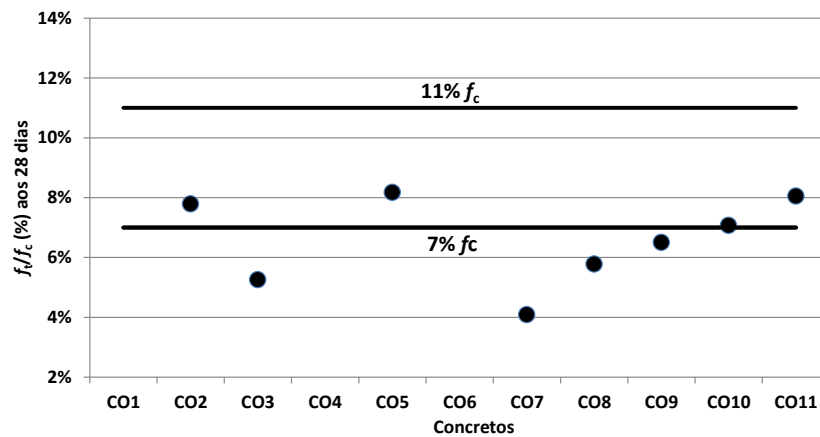


Figura 4.20 – Relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias do concreto do estudo de caso, CO.

#### 4.4.3 Absorção de água e propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 4.21 encontram-se os valores de absorção de água das amostras do concreto do estudo de caso. Foram observados valores menores do que 10%, tido como referencial para concretos considerados de boa qualidade (NEVILLE, 1997).

Nesta tabela está apresentado também o valor da velocidade da propagação de onda ultrassônica aos 28 dias de três amostras do concreto do estudo de caso (CO). Os valores de velocidade observados se situaram numa faixa entre 8938 e 9526 m/s, muito maiores que a velocidade típica para concretos, que varia entre 3000 e 5000 m/s (NAIK *et al.*, 2004). Apesar disso, os valores observados foram coerentes aos encontrados nos demais concretos estudados para a mesma idade.

Tabela 4.21 – Velocidade da propagação de onda ultrassônica; resistência à compressão; módulo de elasticidade e índice de absorção de água dos concretos do estudo de caso (CO)

Estudo de caso	Amostra	Idade (28 dias)			Absorção de água (%)
		V (m/s)	$f_{cj}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	
CO	CO1	9.526	50,9	40,850	5,28
	CO2	9.382	67,5	39,860	6,83
	CO3	NR	65,7	40,105	5,85
	CO4	NR	55,6	40,142	6,40
	CO5	NR	46,1	35,616	5,50
	CO6	NR	48,6	36,424	2,73
	CO7	NR	52,3	42,004	2,59
	CO8	NR	43,9	37,647	5,34
	CO9	NR	51,0	39,554	3,87
	CO10	NR	44,3	40,097	5,77
	CO11	8.938	39,6	31,620	6,50

NR = valor não obtido

#### 4.4.4 Módulo de elasticidade

Diferentemente das outras amostras, o concreto CO ( $f_{ck} = 40$  MPa) foi coletado na obra em 11 datas distintas e analisado somente aos 28 dias. Os valores do módulo de elasticidade podem ser visualizados na Tabela 4.22.

Foi observado para o conjunto de 11 ensaios o valor médio do módulo de elasticidade aos 28 dias de 38,544 GPa com desvio padrão de 3,170 GPa e coeficiente de variação máximo de 8,2%, igual ao coeficiente de variação quando se considerou as 11 amostras conjuntamente.



Tabela 4.22 – Módulo de elasticidade dos concretos do estudo de caso (CO)

Estudo de caso	Idade (dias)	Módulo de elasticidade				S <sub>a</sub> (GPa)	CV (%)
		CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	CP3 (GPa)	Média (GPa)		
CO1	28	42,981	39,701	39,868	40,850	1,847	4,5
CO2	28	41,900	39,583	38,098	39,860	1,916	4,8
CO3	28	40,000	40,096	40,219	40,105	0,110	0,3
CO4	28	40,106	39,450	40,869	40,142	0,710	1,8
CO5	28	36,463	35,640	34,946	35,683	0,759	2,1
CO6	28	35,319	37,635	36,318	36,424	1,162	3,2
CO7	28	44,491	43,466	38,056	42,004	3,458	8,2
CO8	28	37,249	38,171	37,521	37,647	0,474	1,3
CO9	28	41,447	38,447	38,767	39,554	1,647	4,2
CO10	28	40,561	40,816	38,913	40,097	1,033	2,6
CO11	28	33,233	30,540	31,088	31,620	1,423	4,5

#### 4.5 – COMPARAÇÕES E CORRELAÇÕES

Neste item serão apresentadas e discutidas as relações das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto-foco (30 MPa) aos 28 dias entre as concreteiras CA, CB e CC. Será analisada também a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos estudados. Outro fator a ser estudado é a relação entre a tração direta e a resistência à compressão aos 28 dias.

De modo a se ter uma noção do conjunto da propriedade resistência à compressão, foram resumidos na Figura 4.21 os valores da resistência à compressão aos 28 dias de todos os concretos investigados. Com o mesmo objetivo, encontram-se resumidos na Figura 4.22 os valores do módulo de elasticidade aos 28 dias destes concretos. Da observação destes dois gráficos é possível se constatar que, nos concretos estudados, a propriedade resistência à compressão apresentou maior variação que o módulo de elasticidade.

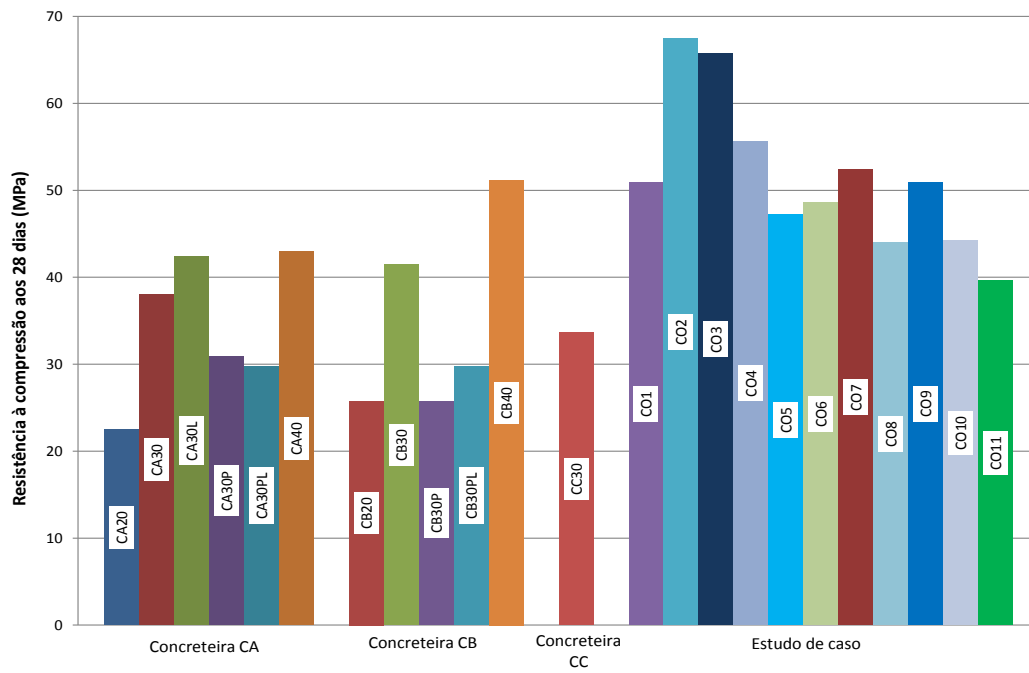


Figura 4.21 – Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos estudados.

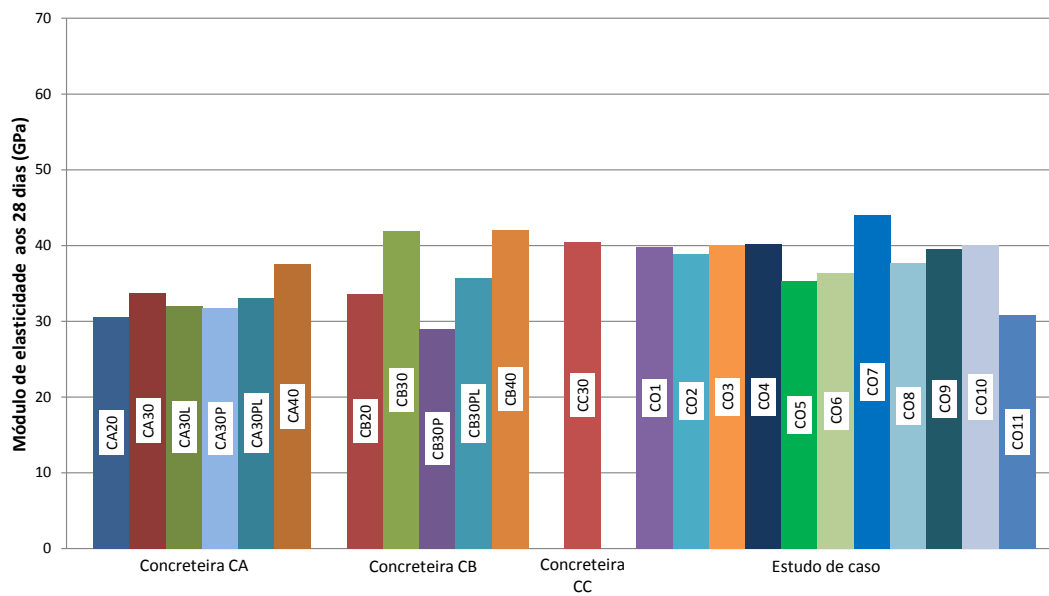


Figura 4.22 - Módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos estudados.

#### 4.5.1 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias dos concretos-foco

Os valores, aos 28 dias, do módulo de elasticidade, do módulo de elasticidade de acordo com a expressão de previsão da norma ABNT NBR 6118:2007, da resistência à compressão e da resistência característica encontrados nas amostras dos concretos-foco das concreteiras CA, CB e CC encontram-se mostrados na Tabela 4.23.

O módulo de elasticidade apresentou pouca variação entre os concretos CB30 e CC30 (0,7%) e uma variação significativa entre o concreto CA30 e os demais (24,3% para o CB30 e 23,5% para o CC30). Foi observada grande variação na resistência à compressão das amostras, num máximo de 23,5% entre o concreto CC30 e o concreto CB30. Os concretos CA30 e CB30 ultrapassaram o valor característico ( $f_{ck}$ ) nominal (30 MPa). O mesmo não aconteceu com o concreto CC30 que apresentou  $f_{ck}$  igual a 27,0 MPa, abaixo do esperado.

Com relação ao modelo de previsão da norma ABNT NBR 6118:2007 do módulo de elasticidade a partir do conhecimento da resistência à compressão característica, observou-se que todos os valores obtidos superaram a previsão da norma num percentual máximo de 43,1%, no caso do concreto CC30.

Deste modo, diante da variabilidade dos valores das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão, pode-se inferir que os concretos estudados, apesar de estarem enquadrados na mesma classe, têm comportamento diferente.

Tabela 4.23 – Valores médios do módulo de elasticidade, módulo de elasticidade de acordo com a expressão de previsão da NBR 6118:2007, da resistência à compressão e da resistência característica das amostras das concreteiras CA, CB e CC aos 28 dias

Concreteira	$E_{ci}$ (GPa)	$E_{ci}$ (NBR 6118:2007) (GPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)
CA30	33,706	31,380	38,0	31,4
CB30	41,892	33,083	41,5	34,9
CC30	41,619	29,098	33,6	27,0

#### 4.5.2 - Módulo de elasticidade e da resistência à compressão dos concretos CA30 e CB30 aos 3, 7, 28, e 91 dias

Do acompanhamento da variação do módulo de elasticidade dos concretos-foco CA30 e CB30 ao longo de 91 dias, mostrado na Figura 4.23, percebe-se um paralelismo entre as curvas demonstrando mesma tendência, porém com expressiva diferença dos valores encontrados a favor do concreto CB30. Aos 3 dias, a diferença entre concretos é de 27,7%, aos 7 dias de 22,5%, aos 28 dias de 30,5% e aos 91 dias, 17,9%. Foi notada uma inflexão inesperada aos 7 dias nas duas curvas mais acentuada na curva do concreto CA30 com uma retomada do crescimento até os 91 dias. Percebeu-se também que os valores do módulo de elasticidade mantiveram crescimento considerável após os 28 dias, de 9,4% para o concreto CA30 e de 7,9% para o CB30.

A variação da resistência à compressão dos concretos-foco CA30 e CB30 ao longo de 91 dias está mostrado na Figura 4.24 e pode-se observar que, em ambos os casos, foi compatível com o cimento utilizado (CP V - ARI RS). Foi observado um crescimento da resistência inicialmente mais acelerado do concreto CB, diminuindo a partir dos 28 dias a ponto de atingir um valor pouco menor, e muito próximo, ao do concreto CA aos 91 dias.

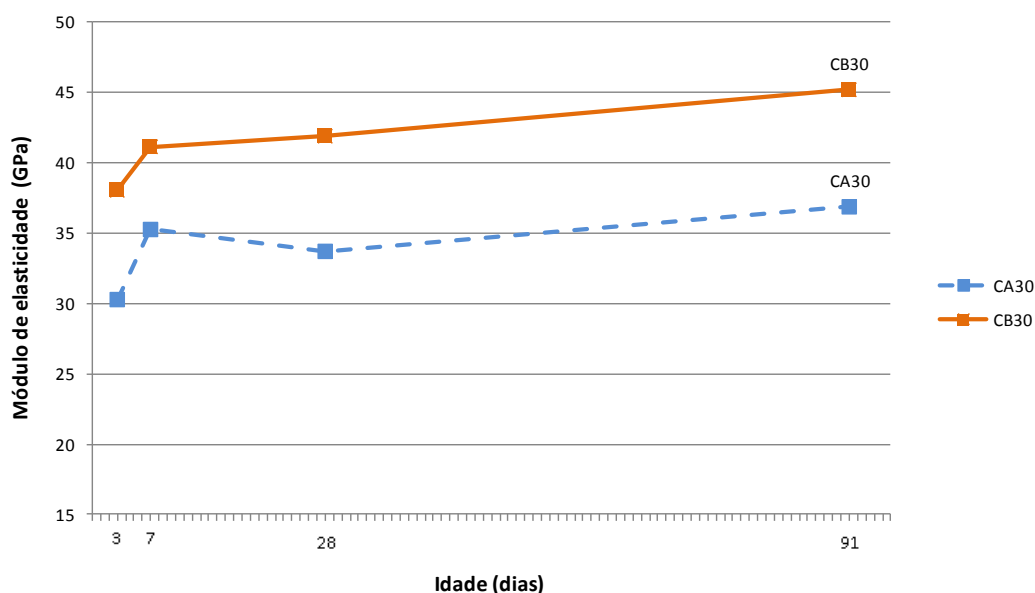


Figura 4.23- Módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) aos 3, 7, 28 e 91 dias dos concretos CA30 e CB30.

