

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENSAIO NOS
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
DE CONCRETOS: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL E
COMPUTACIONAL**

Augusto Cesar da Silva Bezerra

Belo Horizonte

2007

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENSAIO NOS
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
DE CONCRETOS: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL E
COMPUTACIONAL**

Augusto Cesar da Silva Bezerra

Augusto Cesar da Silva Bezerra

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENSAIO NOS
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
DE CONCRETOS: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL E
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Construção Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

B574i Bezerra, Augusto Cesar da Silva
Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos [manuscrito]: Uma análise experimental e computacional / Augusto César da Silva Bezerra – 2007.
xxiii, 128 f., enc. : il.

Orientador: Paulo Roberto Cetlin
Co-orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 134-137

1. Simulação por computador - Teses. 2. Carga axial - Teses. 3. Concreto - Teses. 4. Concreto de alta resistência – Teses. 5. Deformações e tensões – Teses. I. Cetlin, Paulo Roberto. II. Aguiar, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 620.17(043)

AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENSAIO NA
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS: UMA
ANÁLISE EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, ____ de _____ de 2007

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin (DEMET/UFMG)

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár (DEMC/UFMG)

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva (DEMC/UFMG)

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues (DAEC/CEFET-MG)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e aos meus pais, pois:

“Eles deixaram seus sonhos para que eu sonhasse.

Derramaram lágrimas para que eu fosse feliz.

Perderam noites de sono para que eu dormisse tranqüilo.

Acreditaram em mim, apesar dos meus erros.”

Adaptado de Augusto Cury, em Pais brilhantes e Professores fascinantes

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre ao meu lado, guiando os meus passos e me auxiliando em todos os momentos da minha vida.

A meu pai que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis e complicados da minha vida e é meu grande ídolo, onde eu sempre tentei me espelhar.

Ao incentivo de toda minha família em especial a minha mãe que sempre me desejou o melhor e orou por mim, aos meus irmãos Neto e Vinícius, a Kenya pelo incentivo, confiança e principalmente paciência.

Aos professores Paulo Roberto Cetlin e Maria Teresa Paulino Aguiar pela orientação, dedicação, confiança e pela amizade que juntos construímos.

Aos amigos e colegas de mestrado pela amizade e ajuda nas confecções de idéias, planos e estudos, em especial ao Bruno Campolina, à Ludmila Costa, à Paula Pádua e ao Rodrigo.

Aos alunos de iniciação científica Cristiano, Felipe e Silvio pela ajuda.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais pelos ensinamentos, apoio e oportunidade como professor substituto.

Aos professores do Departamento Acadêmico de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelos ensinamentos, apoio e oportunidade como professor substituto.

A equipe do Laboratório de concreto - Pedro Leopoldo (Barroso Ciminias) da Holcim S.A., principalmente ao Marcelo Augusto Singulani, que esteve sempre à disposição.

A equipe do Laboratório de concreto da Lafarge Concreto, principalmente ao Carlos Junior Resende, que esteve sempre à disposição.

Aos laboratoristas, Ricardo e Machado, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aos funcionários, Isa, Admilson, Gilmar e Ivonete, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

RESUMO

Os concretos, comumente, são avaliados em função de sua resistência à compressão. Entretanto, esse ensaio tem apresentado grande dispersão de resultados. Isto poderia está relacionado a variáveis inerentes à geometria, dimensões e grau de compactação do corpo-de-prova, como também, a planicidade, paralelismo e perpendicularidade das bases em relação ao eixo da amostra. Variáveis relacionadas à execução do ensaio, como a velocidade de aplicação do carregamento e rigidez do equipamento, também contribuiriam para essa dispersão. Na literatura existem diferentes estudos sobre a influência da geometria e dimensões do corpo-de-prova, mas pouco se tem estudado sobre a velocidade de aplicação do carregamento, rigidez do equipamento e regularidade das bases. As velocidades de aplicação da carga, comumente, variam de 0,07 a 0,80MPa/s. Para a regularização das bases dos corpos de prova, têm sido utilizadas diversas técnicas e materiais: capeamentos colados e não colados, sistemas de desgaste mecânico e sistemas de moldes especiais. Atualmente, os capeamentos mais utilizados são os com argamassas de enxofre, os com almofadas de neoprene e a retífica das bases. Os capeamentos com argamassas de cimento, com almofadas de areia e a utilização de moldes que proporcionam superfícies planas e paralelas, dispensado assim o uso de capeamentos, também têm sido utilizados. O presente trabalho avalia, através de experimentos e simulação computacional por elementos finitos, as influências da velocidade de aplicação do carregamento, da rigidez do equipamento e do tipo de regularização das bases dos corpos-de-prova de concreto de três classes de resistência. É apresentada variação de resultados, principalmente no que diz respeito a regularização das bases.

Palavras chaves: concreto, ensaio de compressão, simulação computacional.

ABSTRACT

The performance of concrete is commonly evaluated through its compression strength. The results of this test, however, often displays a high dispersion, possibly associated with aspects such as the specimen geometry, dimensions and degree of compaction of the specimen, as well as the flatness and parallelism of the specimen faces and their orthogonality in relation to the specimen axis. Variables linked to the testing procedures, such as the load application rate and testing machine stiffness may also affect the dispersion in the test results. Reports can be found in the literature, covering the possible influence of the geometry and dimension of the compression specimens, but very few studies seem to have been completed with regard to the effect of the load application rate, testing machine stiffness and specimen base regularity (flatness, parallelism and orthogonality to the specimen axis). The speeds of application of the load, commonly, vary from 0,07 to 0,80MPa/s. Several techniques have been employed in order to treat the regularity of the specimen bases: capping with various materials (attached or not to the specimen bases), mechanical preparation of the bases and special casting moulds for the concrete. The systems most frequently utilized in the regularization of the specimen bases are capping with sulfur, neoprene cushions and base grinding. Surface regularization employing cement mortar, epoxy resins, sand cushions and special moulds that would guarantee adequate specimen bases have also been reported. The present text analyses through experimental approaches and numerical modeling (through the Finite Element Method – FEM) the influence of the effect of the load application rate, testing machine stiffness and specimen base regularity of three strength concrete classes. The dispersion of results is presented, mainly the base regularity variation.

Key Words: concrete, compression testing, computer simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	24
1.1. Objetivos.....	25
1.1.1. Objetivo geral.....	25
1.1.2. Objetivos específicos	25
1.2. Métodos	26
1.3. Justificativa e relevância do tema	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1. Ensaio de resistência à compressão axial	28
2.1.1. Variáveis inerentes à confecção dos corpos-de-prova	28
2.1.1.1. Dimensões básicas e geometria dos moldes.....	28
2.1.1.2. Características básicas dos moldes	32
2.1.1.3. Adensamento dos corpos-de-prova.....	32
2.1.2. Variáveis inerentes às bases dos corpos-de-prova	36
2.1.2.1. Sistemas de capeamento colados	38
2.1.2.2. Sistemas de capeamento não colados	46
2.1.2.3. Sistemas de desgaste mecânico - Retificação	53
2.1.2.4. Sistema de moldes especiais	53
2.1.3. Variáveis inerentes ao ensaio	57
2.1.3.1. Velocidade da aplicação de carga.....	57

2.1.3.2.	Máquina de ensaio	59
2.2.	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade	59
2.2.1.	Módulo de elasticidade estático	60
2.2.2.	Módulo de elasticidade dinâmico	61
2.2.2.1.	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante	61
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.1.	Materiais	66
3.1.1.	Materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova	66
3.1.2.	Materiais utilizados nos capeamentos	67
3.2.	Métodos	69
3.2.1.	Métodos utilizados na confecção dos corpos-de-prova	69
3.2.2.	Métodos utilizados no ensaio de resistência à compressão	72
3.2.2.1.	Métodos de capeamento	74
3.2.3.	Métodos utilizados no ensaio de módulo de elasticidade	80
3.2.3.1.	Módulo de elasticidade estático.....	80
3.2.3.2.	Módulo de elasticidade dinâmico.....	81
3.2.4.	Métodos utilizados na simulação computacional	85
4.	RESULTADOS	92
4.1.	Ensaio de resistência à compressão	92
4.1.1.	Dados obtidos para os traços 1 e 2	92
4.1.1.1.	Capeamento com enxofre.....	92
4.1.1.2.	Capeamento elastomérico confinado	93
4.1.1.3.	Capeamento elastomérico não confinado.....	95
4.1.1.4.	Capeamento com areia confinada	96