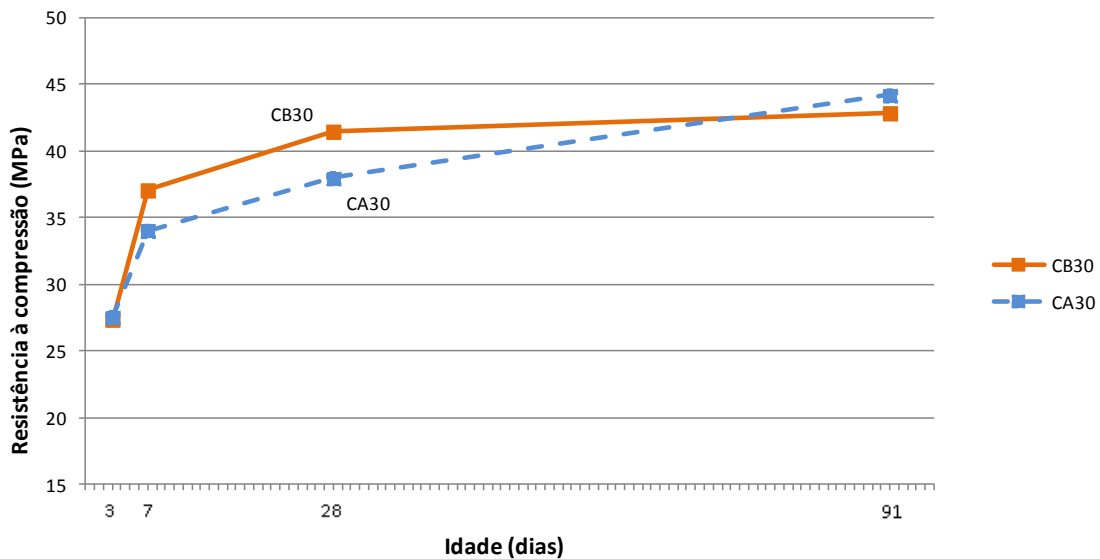


Figura 4.24 - Resistência à compressão ( $f_c$ ) aos 3, 7, 28 e 91 dias dos concretos CA30 e CB30.

#### 4.5.3 – Relação entre a tração direta e a resistência à compressão aos 28 dias

De modo geral a relação entre a tração direta (equivalente a  $0,9 f_{t,D}$  encontrada) e a resistência à compressão aos 28 dias das amostras ensaiadas ficaram dentro da faixa entre  $7\% f_c$  e  $11\% f_c$  em que geralmente os concretos variam, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), como pode ser visto na Figura 4.25. Para o concreto CO foi adotado o valor médio das onze coletas.

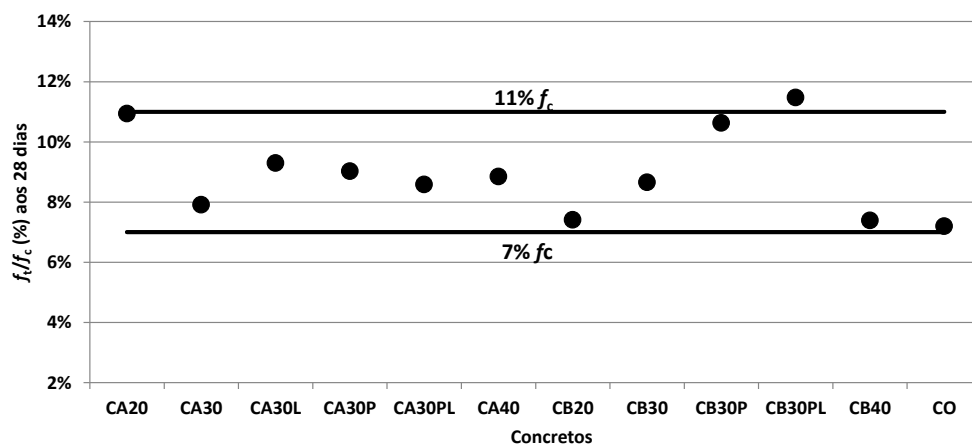


Figura 4.25 - Resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias de todos os concretos.

#### 4.5.4 – Parâmetros de mistura

A composição dos concretos estudados é similar no que se refere à origem dos materiais constituintes. A proporção em volume dos concretos encontra-se resumida na Tabela 4.2 (pág. 69), na Tabela 4.8 (pág. 81), e na Tabela 4.14 (pág. 93). Nas mesmas tabelas, estão apresentadas outras características desses concretos como os traços em volume, o abatimento do cone de Abrams, o tipo de cimento, a origem dos agregados e a utilização de escória, que ocorreu somente no caso do concreto CC30.

A partir das proporções em volume dos concretos estudados, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 4.26 onde é possível a comparação direta da composição desses. Neste gráfico pode-se notar o modo como os parâmetros foram alterados para atingir a resistência à compressão desejada. Como esperado, o consumo de aglomerante foi maior nos concretos mais resistentes. O volume de água utilizado e o volume de agregados total foi muito próximo entre os traços. Pode-se notar também, que para concretos da mesma classe, o teor de areia utilizado pela concreteira CB foi sempre maior que o adotado pela concreteira CA.

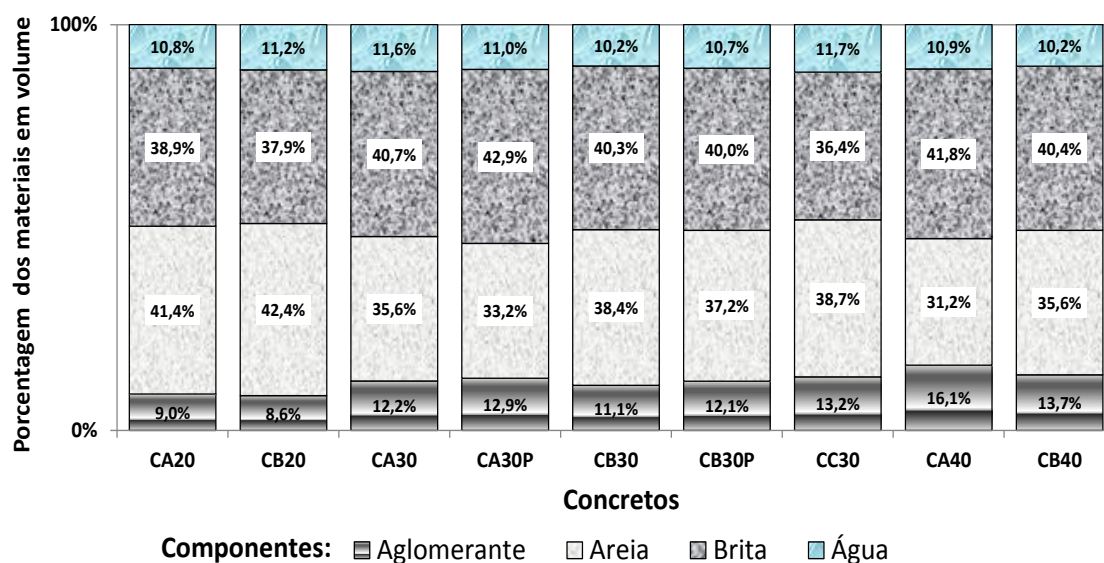


Figura 4.26 – Composição dos concretos em volume.

### a) Relação água/cimento

A associação entre a relação água/cimento e as propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão, ambos aos 28 dias, podem ser observadas nas Figuras 4.27 e na Figura 4.28 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação inversa entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão decresceram com o aumento da relação água/cimento. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da quantidade de água que resulta numa pasta mais porosa, diminuindo sua rigidez e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto (SILVA, 2003; JACINTHO E GIONGO, 2005).

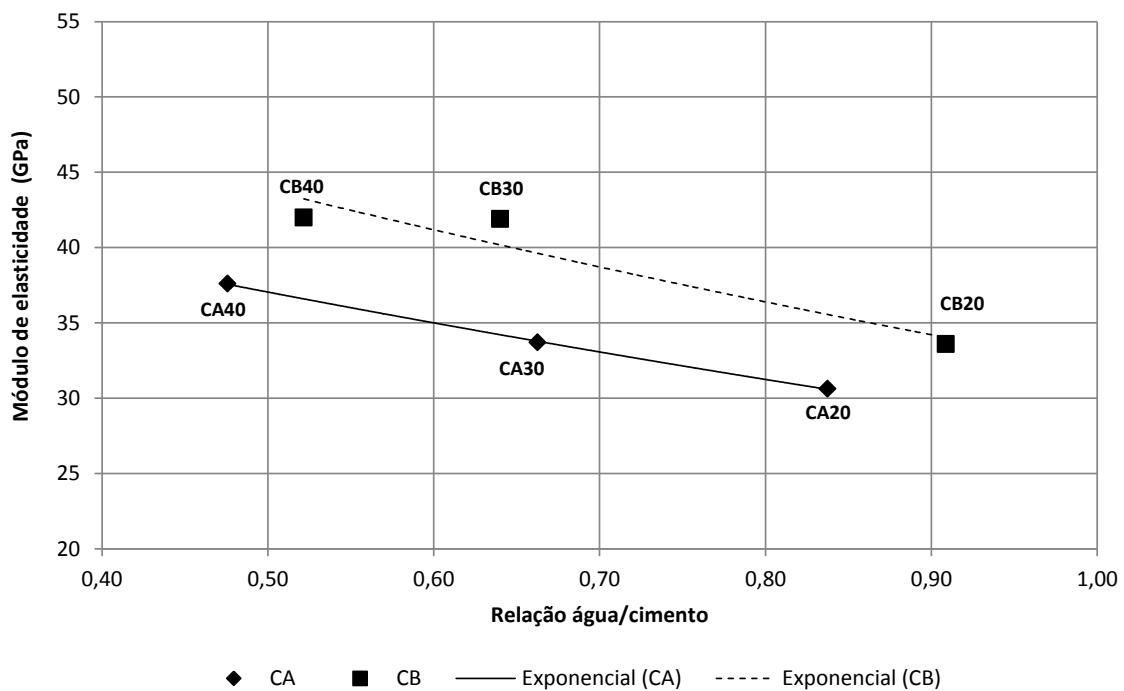


Figura 4.27 – Módulo de elasticidade em função da relação água/cimento.

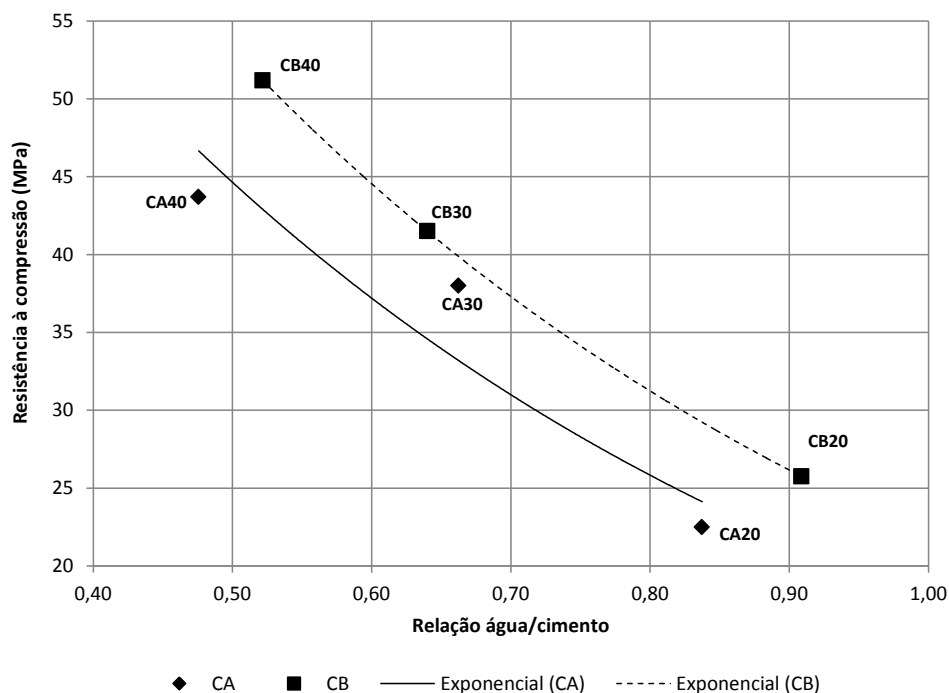


Figura 4.28 – Resistência à compressão em função da relação água/cimento.

#### b) Consumo de cimento

A associação entre o consumo de cimento e as propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão, ambos aos 28 dias, podem ser observadas nas Figuras 4.29 e na Figura 4.30 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação direta entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão cresceram com o aumento do consumo de cimento. Esta relação justifica-se tendo em vista que um maior consumo de cimento (para o mesmo consumo de água) na composição do concreto acarreta numa menor porosidade da matriz pasta de cimento, aumentando sua rigidez e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto (COUTINHO E GONÇALVES, 1994; SILVA, 2003). Uma vez que o valor do abatimento é constante (100 mm), o comportamento é similar ao observado por Melo e Helene (2002) conforme descreve a Figura 2.9, página 22.



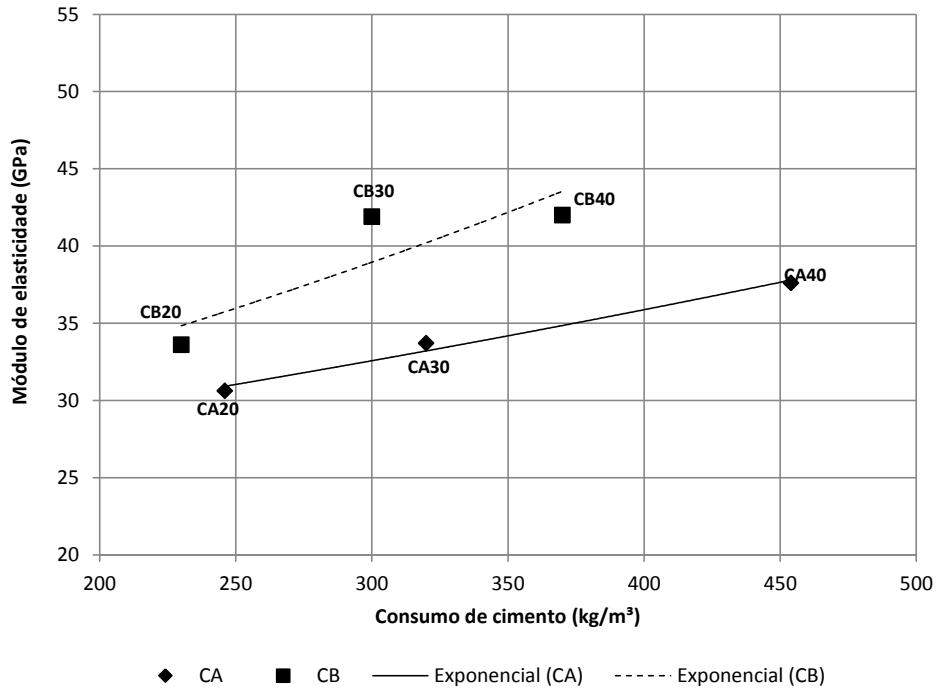


Figura 4.29 – Módulo de elasticidade em função do consumo de cimento.