4.1.1.5.	Velocidade do ensaio	97
4.1.2.	Dados obtidos para o traço 3	101
4.1.2.1.	Capeamento com enxofre.....	101
4.1.2.2.	Capeamento elastomérico confinado	102
4.1.2.3.	Moldes especiais de resina.....	104
4.1.2.4.	Velocidade do ensaio	105
4.1.3.	Vantagens e desvantagens dos sistemas de regularização de bases.....	107
4.2.	Módulo de elasticidade.....	113
4.2.1.	Módulo de elasticidade estático	113
4.2.2.	Módulo de elasticidade dinâmico	117
4.2.2.1.	Ensaio no traço 1	117
4.2.2.2.	Ensaio no traço 2.....	119
4.3.	Simulação computacional.....	123
4.3.1.	Dados apresentados nos corpos-de-prova com bases paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal	123
4.3.2.	Dados apresentados nos corpos-de-prova com bases não paralelas e não perpendiculares ao eixo longitudinal	128
4.3.3.	Dados apresentados com o equipamento não rígido.....	130
5.	CONCLUSÕES.....	131
6.	PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS	133
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
8.	APÊNDICES.....	138
8.1.	Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 1	139
8.2.	Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 2	140

8.3. Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 3	141
8.4. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 1 aos 29 dias	142
8.4.1. Corpo-de-prova 1	142
8.4.2. Corpo-de-prova 2.....	143
8.5. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 30 dias	144
8.5.1. Corpo-de-prova 1	144
8.5.2. Corpo-de-prova 2.....	145
8.6. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 56 dias	146
8.6.1. Corpo-de-prova 1	146
8.6.2. Corpo-de-prova 2.....	147
8.7. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 62 dias	148
8.7.1. Corpo-de-prova 1	148
8.7.2. Corpo-de-prova 2.....	149
8.8. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 3 aos 19 dias	150
8.8.1. Corpo-de-prova 1	150
8.8.2. Corpo-de-prova 2.....	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência da planeza da superfície de carga de corpos-de-prova cúbicos de concreto sobre a resistência à compressão (adaptado de BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).....	37
Figura 2 - Capeador de enxofre para corpos-de-prova de concreto.....	43
Figura 3 - Influência da espessura do capeamento sobre a resistência à compressão (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).....	45
Figura 4 - Sistemas de capeamento não colado	47
Figura 5 - Capeamento com almofadas de neoprene não confinado.....	48
Figura 6 - Capeador elastomérico - Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene	49
Figura 7 - Capeamento com almofada de areia	52
Figura 8 - Nova versão do novo sistema de moldes em resina.....	57
Figura 9 - Equipamento ERUDITE MKII para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (GERMANN INSTRUMENTS, 2007).....	62
Figura 10 - Curva típica da amplitude de vibração pela freqüência (CNS, 1995).....	63
Figura 11 - Curvas da amplitude de vibração pela freqüência (GERMANN INSTRUMENTS, 2007)	64
Figura 12 - Corpo-de-prova cilíndrico 50 x 100 mm de enxofre ao lado de um corpo-de-prova 100 x 200 mm de concreto.....	68
Figura 13 - Gabarito capeador de enxofre	74
Figura 14 - Corpos-de-prova capeados com enxofre.....	75
Figura 15 - Capeador elastomérico n° 1.....	76
Figura 16 - Capeador elastomérico n° 2.....	77

Figura 17 - Capeamento com caixa de areia	78
Figura 18 - Molde especial de resina utilizado	79
Figura 19 - Discos de aço planos	79
Figura 20 - Compressômetro para medição de deformação axial.....	81
Figura 21 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal	82
Figura 22 - Freqüência ressonante longitudinal aproximada (CNS, 1995).....	83
Figura 23 - Tela inicial do pré-processador do <i>Deform</i>	86
Figura 24 - Controle de simulação do pré-processador do <i>Deform</i>	87
Figura 25 - Inserção de material no <i>software Deform</i>	87
Figura 26 - Cadastro da tensão e deformação do concreto no software <i>Deform</i>	88
Figura 27 - Desenho do corpo-de-prova e pratos do equipamento de ensaio no <i>software Deform</i>	89
<i>Figura 28 - Propriedades dos materiais pelo software CES Selector</i>	89
Figura 29 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova dos traços 1 e 2 capeados com enxofre	92
Figura 30 - Ruptura de corpo-de-prova capeado com enxofre.....	93
Figura 31 - Ruptura com capeamento elastomérico confinado	93
Figura 32 - Comparação da resistência à compressão do traço 1 com capeamentos elastoméricos com neoprene confinado de espessuras diferentes	94
Figura 33 - Comparação da resistência à compressão do traço 2 com capeamentos elastoméricos com neoprene confinado de espessuras diferentes	94
Figura 34 - Resistência à compressão do traço 1 com capeamentos elastoméricos não confinado.....	95