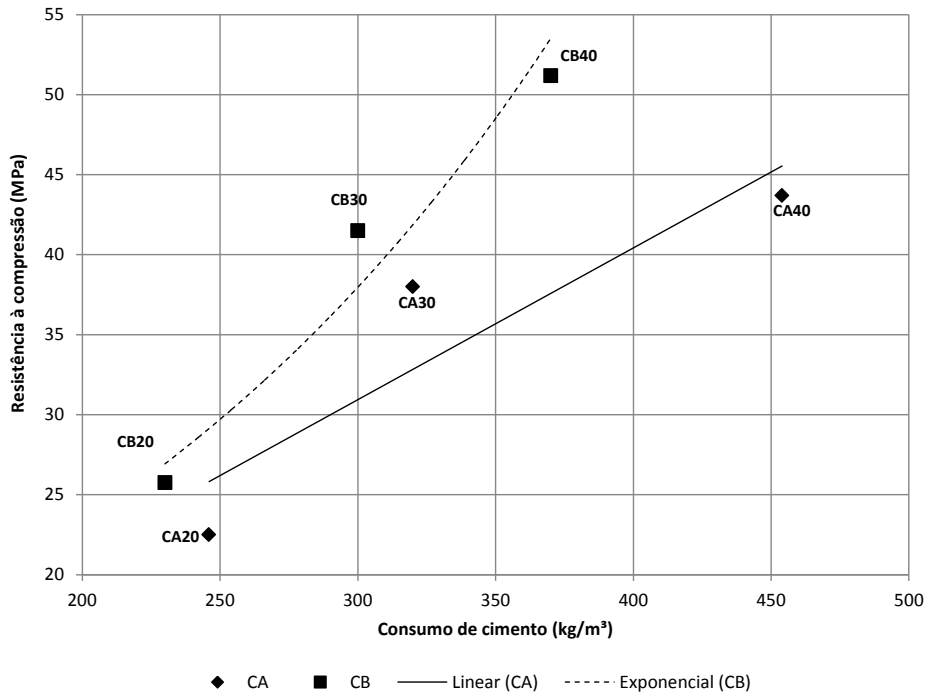


Figura 4.30 – Resistência à compressão em função do consumo de cimento.

### c) Consumo de agregado total

A associação entre o consumo de agregado total e as propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão, ambos aos 28 dias, podem ser observadas nas Figuras 4.31 e na Figura 4.32 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação inversa entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão decresceram com o acréscimo do consumo de agregado total na composição. Os resultados das tendências observadas são similares aos observados por Melo e Helene (2002) onde se atribui a diminuição do módulo em virtude da necessidade de aumentar a relação água/cimento quando se aumenta o consumo de agregados (para mesmo abatimento). Este comportamento pode também ser justificado pelo fato de que o maior consumo de agregado acarreta numa maior superfície de zona de transição, região onde se iniciam as microfissuras, definindo menores módulo de elasticidade e resistência à compressão.

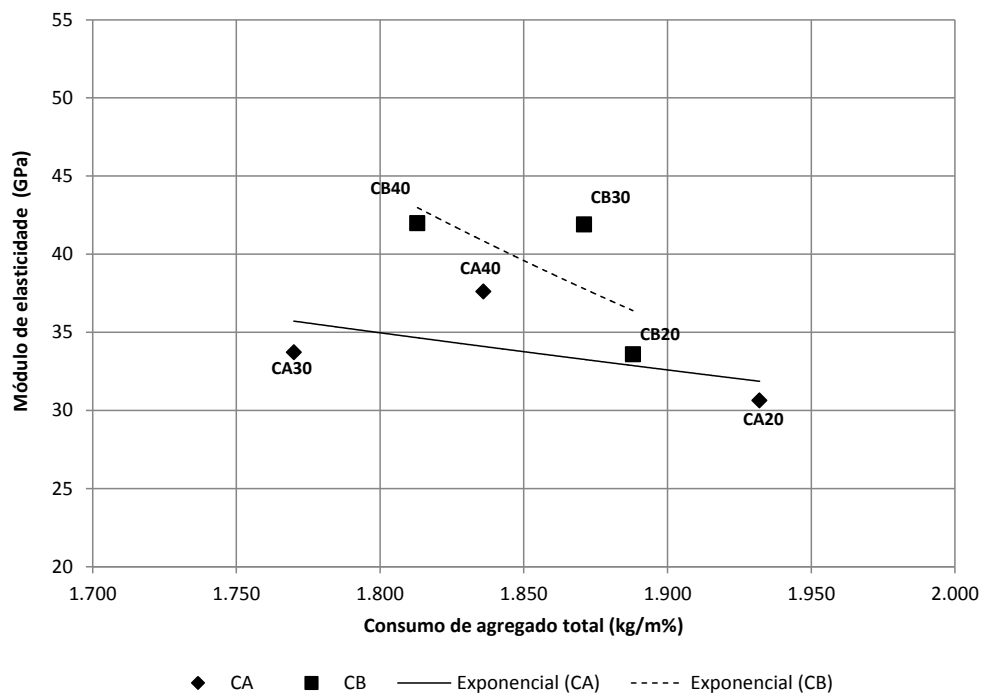


Figura 4.31 – Módulo de elasticidade em função do consumo de agregado total.

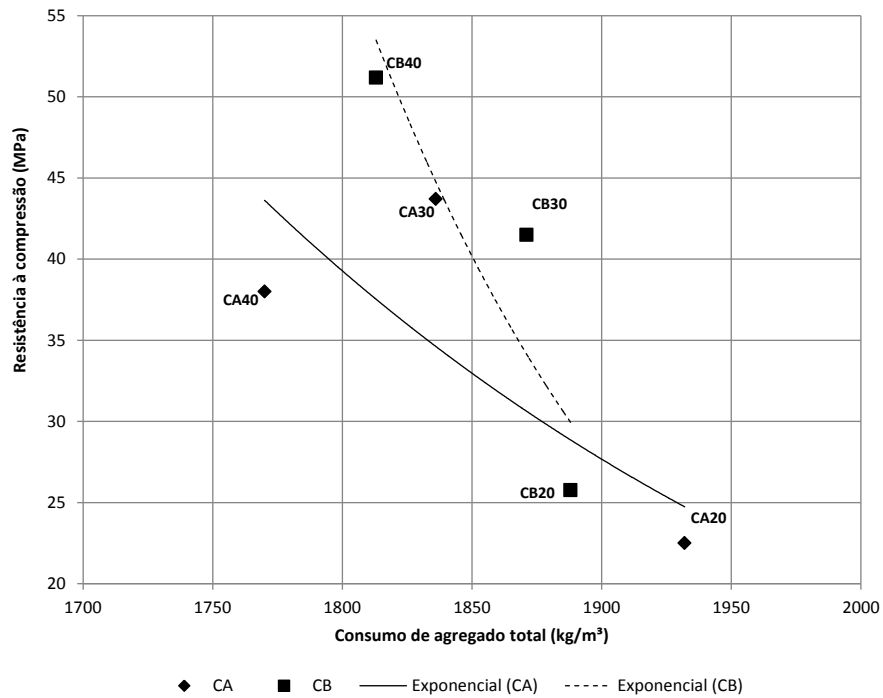


Figura 4.32 – Resistência à compressão em função do consumo de agregado total.

#### d) Teor de pasta de cimento

Os valores das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão em função do teor de pasta de cimento podem ser observados na Figura 4.33 e na Figura 4.34 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação direta entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão aumentam com o aumento do teor de pasta de cimento. Este comportamento pode se justificar pelo fato de que o aumento do teor de pasta de cimento determina um menor consumo de agregados, diminuindo assim a superfície total da zona de transição, região de menor resistência do compósito. Deste modo, a redução da zona de transição implica numa diminuição de fissuras o que leva a uma melhora tanto do módulo de elasticidade quanto da resistência à compressão.

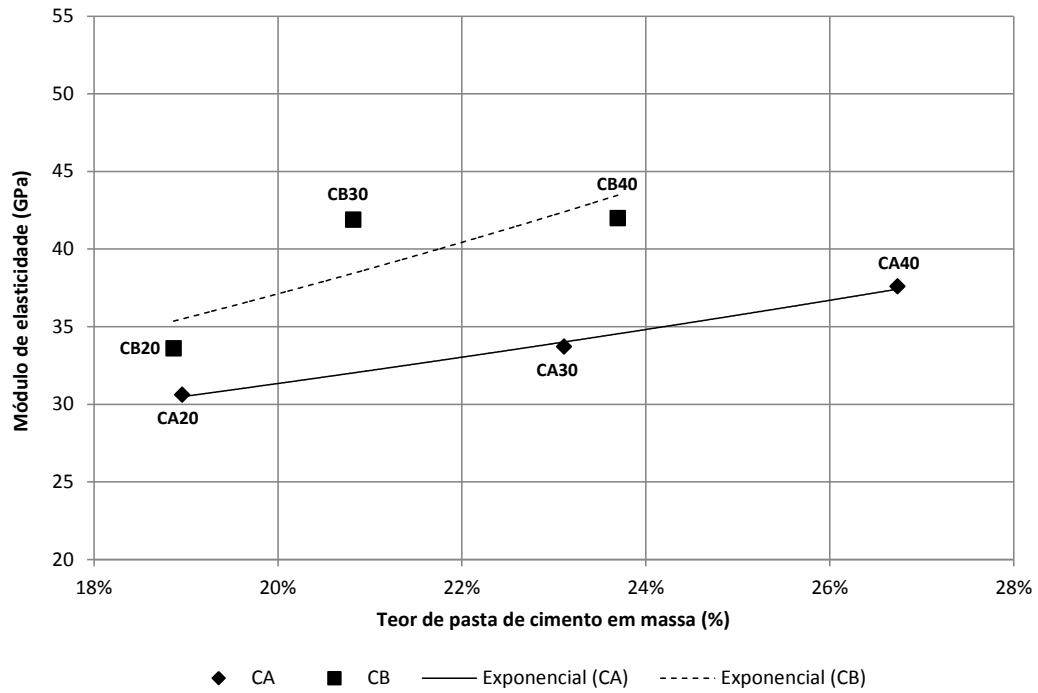


Figura 4.33 – Módulo de elasticidade em função do teor de pasta de cimento.

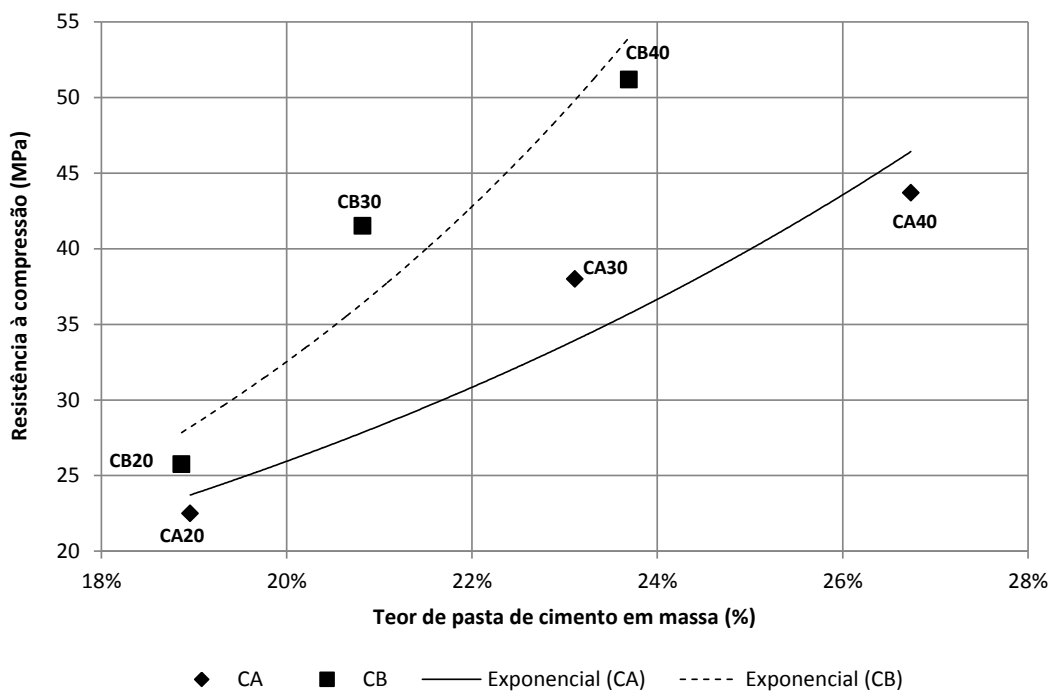


Figura 4.34 – Resistência à compressão em função do teor de pasta de cimento.

e) Teor de argamassa seca

Os valores das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão em função do teor de argamassa seca podem ser observados na Figura 4.35 e na Figura 4.36 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação inversa entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão decresceram com o aumento do teor de argamassa seca. Esse comportamento pode estar associado ao teor de agregado total. Ao se aumentar o teor de agregado, é necessário incrementar o teor de argamassa seca para atender à trabalhabilidade (mesmo abatimento). Conforme se observou na Figura 4.32, a tendência identificada é significativamente similar ao consumo de agregado total.

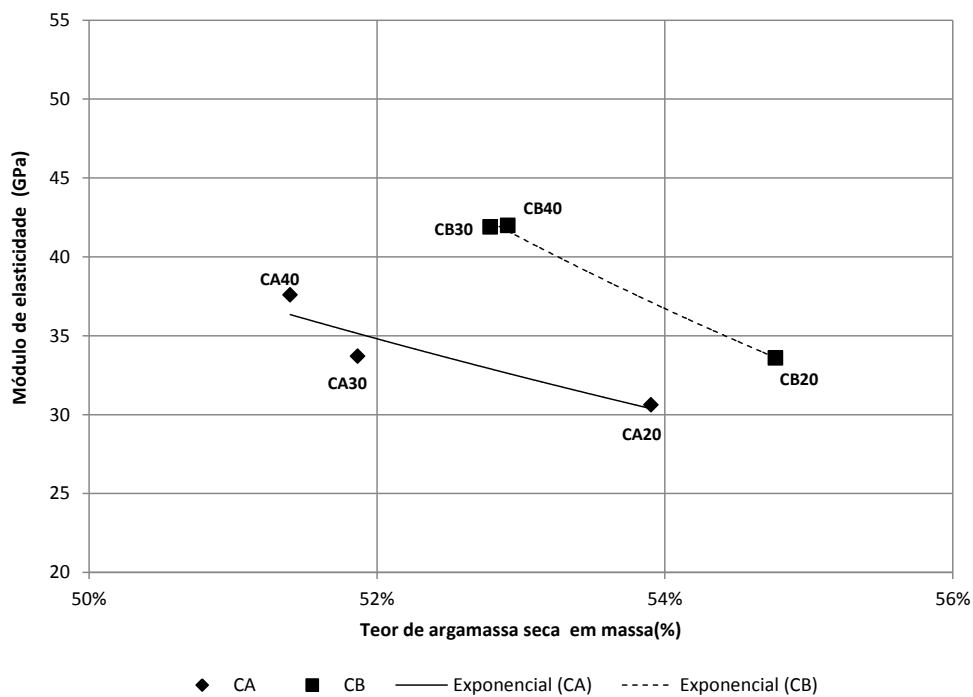


Figura 4.35 – Módulo de elasticidade em função do teor de argamassa seca.