Figura 35 - Resistência à compressão do traço 2 com capeamentos elastoméricos não confinado.....	95
Figura 36 - Ruptura com capeamento elastomérico não confinado	96
Figura 37 - Resistência à compressão dos traços 1 e 2 com capeamento de areia confinada.....	96
Figura 38 - Ruptura com o capeamento de areia	97
Figura 39 - Comparação da resistência à compressão do traço 1 com o capeamento de enxofre e o elastomérico	99
Figura 40 - Comparação da resistência à compressão do traço 2 com o capeamento de enxofre e o elastomérico	100
Figura 41 - Deformação plástica do capeador elastomérico 2	104
Figura 42 - Resistência à compressão do concreto versus velocidade de carregamento para corpos-de-prova capeados com enxofre e o controle de velocidade do equipamento na mesma posição.....	107
Figura 43 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o corpo-de-prova 1 do traço 1	118
Figura 44 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 30 dias	120
Figura 45 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 56 dias	121
Figura 46 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 62 dias	121
Figura 47 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 3 aos 19 dias	122
Figura 48 - Comparação entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos .	123

Figura 49 - Previsão de carregamento em função da deformação no corpo-de-prova com bases regulares e sem capeamento do traço 1.....	124
Figura 50 - Previsão de carregamento em função do tempo no corpo-de-prova com bases regulares e sem capeamento do traço 1.....	125
Figura 51 - Curva carregamento-deformação do traço 1 com os capeamentos.....	127
Figura 52 - Irregularidades das bases do corpo-de-prova.....	129
Figura 53 - Resistência à compressão da simulação para os corpos-de-prova com bases regulares e irregulares	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios dos corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos aos 7 e 28 dias de idade (LIMA e BARBOSA, 2002)	30
Tabela 2 - Correlações entre corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos (LIMA e BARBOSA, 2002).....	30
Tabela 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para corpos-de-prova cilíndricos 75 x150 e 100 x 200 mm (adaptado de PATNAIKA e PATNAIKUNIB, 2001)	31
Tabela 4 - Número de camadas para moldagem dos corpos-de-prova (ABNT, 2003a)	34
Tabela 5 - Influência do capeamento na resistência da argamassa (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986)	39
Tabela 6 - Condições para o uso de almofadas de policloroprene - Neoprene (Adaptado de ASTM, 2000).....	50
Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios à compressão de concreto (adaptado de MARCO; REGINATTO e JACOSKI, 2003).....	51
Tabela 8 - Traços utilizados no estudo comparativo do molde de resina x molde de aço com capeamento de enxofre (ROCHA, 2002)	55
Tabela 9 - Resultados dos testes de resistência à compressão em MPa (ROCHA, 2002)	56
Tabela 10 - Descrição dos materiais utilizados para confecção dos traços 1 e 2	66
Tabela 11 - Descrição dos materiais utilizados para confecção do traço 3.....	67
Tabela 12 - Materiais de capeamento utilizados para os traços 1 e 2 no ensaio de resistência à compressão.....	67

Tabela 13 - Materiais de capeamento utilizados para o traço 3 no ensaio de resistência à compressão.....	68
Tabela 14 - Especificação das almofadas elastoméricas	69
Tabela 15 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (ABNT, 2004)	70
Tabela 16 - Classes de resistência do grupo I (ABNT, 1992)	70
Tabela 17 - Classes de resistência do grupo II (ABNT, 1992)	71
Tabela 18 - Quantidade de materiais utilizados nos traços 1 e 2.....	71
Tabela 19 - Quantidade de materiais utilizados no traço 3	72
Tabela 20 - Distribuição dos corpos-de-prova dos traços 1 e 2 no ensaio de resistência à compressão.....	73
Tabela 21 - Distribuição dos corpos-de-prova do traço 3 no ensaio de resistência à compressão.....	73
Tabela 22 - Especificação das almofadas elastoméricas	77
Tabela 23 - Propriedades dos materiais de capeamento utilizados na simulação	90
Tabela 24 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio para os traços 1 e 2 capeados com enxofre.....	98
Tabela 25 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio para os corpos-de-prova capeados com neoprene confinado.....	99
Tabela 26 - Velocidade de carregamento por tipo de capeamento	100
Tabela 27 - Tipo de capeamento, velocidade de carregamento e tensão de ruptura	101
Tabela 28 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com enxofre	102

Tabela 29 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene confinado (Capeador 1).....	102
Tabela 30 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene reutilizado confinado (Capeador 1)	103
Tabela 31 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene confinado (Capeador 2).....	103
Tabela 32 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio dos corpos-de-prova do traço 3 moldados nos moldes de resina.....	104
Tabela 33 - Velocidade de carregamento por tipo de capeamento do traço 3	106
Tabela 34 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 1	114
Tabela 35 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 1	114
Tabela 36 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 2.....	115
Tabela 37 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 2	115
Tabela 38 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 3.....	116
Tabela 39 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 3	116
Tabela 40 - Escala de freqüência escolhidas para o traço 1	117
Tabela 41 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para a faixa de freqüência 8.000 a 12.000Hz do traço 1	118
Tabela 42 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para a faixa de freqüência 7.000 a 13.000Hz do traço 1	119
Tabela 43 - Escala de freqüência escolhidas para o traço 2.....	119
Tabela 44 - Dados resultantes da simulação do <i>Deform</i> para os três traços	124
Tabela 45 - Dados resultantes da simulação do <i>Deform</i> para o traço 1 com capeamentos.....	125

Tabela 46 - Resultados da simulação do traço 1 em função das propriedades do material de capeamento.....	126
Tabela 47 - Dados resultantes da simulação do <i>Deform</i> para os traços 2 e 3	128
Tabela 48 - Dados resultantes da simulação do <i>Deform</i> com o corpo-de-prova com as bases irregulares para os traços 1, 2 e 3.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

CMN – Comitê Mercosul de Normalização

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

1. INTRODUÇÃO

Em concretos, a resistência à compressão é comumente usada como parâmetro de classificação, qualidade e dimensionamento. Isto se deve à possibilidade de correlação dessa propriedade com outras, e à facilidade com a qual mesma é obtida. A resistência mecânica à compressão é determinada por meio de ensaios de compressão uniaxial de corpos-de-prova moldados especialmente para essa finalidade. Entretanto, relatos da literatura indicam que os resultados desse ensaio apresentam grande dispersão (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; PATNAIKA e PATNAIKUNIB, 2001; LIMA e BARBOSA, 2002; MARCO, REGINATTO e JACOSKI, 2003). Isto poderia estar relacionado à qualidade intrínseca do concreto, ou seja, ao consumo de cimento por metro cúbico, ao fator água-materiais cimentícios e às propriedades do cimento e dos agregados. Por outro lado, para um mesmo concreto, os resultados do ensaio de compressão parecem depender de variáveis relativas à geometria, dimensões e grau de adensamento do corpo-de-prova, assim como da planicidade, paralelismo e perpendicularidade em relação ao eixo das superfícies de carga dos corpos-de-prova. Outros fatores de influência seriam a velocidade de aplicação do carregamento e a rigidez do equipamento de ensaio.

Quanto à geometria e às dimensões, os corpos-de-prova são padronizados para o ensaio de compressão, sendo permitido mais de uma forma e tamanho. As normas nacionais e americanas especificam métodos para o adensamento manual e mecanizado dos corpos-de-prova. No entanto, as nacionais sugerem o uso do primeiro tipo. A aplicação do carregamento tem sido feita a diferentes velocidades. Na literatura existem referências de taxa que variam de 0,07 a 0,80MPa/s (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986; ABNT, 1994; COUTINHO e GONÇALVES, 1994; ABNT, 1996). No entanto, pouco se conhece sobre a influência desta variação nos resultados encontrados para concretos. O mesmo ocorre no que diz respeito à rigidez do equipamento utilizado. No tocante a superfície dos corpos-de-prova a situação se torna ainda mais complexa.

Para a execução do ensaio de compressão, é necessário que as superfícies onde se aplicam as cargas sejam planas, paralelas, lisas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo-de-prova, de modo que o carregamento seja uniformemente distribuído. São utilizadas com essa finalidade diversas técnicas e materiais: capeamentos colados e não colados, sistemas de desgaste mecânico e sistemas de moldes especiais.

Atualmente, as regularizações das bases mais utilizadas são a retifica e os capeamentos com argamassas de enxofre e os com almofadas elastoméricas. Podem-se citar também os capeamentos com pastas e argamassas de cimento, e com almofadas de areia. Outra solução adotada é a utilização de moldes que proporcionem superfícies planas e paralelas no momento da confecção dos corpos-de-prova, dispensado assim o uso de capeamentos.