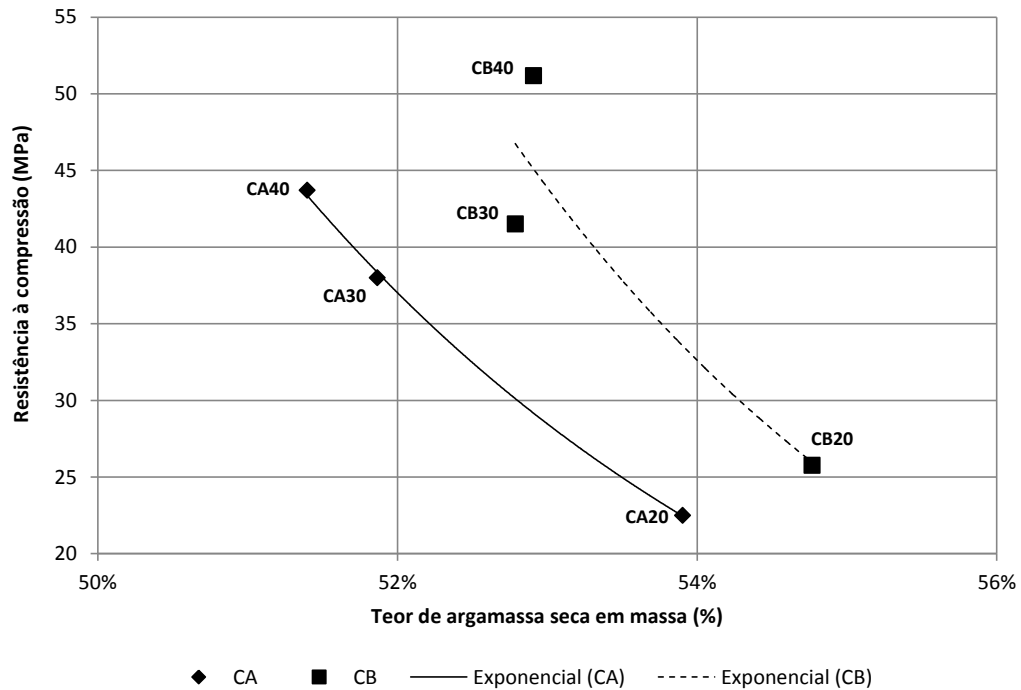


Figura 4.36 – Resistência à compressão em função do teor de argamassa seca.

f) Relação agregado gráúdo/agregado total

A associação entre a relação agregado gráúdo/agregado total e as propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão, ambos aos 28 dias, podem ser observadas nas Figuras 4.37 e na Figura 4.38 respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a existência de uma associação direta entre as variáveis, isto é, tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão cresceram com o aumento da relação agregado gráúdo/agregado total na composição. Este comportamento pode ser explicado pela capacidade do agregado gráúdo de restringir a deformação da matriz, aumentando assim a rigidez do composto e suas propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

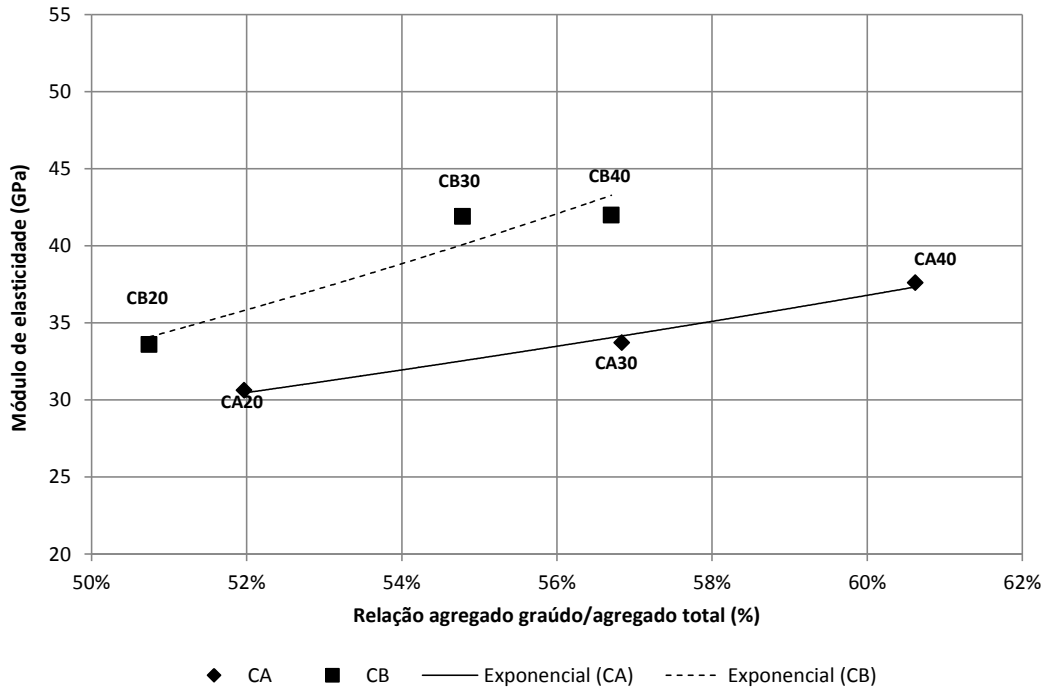


Figura 4.37 - Módulo de elasticidade em função da relação agregado graúdo/agregado total.

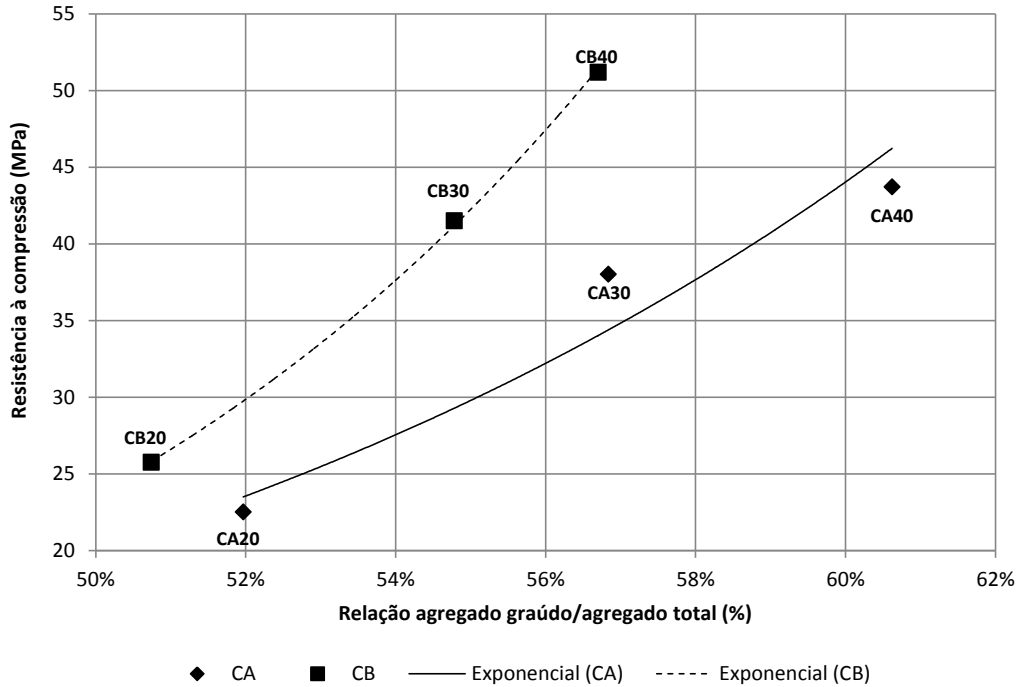


Figura 4.38 - Resistência à compressão em função da relação agregado graúdo/agregado total.

Na Tabela 4.24 encontram-se resumidas as relações encontradas entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão, ambos aos 28 dias, e os parâmetros de mistura dos concretos CA20, CA30 e CA 40, da concreteira CA e CB20, CB30 e CB40, da concreteira CB.

Os parâmetros de mistura estudados influenciaram o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos pesquisados sempre da mesma forma, apresentando uma relação direta ou inversa com as propriedades.

A partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que a porosidade da pasta de cimento se apresentou como fator fundamental e comum tanto na variabilidade do módulo de elasticidade quanto da resistência à compressão. O aumento do módulo de elasticidade da pasta de cimento se mostrou a maneira mais eficiente de aumentar o módulo de elasticidade do concreto (LI et al., 1999).

Nesse sentido, percebeu-se que a diminuição da relação a/c e o aumento do consumo de cimento contribuíram para o fortalecimento da pasta de cimento levando à melhora das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão.

Tabela 4.24 – Associação entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão aos 28 dias e os parâmetros de mistura dos concretos CA20, CA30 e CA 40 e CB20, CB30 e CB40

<b>Parâmetro de mistura</b>		<b><math>E_{ci}</math></b>	<b><math>f_c</math></b>
Relação água/cimento	↑	↓	↓
Consumo de cimento	↑	↑	↑
Consumo de agregado total	↑	↓	↓
Teor de pasta de cimento	↑	↑	↑
Teor de argamassa seca	↑	↓	↓
Relação agregado gráudo/agregado total	↑	↑	↑

↑ = aumento



O maior consumo de agregado total acarretou em menores valores do módulo de elasticidade e da resistência à compressão. Acredita-se que com o aumento do teor de agregado e, conseqüentemente, o acréscimo da superfície de zona de transição, região onde ocorrem as primeiras microfissuras, tenha contribuído para a diminuição das propriedades estudadas.

Ainda com relação aos agregados, o agregado graúdo se mostrou como fator de melhora do módulo de elasticidade e da resistência à compressão quando restringe a deformação da matriz aumentando assim a rigidez do composto e suas propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

#### **4.5.5 – Correlação entre o módulo de elasticidade secante e a resistência à compressão característica**

Na Figura 4.39, foram plotados módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) dos concretos estudados de forma a se verificar a correlação entre esses valores. Na mesma figura encontram-se as expressões empíricas das normas ABNT NBR 6118:2007, CEB-FIP para o caso de agregado calcário e ACI 318-08. Com linha tracejada está representada a curva de tendência ajustada pelo método dos mínimos quadrados dos valores obtidos nos ensaios.

A curva de tendência ajustada a esses pontos se mostrou mais próxima da equação preconizada pela norma ABNT NBR 6118:2007 do que da curva proposta pelo CEB-FIP, diferentemente dos ensaios de Araújo (2008), que indicaram a curva do CEB-FIP como mais adequada. Ainda com relação à equação da ABNT NBR 6118:2007, nos ensaios realizados foram encontrados valores do módulo de elasticidade superiores aos previstos pela expressão da norma para os concretos com resistência até 50 MPa e inferiores para concretos acima deste valor, próximo à conclusão de Silva Júnior *et al.*, (2010) cujo limite encontrado foi de 40 MPa. A curva ajustada dos ensaios realizados resultou paralela à equação do CEB-FIP e não obteve associação com a curva do ACI.

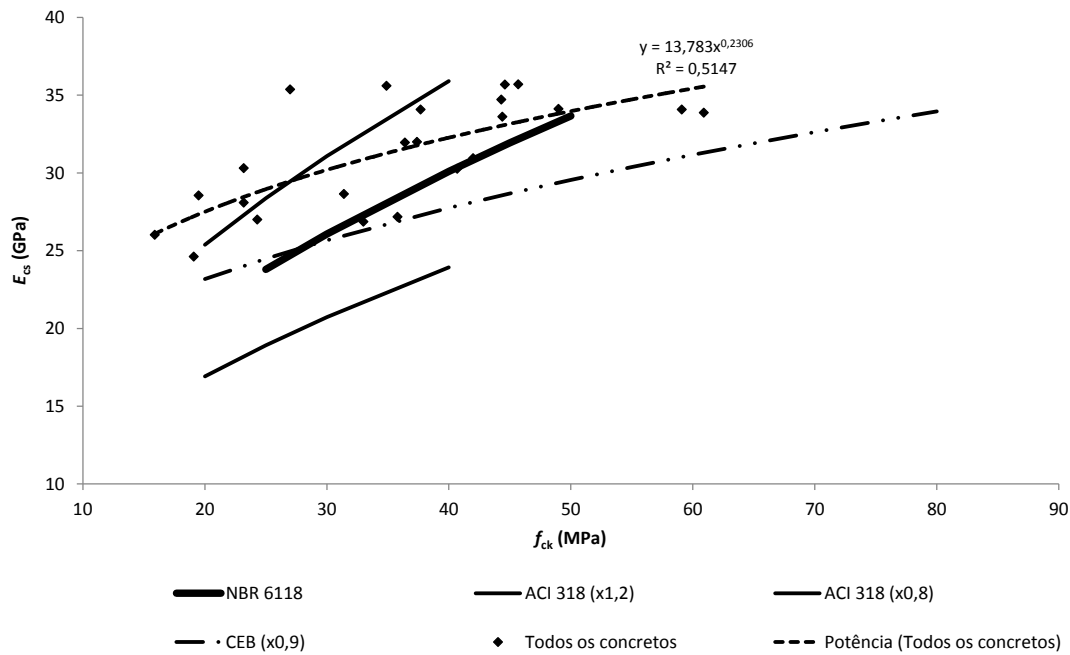


Figura 4.39 – Correlação entre o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) e a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) com a aplicação das expressões empíricas da ABNT NBR 6118:2007, do ACI 318-08 e do CEB-FIP MC 90.

#### 4.5.6 Resumo das observações relativas ao módulo de elasticidade do concreto-foco

Os valores médios do módulo de elasticidade e da resistência à compressão das amostras dos concretos-foco encontram-se na Tabela 4.25 e Tabela 4.26 respectivamente.

O módulo de elasticidade apresentou pouca variação entre os concretos CB30 e CC30 e uma variação significativa entre o concreto CA30 e os demais. Este comportamento não foi observado relativamente à resistência à compressão, onde, aos 28 dias os valores do concreto CB30 ficaram mais próximos do CA30.