O presente trabalho avalia, através de experimentos e simulação computacional por elementos finitos, as influências da velocidade de aplicação do carregamento, da rigidez do equipamento e da regularização das bases dos corpos-de-prova de concreto de três classes de resistência.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Visando contribuir para o controle tecnológico do concreto, este trabalho tem o objetivo de avaliar a influência da velocidade de aplicação do carregamento, da rigidez do equipamento e da regularização das bases no ensaio para determinação da resistência à compressão dos concretos.

1.1.2. Objetivos específicos

Este trabalho tem com objetivos específicos:

- a) avaliar experimentalmente os principais métodos e materiais empregados na regularização das bases dos corpos-de-prova de concreto no ensaio de resistência à compressão;
- b) avaliar, utilizando simulação computacional por elementos finitos, os métodos e materiais empregados na regularização das bases dos corpos-de-prova de concreto no ensaio de resistência à compressão;
- c) determinar experimentalmente a influência da velocidade do carregamento no ensaio à compressão;
- d) determinar, utilizando simulação computacional, a influência da rigidez do equipamento no ensaio à compressão;
- e) propor condições necessárias no tocante às variáveis estudadas para o ensaio de resistência à compressão do concreto.

1.2. Métodos

O presente trabalho realiza uma pesquisa bibliográfica dividida em três partes. A primeira aborda o ensaio de resistência à compressão de concretos, no que diz respeito às variáveis relacionadas à velocidade da aplicação do carregamento, rigidez do equipamento e à regularização das bases dos corpos-de-prova. Em uma segunda etapa é estudado o módulo de elasticidade. Na terceira é apresentada a revisão sobre o método simulação computacional utilizando elementos finitos.

Após a obtenção da base teórica, foram confeccionados corpos-de-prova com concretos de três classes de resistência à compressão e realizada a cura úmida dos mesmos em condições idênticas. Foram realizados diferentes tipos de capeamento e executados os ensaios de resistência à compressão.

Com os ensaios de resistência à compressão concluídos foi realizada a simulação computacional do ensaio de compressão com diferentes condições, tipos de capeamentos e velocidades de carregamento. O ensaio de determinação do módulo

de elasticidade dinâmico e estático será realizado para obtenção de dados para a simulação computacional.

1.3. Justificativa e relevância do tema

Cada vez mais têm sido fabricados concretos de elevadas resistências, que possuem em sua composição diferentes materiais, ou mesmo adições inéditas. Muitas das vezes é necessário realizar ensaios cujos resultados sejam capazes de expressar a influência desses materiais, ou seja, os resultados não deveriam ser influenciados por nada além da variável analisada. O ensaio de resistência à compressão para avaliação dos concretos é um dos mais utilizados devido a sua facilidade de realização, pelo seu custo relativamente baixo e pela possibilidade de correlação com outras propriedades do concreto. No entanto, algumas variáveis do ensaio de resistência à compressão influenciam significativamente os resultados encontrados. Entre elas pode-se destacar o tipo de regularização de bases pela própria variação da confecção e/ou utilização da mesma, a velocidade de aplicação do carregamento e a rigidez do equipamento de ensaio.

De modo geral essas variáveis não são consideradas. É possível encontrar métodos e materiais de capeamentos que alcançam bons resultados para uma classe de resistência do concreto, e que não alcançam resultados coerentes para outra classe, podendo, assim levar pesquisadores a conclusões equivocadas. O mesmo poderia ocorrer com as outras variáveis

Dessa forma é importante que se conheça a influência dessas variáveis nos resultados do ensaio de compressão, de modo a ter uma maior confiabilidade dos mesmos, tanto no tocante ao controle tecnológico quanto à análise da influência das condições intrínsecas ao concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do trabalho ficou dividida em duas partes. A primeira abordou o ensaio de resistência à compressão de concretos e a segunda o ensaio de módulo de elasticidade.

A primeira parte da revisão foi dividida em três tópicos, a saber: as variáveis inerentes a moldagem dos corpos-de-prova possíveis de influenciar a resistência à compressão dos concretos, as variáveis inerentes ao preparo dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios e as variáveis inerentes ao ensaio propriamente dito.

A segunda parte da revisão aborda uma revisão sobre a determinação do módulo de elasticidade pelos métodos dinâmico e estático.

2.1. Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial até a ruptura da amostra de concreto é uma das ferramentas de dimensionamento e controle da qualidade mais utilizada.

O concreto é um material heterogêneo macroestruturalmente, possui inúmeras variáveis de constituição e composição, e uma microestrutura, na maioria das vezes, de difícil determinação exata. Com isso, se faz necessário conhecer ao máximo as variáveis relacionadas à realização de ensaios.

2.1.1. Variáveis inerentes à confecção dos corpos-de-prova

2.1.1.1. Dimensões básicas e geometria dos moldes

Segundo a NBR 5738/2003 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto (ABNT, 2003a), os corpos-de-prova podem ser cilíndricos ou

prismáticos. Os moldes dos corpos-de-prova cilíndricos devem ter altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro deve ser de 10, 15, 20, 25, 30 ou 45cm. As medidas diametraais têm tolerância de 1% e a altura, 2%. Os planos das bordas circulares extremas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde.

Já os moldes dos corpos-de-prova prismáticos devem ter seção transversal quadrada, com superfícies lisas e livres de saliências, e cumprir com os seguintes requisitos:

- o comprimento deve ser pelo menos 50mm maior que o vão de ensaio e 50mm maior que três vezes a dimensão do lado da seção transversal do corpo-de-prova;
- a dimensão transversal deve ser de no mínimo 150mm;
- a tolerância das dimensões deve ser inferior a 2% e nunca maior do que 2mm.

Ainda de acordo com a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), periodicamente, dependendo das condições e freqüência de uso dos moldes ou sempre que se verificar alguma anomalia, deve ser realizado um controle geométrico, sendo verificadas as dimensões, com exatidão de 0,1mm, e as condições de perpendicularidade e planeza das laterais e base dos moldes, respectivamente, com exatidão de 0,05mm.

LIMA e BARBOSA (2002) apresentaram resultados dos ensaios com corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos, conforme Tabela 1, e encontraram as correlações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios dos corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos aos 7 e 28 dias de idade (LIMA e BARBOSA, 2002)

Tipo de CP	7 dias		28 dias	
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Resistência (MPa)	Média (MPa)
Cilíndrico 15 x 30cm	23,2	21,6	31,5	27,3
	20,9		22,9	
	20,6		27,4	
Cilíndrico 10 x 20cm	20,4	21,7	26,8	26,7
	21,1		24,3	
	23,7		28,9	
Cúbico 15 x 15cm	24,6	25,9	38,1	39,2
	26,4		40	
	26,7		39,5	
Cúbico 10 x 10cm	22,2	29,1	43,6	42,7
	32,5		46,5	
	32,6		38,0	

Tabela 2 - Correlações entre corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos (LIMA e BARBOSA, 2002)

Idade (dias)	$R_{cil15x30}/R_{cub10x10}$	$R_{cil15x30}/R_{cub15x15}$	$R_{cil10x20}/R_{cub10x10}$	$R_{cil10x20}/R_{cub15x15}$
7	0,742	0,834	0,746	0,838
28	0,639	0,696	0,625	0,681

Os autores concluíram que os valores encontrados se aproximam dos obtidos por outros autores e dos citados nas normas. As relações encontradas entre os corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos permitem que se possa usar qualquer dos moldes sem levar a resultados enganosos, tomando os devidos cuidados na conversão das resistências.

Entretanto, nos diversos trabalhos lidos sobre o tema não houve nenhuma abordagem sobre os tipos de regularização realizados para os corpos-de-prova de geometria distinta.

PATNAIKA e PATNAIKUNIB (2001) realizaram uma a correlação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 75mm e 100mm de diâmetro para concretos de alta resistência apresentando pequenas diferenças nos resultados, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para corpos-de-prova cilíndricos 75 x150 e 100 x 200 mm (adaptado de PATNAIKA e PATNAIKUNIB, 2001)

Idade (dias)	Cilindros 75 x 150 mm				Cilindros 100 x 200 mm			
	N° de corpos de prova	Resistência Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	N° de corpos de prova	Resistência Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
91	24	130,2	2,7	2,0	12	127,5	3,0	2,4
91	25	132,3	3,4	2,6	25	128,7	3,1	2,4
91	12	157,5	1,6	1,0	12	162,1	2,6	1,6
91	7	155,5	1,8	1,2	10	157,9	2,8	1,8
7	12	112,8	0,8	0,7	12	108,4	2,1	1,9
28	12	141,8	3,2	2,2	12	141,2	4,4	3,1
56	12	148,9	1,4	0,7	13	149,8	5,8	3,9
91	13	155,9	3,2	2,0	13	158,0	5,6	3,5
180	25	152,8	6,4	4,2	13	152,0	9,0	5,9

Chegaram à conclusão que se os dados deste estudo forem considerados exclusivamente em uma análise de regressão, a equação para resistência à compressão entre 110 e 160 MPa é como segue a Equação 1:

$$\begin{aligned}
 S_{75} &= 0,85 S_{100} + 21,7 \\
 S_{100} &= 1,177 S_{75} - 25,5
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Onde,

S75 é a resistência média dos cilindros de 75mm de diâmetro em MPa;

S100 é a resistência média dos cilindros de 100mm de diâmetro em MPa.