Tabela 4.25 – Valores médios do módulo de elasticidade do concreto-foco, desvio-padrão e coeficiente de variação do ensaio das amostras coletadas na concreteira, replicadas no laboratório (“L”) e de controle da produção (“P”) e de controle de produção replicadas no laboratório (“PL”)

Amostra	CA30		CA30L		CA30P		CA30PL		CB30		CB30P		CB30PL		CC30	
Idade (dias)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)	$E_{ci}$ (GPa)	$S_d$ (GPa) CV (%)
3	30,281	$\frac{2,881}{9,5}$	32,800	$\frac{3,759}{11,5}$	29,162	$\frac{1,318}{4,5}$	31,037	$\frac{1,443}{4,6}$	38,042	$\frac{2,703}{7,1}$	25,114	$\frac{0,796}{3,2}$	29,816	$\frac{0,601}{2,0}$	35,683	$\frac{4,655}{13,0}$
7	35,261	$\frac{3,047}{8,6}$	29,765	$\frac{2,830}{9,5}$	32,195	$\frac{1,015}{3,2}$	31,003	$\frac{0,911}{2,9}$	41,137	$\frac{0,501}{1,2}$	27,442	$\frac{1,486}{5,4}$	33,805	$\frac{1,713}{5,1}$	41,538	$\frac{1,343}{3,2}$
28	33,706	$\frac{2,859}{8,5}$	31,980	$\frac{1,155}{3,6}$	31,774	$\frac{1,269}{4,0}$	33,053	$\frac{0,780}{2,4}$	41,892	$\frac{1,156}{2,8}$	28,977	$\frac{1,987}{6,9}$	35,660	$\frac{2,840}{8,0}$	41,619	$\frac{2,106}{5,1}$
91	36,874	$\frac{2,657}{7,2}$	NR	NR	NR	NR	NR	NR	45,189	$\frac{1,350}{3,0}$	NR	NR	NR	NR	NR	NR

NR = valor não obtido

Tabela 4.26 – Valores médios da resistência à compressão do concreto-foco desvio-padrão e coeficiente de variação do ensaio das amostras coletadas na concreteira, replicadas no laboratório (“L”), e de controle da produção (“P”) e de controle de produção replicadas no laboratório (“PL”)

Amostra	CA30		CA30L		CA30P		CA30PL		CB30		CB30P		CB30PL		CC30	
Idade (dias)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)	$f_c$ (MPa)	$S_d$ (MPa) CV (%)
3	27,6	2,1 7,7	28,7	2,7 9,5	25,8	0,8 3,2	23,700	2,1 8,7	27,4	2,5 8,9	19,7	1,5 7,6	24,1	1,5 6,3	22,8	1,4 6,3
7	34,0	1,3 3,9	35,6	2,9 8,2	28,5	0,3 1,0	27,6	0,6 2,3	37,1	1,4 3,9	22,7	1,9 8,2	25,0	1,6 6,3	26,3	0,8 3,0
28	38,0	1,8 4,8	42,4	1,9 4,4	30,9	2,2 7,1	29,8	1,2 4,2	41,5	3,0 7,2	25,8	1,9 7,4	29,8	1,4 4,7	33,6	1,6 4,8
91	44,2	0,7 1,5	31,5	1,3 4,1	NR	NR NR	NR	NR NR	42,9	2,4 5,5	NR	NR NR	NR	NR NR	NR	NR NR

NR = valor não obtido

O comportamento do módulo de elasticidade do concreto-foco e os de controle ao longo do tempo aos 3, 7 e 28 dias da concreteira CA pode ser visualizado na Figura 4.8 e Figura 4.9 (página 80). Nela, percebe-se que todos eles chegaram aos 28 dias com valor muito próximo, porém os concretos CA30L e CA30PL apresentaram um comportamento inesperado, com o módulo de elasticidade diminuindo entre os 3 e 7 dias de idade. Fato semelhante ocorreu com o concreto CA30, porém com decréscimo os 7 e 28 dias, neste caso, o crescimento foi retomado até os 91 dias dia como pode ser visto na Figura 4.23 na página 107 . Nos três casos, CA30, CA30L e CA30PL, este comportamento não teve correspondência nem com a resistência à compressão (ver Figura 4.3 e 4.4 nas páginas 72 e 73) nem com a propagação de onda ultrassônica (ver Tabela 4.5 na página 77) desses concretos.

O concreto CA30 e a reprodução do mesmo em laboratório, CA30L, apresentaram resultados diferentes aos 3 dias e aos 7 dias chegando aos 28 dias com valores do módulo de elasticidade muito próximos, 33,706 GPa para o concreto CA30 e 31,980 MPa para o concreto CA30L.

Constatou-se que, tanto o traço replicado no laboratório CA30L quanto os concretos de controle da produção, CA30P e CA30PL, recolhidos 148 dias após a primeira coleta, mantiveram resultados aos 28 dias muito próximos ao concreto CA30.

Os valores médios do módulo de elasticidade do concreto-foco da concreteira CB encontram-se na Tabela 4.25, página 122. A evolução do módulo de elasticidade aos 3, 7 e 28 dias pode também ser visualizada graficamente na Figura 4.16, página 92.

Os valores do módulo de elasticidade aos 28 dias das amostras dos concretos produzidos pela concreteira CB, diferentemente do ocorrido com a concreteira CA, apresentaram variação significativa entre os concretos CB20 e CB30 (24,7%), porém dentro do esperado, em se tratando de concretos com diferentes resistências, e pouca variação entre o concreto CB30 e o CB40 (1,0%). Constatou-se também uma grande diferença entre o concreto-foco, CB30, e os concretos de controle da produção, CB30P e CB30PL, colhidos 97 dias após primeira coleta.

O concreto CB30P e a reprodução do mesmo em laboratório CB30PL apresentaram grande diferença no valor do módulo de elasticidade aos 28 dias (25,0%). Esta diferença pode ser creditada às condições mais favoráveis na produção do concreto no laboratório tais como o

controle mais rígido da pesagem e da umidade dos materiais além da diferença do tipo de misturador empregado.

Pode-se constatar que os concretos CB30P e CB30PL, utilizados para o controle ao longo do tempo, apresentaram um valor do módulo de elasticidade aos 28 dias reduzido relativamente ao concreto CB30, de 30,8% para o CB30P e de 14,9% para o concreto CB30PL. Este comportamento pode ser creditado ao fato que o estudo, feito propositalmente num outro momento de produção, pode ter constatado uma alteração na produção e/ou nos materiais utilizados, lembrando que o concreto de controle de produção foi coletado numa usina diferente da que forneceu a primeira coleta.

O comportamento do módulo de elasticidade dos concretos CB30 ao longo do tempo pode ser visualizado na Figura 4.16, página 92. Nela, nota-se, com exceção do concreto CB30P, o ganho acentuado do módulo de elasticidade nas primeiras idades coerente com o cimento utilizado (CP V - ARI RS). Percebe-se um comportamento quase que paralelo entre as curvas e a grande diferença entre os valores do concreto-foco, CB30, relativamente aos concretos de controle.

Da concreteira CC foi analisado somente o concreto-foco coletado na obra sem a utilização dos concretos de controle no tempo e dos concretos rodados no laboratório. Os valores do módulo de elasticidade encontrados estão mostrados na Tabela 4.18, página 99 e sua evolução dos 3 aos 28 dias obtida nesta análise pode ser vista graficamente na Figura 4.19, página 99.

Percebeu-se que, assim como o ocorrido no concreto CA30, mostrado anteriormente, o concreto CC30 apresentou um decréscimo inesperado do módulo de elasticidade entre os 7 e 28 dias e que, do mesmo modo, este comportamento não encontrou similaridade com o da resistência à compressão e da velocidade e propagação da onda ultrassônica, podendo também ser atribuído à precisão do ensaio.

## 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo a investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília a partir das características de produção dos principais produtores da região. Foram estudados concretos das classes C20, C30 e C40 fornecidos por três centrais de concreto distintas com coletas das amostras feitas direto nas concreteiras e num canteiro de obras.

Destas amostras foram estudadas as seguintes propriedades: resistência à compressão, resistência à tração e índice de absorção de água e, de modo complementar, foram realizados ensaios de propagação de ondas ultrassônicas, identificadas a origem além da curva e composição granulométricas dos agregados. Após estas atividades, chegou-se às seguintes conclusões:

- a) Os concretos estudados apresentaram grandes diferenças nos valores das propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão apesar de estarem enquadrados na mesma classe de resistência e de terem parâmetros similares de produção. Para o concreto C30 com dosagem similar, o módulo de elasticidade variou de 33,706 a 41,892 GPa em função do produtor.

Constatou-se que, aos 28 dias, para o concreto CA20, o módulo de elasticidade variou de 30,622 a 33,595 GPa e a resistência à compressão variou de 22,5 a 25,8 MPa; que para o concreto C30 a variação foi do módulo de elasticidade foi de 33,706 a 41,892 GPa e a resistência à compressão de 38,0 a 41,5 MPa; e que para o concreto C40 o módulo de elasticidade variou de 37,597 a 41,987 GPa e a resistência à compressão variou de 43,7 a 51,2 MPa.

O coeficiente de variação dos ensaios foi de 4,9% para o módulo de elasticidade e de 5,2% para a resistência à compressão.

De modo geral a resistência à compressão apresentou maior variação que o módulo de elasticidade entre as amostras de concretos de mesma classe de resistência.

- b) Foram observadas variações significativas das propriedades mecânicas entre os CA30 e CB30 coletados na usina, replicados no laboratório e os de controle da produção.

A diferença entre o concreto coletado na usina e o moldado no laboratório não obedeceu a um padrão com relação ao processo produtivo que apresentou melhor desempenho relativamente ao módulo de elasticidade e à resistência à compressão.

Os concretos da segunda coleta, para controle da produção, com exceção do módulo de elasticidade dos concretos CA30, sempre apresentaram módulo de elasticidade e resistência à compressão menores que os concretos da primeira coleta. Acredita-se que este comportamento seja devido ao fato de que nesta segunda coleta possa ter havido uma alteração na produção e/ou nos materiais utilizados.

- c) Os valores do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto CA30 mantiveram o crescimento entre os 28 e 91 dias. Neste período, o módulo de elasticidade aumentou de 35,261 para 36,874 GPa e a resistência à compressão de 38,0 para 44,2 MPa. O concreto CB30 apresentou crescimento de 41,892 para 45,189 GPa e de 41,5 para 42,9 MPa no módulo de elasticidade e na resistência à compressão, respectivamente.
- d) Os valores da relação resistência à tração/resistência à compressão aos 28 dias das concreteiras CA, CB e CC ficaram contidos na faixa de variação de 7% a 11% em que geralmente os concretos variam de acordo com Mehta e Monteiro (2008). O mesmo não aconteceu com os concretos do estudo de caso, que se situaram abaixo dos 7%.
- e) A pasta de cimento e o consumo de cimento (para mesmo abatimento) se apresentaram como fatores fundamentais e comuns tanto na evolução do módulo de elasticidade quanto da resistência à compressão de acordo com Li *et al.*, (1999) que indica o aumento do módulo de elasticidade da pasta de cimento como a maneira mais eficiente de aumentar o módulo de elasticidade do concreto.
- f) A curva de tendência dos valores resistência à compressão – módulo de elasticidade se mostrou próxima da equação preconizada pela ABNT NBR 6118:2007. Os valores observados foram parcialmente discordantes dos previstos pela NBR 6118. Pelos resultados encontrados, observa-se que ocorre uma subestimação do módulo



de elasticidade até a resistência à compressão de 45 MPa e, acima deste valor, a norma superestima o valor do módulo de elasticidade.

Para trabalhos futuros, dentro da mesma linha de pesquisa, sugere-se:

- A partir da definição de um plano amostral, dar continuidade a caracterização sistemática do concreto utilizado na região de Brasília.
- Investigar, à luz dos parâmetros de mistura, os fatores que influenciam o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto produzido com materiais utilizados na região.
- Determinar o grau de intensidade da influência de cada parâmetro de mistura nas propriedades módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos utilizados na região de Brasília.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 228.2R-98 - Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures**, Farmington Hills, Michigan, 1998.

\_\_\_\_\_. **ACI 318-08 – Building Code Requirements for Structural and Commentary**. Farmington Hills, Michigan, 1998.

\_\_\_\_\_. **ACI 318-RM-95 – Building Code Requirements for Structural and Commentary**. Farmington Hills, Michigan, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C150/C150M – 11 - Standard Specification for Portland Cement**. Philadelphia, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7219: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos**  
Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7680: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro: Versão corrigida ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro. ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ALMEIDA, I.R. **Concretos de Alto Desempenho.** In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto – Ensino, Pesquisas e Realizações.** 1 ed. São Paulo. IBRACON, 2005. 2v. Cap. 38.

ARAÚJO, J. M. **Modelos para previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR-6118 versus CEB.** Teoria e Prática da Engenharia Civil, n.12. Escola de Engenharia – FURG, Rio Grande - RS, 2008.

ANDRADE, J.J.; TUTIKIAN, B.F. **Resistência Mecânica do Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo IBRACON, 2011. 1v. Cap. 17.

BEZERRA, A. C. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: Uma análise experimental e computacional**. 128 f. Dissertação (Mestre em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BARBOSA, M.P., 1999, “**Um estudo Experimental com Diferentes Tipos de Agregados Graúdos para a Verificação da Resistência Mecânica à compressão de Concreto de Elevado Desempenho**”, 41º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON, Salvador - BA, 1999.

BARBOSA. I.L.S. **Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2009.

CALLISTER, W.D.; JR. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão do concreto utilizado usualmente na grande Florianópolis através de métodos de ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, Salvador, Anais. IBRACON, 1999.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON - CEB. **Selected Justification Notes**. Bulletin d’information n.217, Lausanne, 1993.

COUTINHO, A.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Volume III, 2º ed, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa, 1994.

DAL MOLIN, D.C.C.; Adições Minerais. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo IBRACON, 2011. 1v. Cap. 8.

DAL MOLIN, D.C.C.; MONTEIRO, P.J.; **Contribuição ao Estudo do Módulo de Deformação de Concretos de Alta Resistência Com e Sem Adições de Microssílica.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP.BT/PCC/159. São Paulo, 1996.

EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e Propriedades.** São Paulo: Editora Pini, 1997.

ESPINOZA-HIJAZIN, G.; LOPEZ, M. **Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0.42.** Construction and Building Materials. Elsevier, 2010.

EVANGELISTA, A. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** 239f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados.** São Paulo. Editora Pini, 2008.

GAGLIARDO, D.P; VIDAL, P.A ; GAGLIARDO, J.C . **Influência da granulometria do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto de cimento portland.** In: 52° Congresso Brasileiro do concreto, Fortaleza, Brasil, 2010.

GHEBRAD, T.T.; SOROUSHIAN, P. **Development of structure-property relationship for concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9, No.1 5-14. Japão, 2011.

GOMES, A.M.; AGUIAR J.E.; ALBERTINI NETO, H.; COSTA, J.O. **Permeabilidade do concreto: um estudo para a avaliação “in situ” usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais.** Rio de Janeiro: PANNDT, 2003.

GOMES, P.C.C. **Estudo dos parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência.** Mestrado, Rio de Janeiro/RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1995.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI H. **Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos.** In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª ed. São Paulo IBRACON, 2011.

HASHIN Z.; MONTEIRO P.J.M. **An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste.** Cement and Concrete Research, Volume 32. 2002.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** 1ª ed. Brasília/DF: Pini, 1993.

JACINTHO, A.; GIONGO, J. **Resistência Mecânica do Concreto.** In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto – Ensino, Pesquisas e Realizações. 1 ed. São Paulo: SmartSystem Consulting, 2005.

JOFFLY, I.A. **Avaliação do Ensaio de Penetração de Pino para Mensuração Indireta de Resistência à Compressão do Concreto.** Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2010.

LI, G.; ZHA ,Y.; PANG S, LI Y. **Effective Young’s modulus estimation of concrete.** Cement and Concrete Research 29. 1999.

LOPES, A.N.M. **Avaliação Comparativa de Concretos com e sem Sílica Ativa para Resistências Entre 50 e 65 MPa.** Mestrado, Brasília/DF: Universidade de Brasília, 1999.

MALAIKAH, A.S. **A proposed relationship for the modulus of elasticity of high strenght concrete using local materials in Riyadh.** Civil Engineering Department. College of Engineering. King Saud University. Riyad. Saudi Arabia, 2004.

MARTIN, J.F. Aditivos para Concreto. **Resistência Mecânica do Concreto.** In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto – Ensino, Pesquisas e Realizações. 1 ed. São Paulo. IBRACON, 2005.

MEIRELES NETO, M.; ALBUQUERQUE A.T.; ANTONIO EDUARDO; CABRAL, A.E.B. **Estudo do módulo de elasticidade de concretos produzidos em Fortaleza – CE – Brasil.** In: XXXIV Jornadas Sudamericanas de ingenieria estructural, San Juan,Argentina, 2010.

MELO, A.C. NETO; HELENE, P. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** 44º Congresso Brasileiro: São Paulo: Ibracon, 2002.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: 3<sup>a</sup> ed. IBRACON, 2008.

MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Mestrado Curitiba/PR: Universidade Federal do Paraná, 2002.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Construção Civil e Urbana. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo 2007.

MOREIRA, H.P.; FIGUEIREDO, E.P.; HELENE, P.R **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo: EPUSP, 2001.

MALHOTRA V.M.; CARINO, N.J. (eds). **Nondestructive Testing of Concrete**. 2<sup>a</sup> ed. New York Washington: ASTM International, 2004.

NAIK, T.R.; MALHOTRA V.M.; POPOVICS J.S. **The ultrasonic pulse velocity method**. In: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2 ed.CRC Press, 2004.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 1<sup>o</sup> ed. São Paulo: Pini, 1987.

OZYILDIRIM, C.; CARINO,N. **Concrete Strength Testing, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**. (STP 169C) STP 169D,2006.

PALACIOS, M.P.G. **EMPREGO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E DE TESTEMUNHOS DE CONCRETO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**. Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2012.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido**. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo IBRACON, 2011.

PAULON V.A. **Aditivos para Concreto. Resistência Mecânica do Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto – Ensino, Pesquisas e Realizações**. 1 ed. São Paulo. IBRACON, 2005.

PEREIRA, M.S. **Controle da Resistência do Concreto: paradigmas e variabilidades – Estudo de Caso**. Mestrado, Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2008.

PINHEIRO L.M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S.P.; CATOIA, T.; CATOIA, B. **Estruturas de concreto**. Disponível em <http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/02%20Concreto.pdf>, 2010. Acesso em março de 2012.

POPOVICS, S. **Fundamental of Portland cement concrete: a quantitative approach**. John Wiley & Sons, Inc. EUA, 1982.

RODOLPHO, P.M. **Estudo do Comportamento no Estado Fresco do Concreto com Areia Britada**. Mestrado, Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2007.

SANTOS, C.C.N. **A Influência das Características da Areia Artificialmente Britada nas Propriedades do Estado Fresco do Concreto**. Mestrado, Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2008.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: SmartSystem Consulting, 2005.

SHEHATA L. D. **Deformações Instantâneas do Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol. 1. São Paulo IBRACON, 2005.

SILVA, E.F. **Concreto de Alto Desempenho: Estudo de propriedades Mecânicas**. Mestrado, Brasília/DF: Universidade de Brasília, 1997.

SILVA, K.J. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos, com um ano de idade, produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Coordenação da área de Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás. Goiânia, 2003.

SILVA JÚNIOR, R.M.; PASA, N.; SANTOS, T.L.; FORMAGINI, S.; CHEUNG, B.; ROSA, W.A. **Correlação entre o Módulo de Elasticidade versus Resistência à Compressão de Concretos com Agregado de Origem Basáltica**. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2010. IBRACON, 2010.



VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. 13. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

VASCONCELOS, A.C. GIAMMUSSO, S.E. **O misterioso módulo de elasticidade**. IBRACON, 40, 2000, Rio de Janeiro.


VOGT, J.C; PINHO V.X; CORRÊA, E.C.S; AGUILAR, M.T.P; CETLIN, P.R. **Influência da adição de resíduos minerais na resistência mecânica, tenacidade à fratura e módulo de Young do concreto**. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Brasil, 2006.

WANG, H.; LI, Q.; **Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete**. International Journal of Solids and Structures 44 . 2007.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

LEM NIT XXX - Projeto de Norma Interna de Trabalho. Procedimentos para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto endurecido em corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos. Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (2011).

		Laboratório de Ensaio de Materiais - LEM Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - ENC Universidade de Brasília - UnB	
<b>LEM</b>		Endereço: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio SG-12 - Asa Norte, Brasília-DF, CEP: 70910-900 Fone/Fax (61) 3347-0568	
Norma interna de trabalho - referência <p style="text-align: center;"><b>NIT XXX</b></p>		Data de implementação/revisão <p style="text-align: center;"><b>ABR 2011</b></p>	
Título da norma <p style="text-align: center;"><b>PROCEDIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO DO CONCRETO ENDURECIDO EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS MOLDADOS OU EXTRAÍDOS</b></p>			
Projeto de Norma Interna de Trabalho do LEM			
Autor (es): Prof. Elton Bauer Eng. Antonio Carlos Ferreira de Souza Leal		Conselho Editorial: Prof. Antonio Nepomuceno Profa. Rosa Maria Sposto Prof. Elton Bauer	
Palavras-chaves Concreto, módulo de elasticidade, ensaio, procedimentos			Número de páginas <p style="text-align: center;"><b>4</b></p>
<p style="text-align: center;"><b>1. OBJETIVO</b></p> <p>Este documento tem como objetivo especificar os procedimentos para a determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão do concreto endurecido, em corpos-de-prova cilíndricos que podem ser moldados ou extraídos da estrutura. Este é o módulo a ser determinado em ensaio, conforme estabelece a ABNT NBR 6118.</p>		<p style="text-align: center;"><b>4. APARELHAGEM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A máquina de ensaios (prensa) deve atender aos valores máximos admissíveis para classe 1 ou melhor, estabelecidos na ABNT NBR NM ISO 7500-1 e cumprir com os requisitos estabelecidos em 3.1 da ABNT NBR 5739:2007. Deve ser capaz de aplicar a força ou deformação específica indicada na razão especificada e mantê-la ao nível requerido.</li> </ul> <p><i>Nota:</i> A calibração deve ser realizada no intervalo de 20 % a 100 % da capacidade nominal da escala da máquina utilizada.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidores de deformações devem ser elétricos ou mecânicos e devem possibilitar a realização do ensaio sem interferência dos operadores. Devem ter resolução mínima de 0,001 mm e atender aos valores máximos admissíveis para classe 1 ou melhor estabelecidos na ABNT NBR 14480.</li> </ul> <p><i>Nota:</i> Devem ser calibrados em intervalos não superiores a 12 meses ou após reparos ou ajustes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paquímetro com faixa nominal medição compatível com a dimensão básica do corpo-de-prova e resolução de no mínimo 0,1 mm.</li> </ul> <p><i>Nota:</i> Deve ser calibrado em intervalos não maiores que 24 meses.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esquadro metálico</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>2. DOCUMENTAÇÃO COMPLEMENTAR</b></p> <p>ABNT NBR 8522:2008, <i>Concreto - Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão</i>          ABNT NBR 5738, <i>Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova</i>          ABNT NBR 5739:2007, <i>Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos</i>          ABNT NBR 6118, <i>Projeto de estruturas de concreto - Procedimento</i>          ABNT NBR 7680, <i>Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto</i>          ABNT NBR 14480, <i>Materiais metálicos - Calibração de extensômetros usados em ensaios uniaxiais</i>          ABNT NBR NM ISO 7500-1, <i>Materiais metálicos -</i></p> <p><i>Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração do sistema de medição da força</i></p>		<p style="text-align: center;"><b>5. PROCEDIMENTOS</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS</b></p> <p>Devem ser anotadas as seguintes condições ambientais no momento da realização do ensaio: umidade relativa e temperatura do laboratório; condições meteorológicas (chuva, frio, calor).</p>		1	

### 5.1 Corpos-de-prova de ensaio

Os corpos-de-prova a serem ensaiados devem ser cilíndricos com proporção comprimento/diâmetro de  $1,98 \leq L/d \leq 2,02$ . Para corpos-de-prova moldados, o diâmetro deve ser maior que quatro vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo do concreto.

### 5.2 Preparação dos corpos-de-prova de ensaio

Os corpos-de-prova devem ser moldados e armazenados de acordo com a ABNT NBR 5738. Os testemunhos de estruturas devem ser preparados para o ensaio de acordo com a ABNT NBR 7680.

- Retificar o topo e a base dos corpos-de-prova conforme procedimentos descritos na ABNT NBR 5738 e marcar os topos com a letra "T". Se o ensaio não for feito imediatamente após a retificação das extremidades, os corpos-de-prova deverão retornar para o processo de cura, tomando-se a precaução de que a marcação do topo não saia durante o procedimento.
- Selecionar os cinco corpos-de-prova que apresentarem as melhores condições geométricas: menor presença de bolhas no terço médio e maior aproximação da ortogonalidade verificada por meio do esquadro. Identificá-los.
- Marcar diâmetro ortogonal à geratriz que apresente maior excentricidade dos corpos-de-prova.
- A partir do diâmetro marcado, desenhar duas geratrizes do corpo-de-prova em regiões com menos imperfeições no terço médio. Marcar nas geratrizes um trecho de 100 mm na região central.
- Anotar o diâmetro dos corpos-de-prova, em décimos de milímetro, em duas medidas realizadas em duas direções aproximadamente ortogonais no terço central. Anotar a altura, em décimos de milímetro, por meio de duas medidas, com exatidão de 0,1 mm, realizadas nas duas geratrizes marcadas.
- O comprimento de uma base de medida deve ser no mínimo igual a dois terços do diâmetro do corpo-de-prova ( $2/3 d$ ) e no máximo igual à medida desse diâmetro ( $d$ ).

Nota: O gabarito do comprimento da base de medida deve ser verificado em intervalos não maiores que 12 meses. O erro máximo admissível não deve ser superior a 1 %.

- Escarificar as regiões que receberão as garras do extensômetro para aumentar a aderência.

### 5.3 Preparação do extensômetro

- O manuseio do extensômetro deve ser feito sempre com as garras travadas.
- Verificar se está ativo.
- Verificar aperto dos parafusos.
- Instalar garras verificando se estão justas (as de cima).
- Destravar as garras.

### 5.4 Posicionamento dos corpos-de-prova

- As faces do prato da prensa devem estar limpas e secas.
- O corpo-de-prova deverá ser cuidadosamente centralizado no prato inferior com o auxílio dos círculos concêntricos de referência.
- Na primeira medição dos corpos-de-prova que serão instrumentados, as garras devem estar alinhadas com os parafusos da rótula.

### 5.5 Ensaio

#### 5.5.1 Determinação da resistência à compressão ( $f_c$ )

A resistência à compressão do concreto deve ser determinada em dois corpos-de-prova similares, preferivelmente do mesmo tamanho e forma dos que serão utilizados para determinar o módulo de elasticidade, provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições e de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 5738, devendo ser ensaiados à compressão de acordo com a ABNT NBR 5739.

Os carregamentos devem obedecer à velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s (ver indicação do tempo para cada carregamento na planilha de cálculo do módulo de elasticidade).

NOTA 1 Se não houver corpos-de-prova da mesma betonada, a resistência à compressão pode ser estimada e esse fato deve ser registrado no relatório do ensaio, mencionando quais as bases adotadas para essa estimativa.

NOTA 2 Quando a determinação do módulo de elasticidade for realizada em testemunhos extraídos de estruturas de concreto, convém que o ensaio de resistência à compressão seja realizado em testemunhos provenientes do mesmo elemento estrutural. Não sendo possível o total atendimento a esta recomendação, o fato deve ser registrado no relatório de ensaios.

NOTA 3 Quando o ensaio for realizado a uma tensão especificada pelo projetista, pode-se prescindir da determinação prévia da resistência à compressão, desde que o valor da tensão especificada seja de até  $0,4 f_{ck}$  e a resistência à compressão  $f_{c,el}$  obtida ao final do ensaio seja igual ou superior ao  $f_{ck}$  especificado.

#### 5.5.2 Determinação do módulo de elasticidade ( $E_d$ )

Para cada determinação do módulo de elasticidade devem ser ensaiados três corpos-de-prova.

Os carregamentos e descarregamentos devem obedecer à velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s (ver indicação do tempo para cada carregamento na planilha de cálculo do módulo de elasticidade).

#### Compatibilização de deformações lidas em bases de medida independentes

O procedimento para a compatibilização das deformações lidas em bases de medida independentes é o seguinte:

- Colocar os corpos-de-prova em posição centrada nos pratos da máquina de ensaios (centragem visual).
- Aplicar uma carga de até (no máximo) 20 % da carga prevista de ruptura.
- Verificar as deformações registradas pelos medidores.
- Caso a diferença entre as deformações lidas nesses medidores seja maior que 20 % da maior das deformações lidas, descarregar o corpo-de-prova e proceder ao ajuste mais correto da centragem, girando o corpo-de-prova em  $90^\circ$ .
- Aplicar novamente uma carga de no máximo 20 % da carga prevista de ruptura e novamente verificar as deformações registradas pelos medidores.
- Repetir esse procedimento de carregar, ler as deformações, descarregar e girar o corpo-de-prova, até que a diferença entre as deformações lidas não seja maior do que 20 % da maior deformação, quando terá sido concluída a compatibilização das bases de medida.

#### Metodologia da tensão $\sigma_0$ fixa

##### a. Etapa 1

Carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_0$ ) e mantê-la neste nível por 60 s.

NOTA A tensão  $\sigma_0$  corresponde a 30 % da tensão de ruptura ( $f_c$ ) obtida através do ensaio de resistência à compressão determinada conforme 5.5.1 ou outra tensão especificada em projeto.

Em seguida, descarregar o corpo-de-prova até uma força próxima de zero ou a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. O prato superior da máquina de ensaios não deve perder o contato com o topo do corpo-de-prova.

##### b. Etapa 2

Carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e mantê-la neste nível por 60 s.

Em seguida, carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_0$ ) e manter a força neste nível por 60 s.

Descarregar o corpo-de-prova até uma força próxima de zero ou a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. O prato superior da máquina de ensaio não deve perder o contato com o topo do corpo-de-prova.

##### c. Etapa 3

Esta etapa deve ser conduzida conforme prescrições para a etapa 2.

##### d. Etapa 4

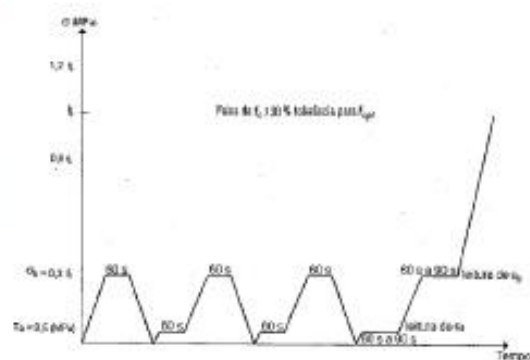
Carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa ( $\sigma_a$ ) e mantê-la neste nível por 60 s. Registrar as deformações lidas,  $\epsilon_a$ , tomadas em no máximo 30 s.

Em seguida, carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão do limite superior ( $\sigma_0$ ) e mantê-la neste nível por 60 s. Registrar as deformações lidas,  $\epsilon_0$ , tomadas em no máximo 30 s.

Após a leitura das deformações, liberar a instrumentação, se necessário, e carregar o corpo-de-prova na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas até que se produza a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva ( $f_{c,ef}$ ).

Se  $f_{c,ef}$  diferir de  $f_c$  em mais de 20 %, os resultados do corpo-de-prova devem ser descartados.

NOTA Convém que o tempo de carregamento durante o ensaio não ultrapasse 15 minutos tendo em vista evitar interferência no resultado do ensaio pelo efeito RÜZS.



## 6. RESULTADOS

### 6.1 Cálculo do módulo de elasticidade $E_{ci}$

O módulo de elasticidade,  $E_{ci}$ , em gigapascals, é dado pela equação:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad \text{onde:}$$

$\sigma_b$  é a tensão maior, em megapascals; ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ ) ou outra tensão especificada em projeto.

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascals (MPa).

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média, ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ), dos corpos-de-prova sob a tensão maior.

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

### 6.2 Tolerância da dispersão e expressão do resultado

A dispersão máxima entre uma medida individual ( $\Delta E$ ) e a média das deformações ( $\Delta E_m$ ) não deve ser superior a 5 % dessa média.

Quando a dispersão máxima for superior a 5 %, o valor discrepante deve ser desconsiderado e uma nova média deve ser calculada. Se a dispersão ainda for superior a 5 % os resultados devem ser descartados.

Os resultados devem ser expressos com três algarismos significativos, em gigapascals.

## 7. RELATÓRIOS

Devem constar obrigatoriamente no relatório do ensaio os seguintes dados:

- Identificação do corpo-de-prova ou testemunho.
- Data de preparação do concreto ou da obtenção do testemunho.
- Condições de cura e armazenamento.
- Idade do corpo-de-prova ou do testemunho no momento do ensaio, ou data do ensaio, caso a idade do testemunho não seja conhecida.
- Condições do corpo-de-prova ou testemunho no momento de seu recebimento para ensaio e seu tratamento superficial.
- Tipo e dimensões do corpo-de-prova ou testemunho.
- Data do ensaio
- Tipo dos instrumentos de medição utilizados, quantidade e comprimento das bases de medida.

- Resistência à compressão.
- Resistência à compressão de cada corpo-de-prova ensaiado para determinar o módulo de elasticidade.
- Metodologia de carregamento (tensão fixa ou deformação fixa).
- Valor obtido para o módulo de elasticidade de cada corpo-de-prova expresso com três algarismos significativos, em gigapascals;
- Valor obtido para o módulo de elasticidade do concreto ensaiado, expresso com três algarismos significativos, em gigapascals.
- Características especificadas no projeto como  $f_{ck}$  e  $E_{ci}$  (se for o caso).
- Localização do concreto na estrutura (se for o caso).
- Informações quanto aos materiais componentes do concreto (se for o caso).
- Observações consideradas de interesse (tipo de capeamento dos corpos-de-prova, presença de materiais estranhos, anomalias na ruptura, natureza dos agregados e outros).

## ANEXO B

### Resultados dos ensaios complementares

Tabela B.1 – Valores médios da resistência à compressão dos cimentos utilizados

Origem	Amostra	Data da moldagem	Idade (dias)	$f_c$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)
Concreteira CA	CA30	20/06/2011	3	38,962	1,0	2,5
			7	38,962	1,0	2,5
			28	45,150	1,8	4,0
	CA30P	23/12/2011	3	33,908	0,6	1,7
			7	25,036	0,9	3,5
			28	39,332	1,6	3,9
Concreteira CB	CB30	02/09/2011	3	20,207	0,9	4,6
			7	30,096	1,5	5,0
			28	37,465	1,0	2,7
	CB30P	23/12/2011	3	32,275	0,0	0,1
			7	25,282	1,6	6,4
			28	39,584	3,4	8,7
Concreteira CC	cimento puro	04/05/2011	3	34,698	0,5	1,5
			7	40,796	0,3	0,8
			28	47,510	1,8	3,7
	cimento + escória	04/05/2011	3	35,005	1,4	4,0
			7	30,063	1,0	3,3
			28	40,494	1,3	3,1
Coleta na Obra CO	CO	11/10/2011	3	29,202	1,1	3,9
			7	34,220	1,3	3,8
			28	34,654	1,5	4,4
	CO	17/10/2011	3	30,232	0,9	2,9
			7	33,118	0,4	1,3
			28	37,848	1,7	4,5
	CO	21/10/2011	3	32,486	1,0	3,1
			7	37,017	0,4	1,2
			28	40,871	4,0	9,7



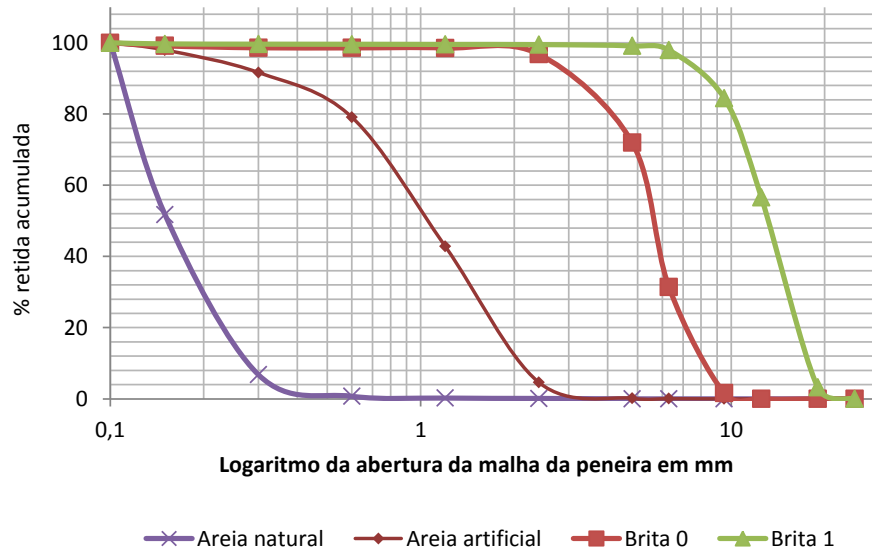


Figura B.1 – Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CA (1ª coleta).

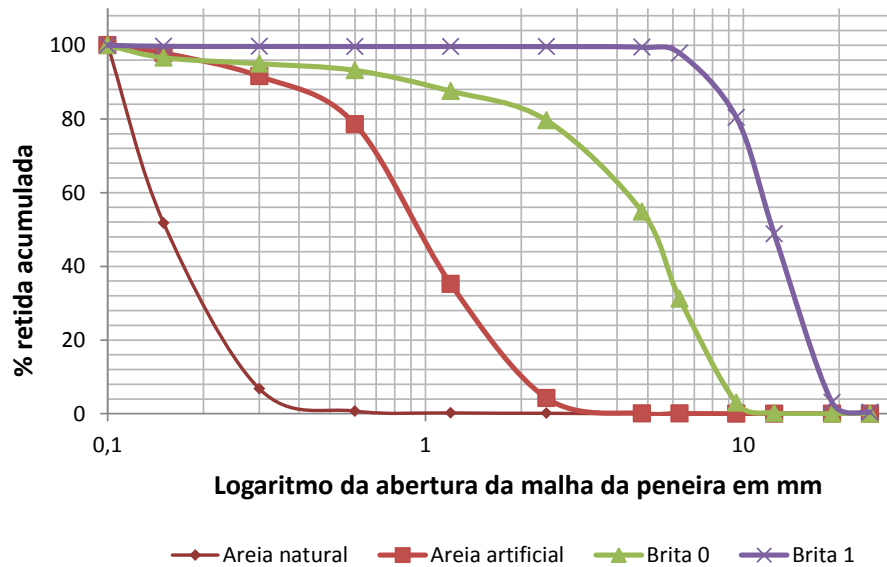


Figura B.2 – Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CA (2ª coleta).

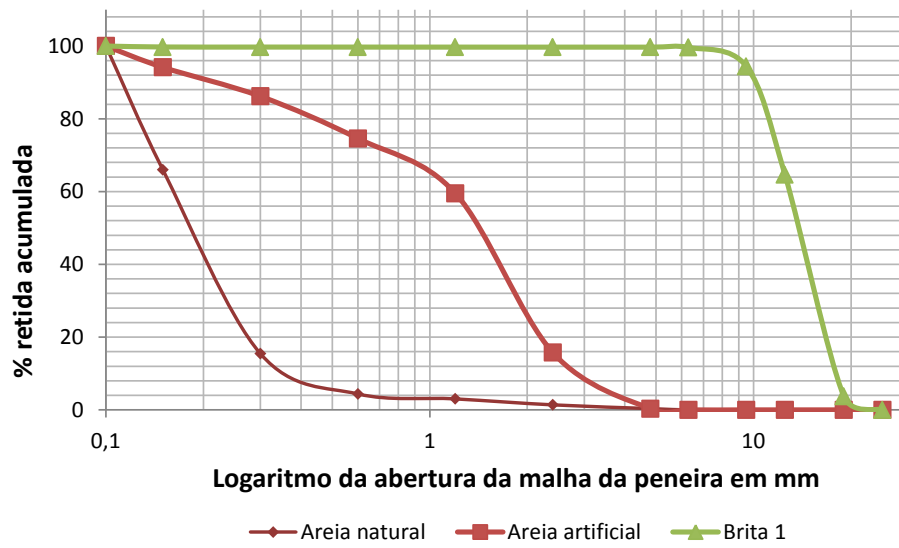


Figura B.3 – Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB (1ª coleta).

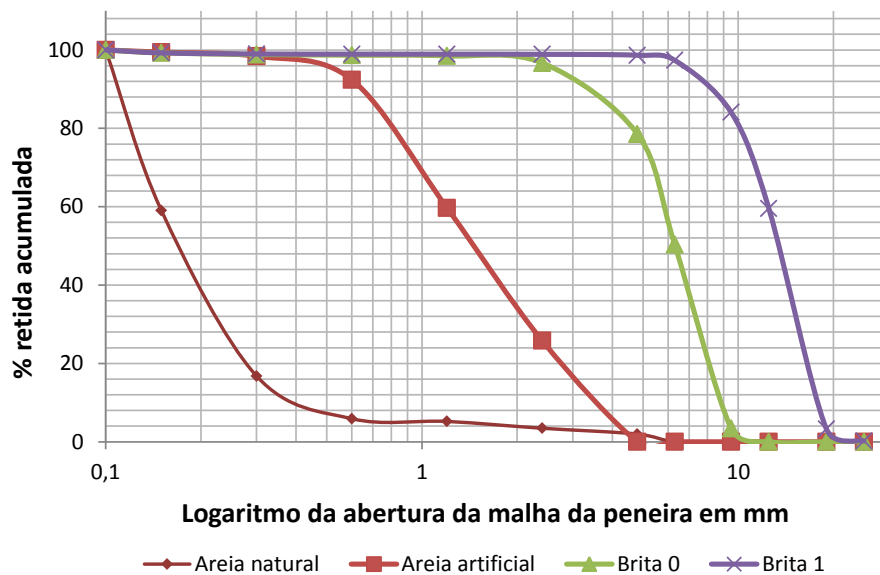


Figura B.4 – Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB (2ª coleta).

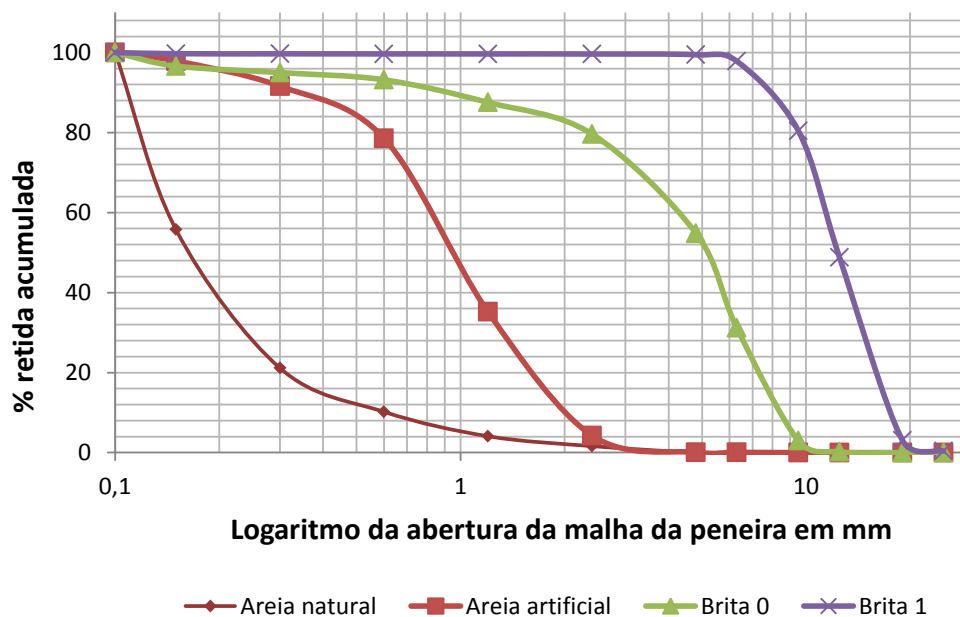


Figura B.5 – Curva granulométrica dos agregados do concreto da concreteira CB.

Tabela B.2 – Composição granulométrica dos componentes dos concretos CA e CB

Amostra	Agregado	Módulo de finura (%)	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Material pulverulento (%)
Concreteira CA 1ª coleta	Areia natural	0,60	0,60	2,64	1,29	3,58
	Areia artificial	3,16	2,40	2,73	1,53	9,54
	Brita 0	5,65	6,30	2,70	1,53	2,46
	Brita 1	6,85	19,00	2,71	1,54	0,98
Concreteira CA 2ª coleta	Areia natural	0,60	0,60	2,67	1,32	2,40
	Areia artificial	3,08	2,40	2,73	1,57	4,60
	Brita 0	5,10	9,50	2,68	1,47	5,99
	Brita 1	6,81	19,00	2,70	1,47	0,96
Concreteira CB 1ª coleta	Areia natural	0,91	0,60	2,66	1,27	7,14
	Areia artificial	3,30	2,40	2,72	1,45	9,85
	Brita 0	-	-	-	-	-
	Brita 1	6,96	19,00	2,69	1,43	0,32
Concreteira CB 2ª coleta	Areia natural	0,92	2,40	2,67	1,30	9,56
	Areia artificial	3,76	2,40	2,73	1,40	9,92
	Brita 0	5,74	9,50	2,65	1,43	4,60
	Brita 1	6,81	19,00	2,68	1,43	0,98

## ANEXO C

### Resultados de todos os ensaios

Tabela C.1 – Valores da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, da resistência à tração por compressão diametral, da velocidade de propagação de onda ultrassônica e do índice de absorção de água de todas as amostras de concreto ensaiadas

CA20												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
7	f <sub>c</sub> (MPa)	21,8	19,1	NR	NR	NR	20,5	1,9	9,5	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,27	2,77	NR	NR	NR	2,52	0,35	14,0	-	-	-
28	f <sub>c</sub> (MPa)	23,0	22,8	24,0	21,2	21,7	22,5	1,1	4,9	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	31,831	30,178	29,858	NR	NR	30,622	1,059	3,5	15,9	10.766	6,80
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,02	2,46	NR	NR	NR	2,74	0,40	14,5	-	-	-
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-

CA30												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	29,5	28,5	29,2	25,9	24,7	27,6	2,1	7,7	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	28,285	33,583	28,974	NR	NR	30,281	2,881	9,5	-	10.108	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
7	f <sub>c</sub> (MPa)	33,7	35,1	35,3	32,1	34,1	34,0	1,3	3,9	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	32,741	38,648	34,395	NR	NR	35,261	3,047	8,6	-	10.811	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,55	3,07	NR	NR	NR	3,31	0,34	10,3	-	-	-
28	f <sub>c</sub> (MPa)	36,8	40,0	39,1	38,6	35,5	38,0	1,8	4,8	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	32,834	31,385	36,900	NR	NR	33,706	2,859	8,5	31,4	11.410	6,10
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,20	3,48	NR	NR	NR	3,34	0,20	5,9	-	-	-
91	f <sub>c</sub> (MPa)	44,6	43,8	44,7	44,8	43,2	44,2	0,7	1,5	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	37,554	33,943	39,124	NR	NR	36,874	2,657	7,2	-	9.361	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,21	4,41	NR	NR	NR	4,31	0,14	3,3	-	-	-

(NR = valor não obtido)

Continua

CA30L												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	28,1	31,7	30,1	29,1	24,4	28,7	2,7	9,5	-	10.789	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	36,985	29,711	31,703	NR	NR	32,800	3,759	11,5			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,80	3,42	-	-	-	3,61	0,27	7,4			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	31,2	34,2	38,0	37,0	38,0	35,6	2,9	8,2	-	8.779	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	26,997	29,645	32,653	NR	NR	29,765	2,830	9,5			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,44	4,58	-	-	-	4,51	0,10	2,2			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	41,5	39,6	43,0	43,6	44,3	42,4	1,9	4,4	35,8	8.813	6,55
	E <sub>ci</sub> (GPa)	32,209	33,004	30,728	NR	NR	31,980	1,155	3,6			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,69	4,08	NR	NR	NR	4,39	0,43	9,8			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	32,4	30,6	NR	NR	NR	31,5	1,3	4,1	-	6.881	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,38	2,03	NR	NR	NR	3,21	1,66	51,8			

CA30P												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	25,4	26,8	25,8	26,3	24,7	25,8	0,8	3,2	-	8.362	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	29,192	27,830	30,465	NR	NR	29,162	1,318	4,5			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,48	3,07	NR	NR	NR	3,28	0,29	8,9			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	28,2	28,8	28,7	28,4	-	28,5	0,3	1,0	-	8.607	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	31,477	32,913	NR	NR	NR	32,195	1,015	3,2			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,67	4,24	NR	NR	NR	3,46	1,11	32,1			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	29,4	30,8	28,4	33,9	32,1	30,9	2,2	7,1	24,3	8.687	5,27
	E <sub>ci</sub> (GPa)	30,315	32,378	32,628	NR	NR	31,774	1,269	4,0			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,27	2,92	NR	NR	NR	3,10	0,25	8,0			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

CA30PL												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	23,5	26,7	24,0	23,1	21,0	23,7	2,1	8,7	-	8.552	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	29,371	31,870	31,870	NR	NR	31,037	1,443	4,6			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,69	2,97	NR	NR	NR	2,83	0,20	7,0			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	27,5	26,9	27,7	28,6	27,4	27,6	0,6	2,3	-	8.823	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	31,546	31,513	29,951	NR	NR	31,003	0,911	2,9			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,78	3,49	NR	NR	NR	3,64	0,21	5,6			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	30,0	30,1	31,0	28,0	NR	29,8	1,2	4,2	23,2	8.917	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	33,604	32,501	NR	NR	NR	33,053	0,780	2,4			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,65	3,02	NR	NR	NR	2,84	0,26	9,2			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

(NR = valor não obtido)

Continua

CA40												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
7	f <sub>c</sub> (MPa)	37,4	42,2	NR	NR	NR	39,8	3,4	8,5	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,02	3,50	NR	NR	NR	3,76	0,37	9,8	-	-	-
28	f <sub>c</sub> (MPa)	42,7	43,5	46,9	43,9	41,8	43,7	1,9	4,4	35,7	11.915	6.13
	E <sub>ci</sub> (GPa)	39,293	39,103	34,399	NR	NR	37,598	2,772	7,4	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,10	4,50	NR	NR	NR	4,30	0,28	6,6	-	-	-
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-

CB20												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	15,5	16,0	NR	NR	NR	15,7	0,3	2,2%	-	7.827	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
7	f <sub>c</sub> (MPa)	22,1	21,9	22,0	21,7	21,4	21,8	0,3	1,3%	-	6.488	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	30,307	29,332	29,524	NR	NR	29,721	0,516	1,7%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,22	2,51	NR	NR	NR	2,37	0,21	8,7%	-	-	-
28	f <sub>c</sub> (MPa)	25,3	26,1	24,9	26,2	26,2	25,8	0,6	2,4%	19,2	8.634	4,95
	E <sub>ci</sub> (GPa)	34,465	33,862	32,459	NR	NR	33,595	1,029	3,1%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	1,94	2,30	NR	NR	NR	2,12	0,25	12,0%	-	-	-
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-

CB30												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	31,1	26,1	28,4	26,5	24,8	27,4	2,5	8,9%	-	9.062	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	35,735	37,376	41,016	NR	NR	38,042	2,703	7,1%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,87	3,16	NR	NR	NR	3,02	0,21	6,8%	-	-	-
7	f <sub>c</sub> (MPa)	35,7	36,5	37,4	36,3	39,4	37,1	1,4	3,9%	-	9.355	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,089	41,661	40,662	NR	NR	41,137	0,501	1,2%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,70	2,70	NR	NR	NR	2,70	0,00	0,0%	-	-	-
28	f <sub>c</sub> (MPa)	43,0	37,8	39,8	45,6	41,2	41,5	3,0	7,2%	34,9	9.819	3,58
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,500	43,193	40,984	NR	NR	41,892	1,156	2,8%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,93	4,05	NR	NR	NR	3,99	0,08	2,1%	-	-	-
91	f <sub>c</sub> (MPa)	43,4	43,2	40,1	46,3	41,3	42,9	2,4	5,5%	-	10.186	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	46,720	44,169	44,678	NR	NR	45,189	1,350	3,0%	-	-	-
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,47	3,97	NR	NR	NR	3,72	0,35	9,5%	-	-	-

(NR = valor não obtido)

Continua

CB30P												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	17,6	19,9	20,7	20,8	-	19,7	1,5	7,6%	-	8.268	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	24,551	25,677	NR	NR	NR	25,114	0,796	3,2%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,70	2,82	NR	NR	NR	2,76	0,08	3,1%			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	21,6	21,1	21,4	25,1	24,3	22,7	1,9	8,2%	-	8.604	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	26,683	29,155	26,489	NR	NR	27,442	1,486	5,4%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,71	3,62	NR	NR	NR	3,67	0,06	1,7%			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	25,2	23,0	28,2	26,3	26,0	25,8	1,9	7,4%	19,2	8.624	7,52
	E <sub>ci</sub> (GPa)	26,685	30,196	30,051	NR	NR	28,977	1,987	6,9%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,19	2,89	NR	NR	NR	3,04	0,21	7,0%			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

CB30PL												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	22,3	24,0	25,5	25,9	23,1	24,1	1,5	6,3%	-	8.712	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	30,131	30,195	29,123	NR	NR	29,816	0,601	2,0%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,49	3,72	NR	NR	NR	3,61	0,16	4,5%			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	26,1	26,5	22,7	25,7	24,1	25,0	1,6	6,3%	-	9.040	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	35,126	31,869	34,420	NR	NR	33,805	1,713	5,1%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,51	4,16	NR	NR	NR	3,34	1,17	35,0%			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	28,9	31,3	30,6	28,3	-	29,8	1,4	4,7%	23,2	9.182	6,55
	E <sub>ci</sub> (GPa)	33,651	37,668	NR	NR	NR	35,660	2,840	8,0%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,92	3,57	NR	NR	NR	3,75	0,25	6,6%			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

CB40												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	37,7	36,7	NR	NR	NR	37,2	0,6	1,7%	-	9.104	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	38,7	40,5	49,0	41,6	40,6	42,1	4,0	9,6%	-	9.332	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,885	41,798	43,137	NR	NR	42,273	0,749	1,8%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,96	4,14	NR	NR	NR	4,55	0,58	12,7%			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	53,0	53,1	49,3	49,4	51,1	51,2	1,9	3,7%	44,6	9.615	3,32
	E <sub>ci</sub> (GPa)	43,253	41,225	41,484	NR	NR	41,987	1,104	2,6%			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,18	4,22	NR	NR	NR	4,20	0,03	0,7%			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

(NR = valor não obtido)

Continua

CC30												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
3	f <sub>c</sub> (MPa)	21,8	22,3	24,5	24,0	21,2	22,8	1,4	6,3	-	8.869	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	30,309	38,473	38,267	NR	NR	35,683	4,655	13,0			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	1,96	2,09	NR	NR	NR	2,03	0,09	4,5			
7	f <sub>c</sub> (MPa)	26,4	25,2	26,9	27,2	25,9	26,3	0,8	3,0	-	9.050	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,208	43,016	40,391	NR	NR	41,538	1,343	3,2			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,80	2,20	NR	NR	NR	2,50	0,42	17,0			
28	f <sub>c</sub> (MPa)	31,1	34,0	33,6	35,6	34,0	33,6	1,6	4,8	27,0	9.359	4.79
	E <sub>ci</sub> (GPa)	39,690	41,301	43,865	NR	NR	41,619	2,106	5,1			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,14	3,52	NR	NR	NR	3,33	0,27	8,1			
91	f <sub>c</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-
	E <sub>ci</sub> (GPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			

ESTUDO DE CASO												
Idade (dias)	Propriedade	Corpos de prova					Média	S <sub>d</sub>	CV (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Ultrassom (m/s)	Absorção de água (%)
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5						
CO1	f <sub>c</sub> (MPa)	51,0	52,3	51,4	51,1	48,8	50,9	1,3	2,5	44,3	-	5,28
	E <sub>ci</sub> (GPa)	42,981	39,701	39,868	NR	NR	40,850	1,847	4,5			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
CO2	f <sub>c</sub> (MPa)	68,6	65,3	62,5	70,3	70,7	67,5	3,5	5,2	60,9	9.526	6,83
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,900	39,583	38,098	NR	NR	39,860	1,916	4,8			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	5,84	5,84	NR	NR	NR	5,84	0,00	0,0			
CO3	f <sub>c</sub> (MPa)	70,4	64,5	64,2	62,2	67,2	65,7	3,2	4,8	59,1	9.382	5,85
	E <sub>ci</sub> (GPa)	40,000	40,096	40,219	-	-	40,105	0,110	0,3			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,70	3,97	NR	NR	NR	3,84	0,19	5,0			
CO4	f <sub>c</sub> (MPa)	55,1	55,4	55,6	52,0	60,0	55,6	2,9	5,1	49,0	-	6,40
	E <sub>ci</sub> (GPa)	40,106	39,450	40,869	NR	NR	40,142	0,710	1,8			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
CO5	f <sub>c</sub> (MPa)	48,3	46,9	46,6	42,8	-	46,1	2,3	5,1	39,5	-	5,50
	E <sub>ci</sub> (GPa)	36,463	35,640	34,746	NR	NR	35,616	0,859	2,4			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,34	4,04	NR	NR	NR	4,19	0,21	5,1			
CO6	f <sub>c</sub> (MPa)	47,8	47,9	51,0	48,2	48,1	48,6	1,3	2,8	42,0	-	2,73
	E <sub>ci</sub> (GPa)	35,319	37,635	36,318	NR	NR	36,424	1,162	3,2			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-			
CO7	f <sub>c</sub> (MPa)	53,9	53,3	54,2	51,1	49,2	52,3	2,1	4,1	45,7	-	2,59
	E <sub>ci</sub> (GPa)	44,491	43,466	38,056	NR	NR	42,004	3,458	8,2			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,22	2,53	NR	NR	NR	2,38	0,22	9,2			
CO8	f <sub>c</sub> (MPa)	40,6	41,8	45,9	46,3	45,2	43,9	2,6	5,9	37,3	-	5,34
	E <sub>ci</sub> (GPa)	37,249	38,171	37,521	NR	NR	37,647	0,474	1,3			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	2,81	2,83	NR	NR	NR	2,82	0,01	0,5			
CO9	f <sub>c</sub> (MPa)	51,9	52,8	51,9	49,3	49,0	51,0	1,7	3,4	44,4	-	3,87
	E <sub>ci</sub> (GPa)	41,447	38,447	38,767	NR	NR	39,554	1,647	4,2			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,40	3,96	NR	NR	NR	3,68	0,40	10,8			
CO10	f <sub>c</sub> (MPa)	47,5	47,1	42,5	43,5	40,8	44,3	2,9	6,6	37,7	-	5,77
	E <sub>ci</sub> (GPa)	40,561	40,816	38,913	NR	NR	40,097	1,033	2,6			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	3,40	3,56	NR	NR	NR	3,48	0,11	3,3			
CO11	f <sub>c</sub> (MPa)	41,3	37,4	43,3	36,8	39,4	39,6	2,7	6,8	33,0	8.938	6,50
	E <sub>ci</sub> (GPa)	33,233	30,540	31,088	NR	NR	31,620	1,423	4,5			
	f <sub>t,D</sub> (MPa)	4,15	2,94	NR	NR	NR	3,55	0,86	24,1			

(NR = valor não obtido)