2.1.1.2. Características básicas dos moldes

A NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), diz que:

- As laterais e a base do molde devem ser de aço ou outro material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland, e suficientemente rígido para manter sua forma durante a operação de moldagem. O molde deve ser aberto em seu extremo superior e permitir fácil desmoldagem, sem danificar os corpos-de-prova. A base, colocada no extremo inferior do molde, deve ser rígida e plana, com tolerância de planeza de 0,05mm;
- O conjunto constituído pelo molde e sua base deve ser estanque. Quando as juntas não forem estanques, devem ser vedadas com um material de características adequadas que não reaja com o cimento Portland, para evitar perda de água;
- Não devem ser aceitos moldes com geratrizes abertas desencontradas. Para evitar esse problema, os moldes podem ter um dispositivo que evite o desencontro das geratrizes abertas.

A NBR 7215/1996 (ABNT, 1996), diz que a superfície interna da forma cilíndrica deve ser lisa, sem defeitos, e o ângulo formado pela base e qualquer geratriz da forma deve ser de $(90 \pm 0,5)^\circ$. A diferença entre dois diâmetros ortogonais quaisquer não deve ser superior a 0,2mm. A base, com espessura mínima de 3mm, deve ter dimensões suficientes para permitir a fixação da forma. A superfície compreendida pela forma cilíndrica deve ser plana e lisa, não podendo apresentar afastamentos relativamente ao plano maiores que 0,050mm em 50mm.

2.1.1.3. Adensamento dos corpos-de-prova

O adensamento do material a ser ensaiado na moldagem dos corpos-de-prova é uma prática comum e regulamentada pelas normas específicas. Existe basicamente duas maneiras de proporcionar o adensamento de corpos-de-prova.

A primeira seria o adensamento manual com golpes com a haste de adensamento. A NBR 5738/2003 diz que esta haste deve ser de aço comum, cilíndrica, com superfície lisa, de $(16,0 \pm 0,2)$ mm de diâmetro e comprimento de 600mm a 800mm, ou os dois extremos em forma semi-esférica, com diâmetro igual ao da haste (ABNT, 2003a).

A segunda seria o adensamento por vibração, que pode ser realizado por vibração interna (imersão) ou externa. A NBR 5738/2003 diz que os vibradores de imersão (internos) podem ter eixo rígido ou flexível e devem ser acionados por um motor elétrico. A frequência de vibração não deve ser inferior a 100Hz (6.000 vibrações por minuto), medida quando o elemento vibrante estiver submerso no concreto. O diâmetro ou o lado exterior da seção transversal do elemento vibrante de vibradores internos não deve ser inferior a 19mm nem superior a 1/4 da dimensão básica (d) da Tabela 4 para os corpos-de-prova cilíndricos e 1/3 da dimensão básica (d) para os corpos-de-prova prismáticos. O comprimento total da parte flexível e do elemento vibrante deve ser pelo menos 80mm maior que a altura do molde (ABNT, 2003a).

Já para vibração externa, a NBR 5738/2003 diz que os vibradores externos podem ser do tipo de compartimento fechado e a frequência de vibração deve ser superior a 50Hz (3.000 vibrações por minuto) e qualquer que seja o tipo de vibrador externo utilizado, ele deve dispor de meios para fixar firmemente o molde ao vibrador. Deve, também, dispor de aparelhagem para controlar a frequência de vibração (ABNT, 2003a).

A NBR 5738/2003 indica que a escolha do método de adensamento deve ser feita em função do abatimento do concreto e das seguintes condições:

- a) os concretos com abatimento compreendido entre 10mm e 30mm devem ser adensados por vibração;
- b) os concretos com abatimento compreendido entre 30mm e 150mm podem ser adensados com a haste (adensamento manual) ou por vibração;
- c) os concretos com abatimento superior a 150mm devem ser adensados com a haste (adensamento manual).

Observa também que para concretos especiais, o procedimento de moldagem pode ser modificado de modo a simular o adensamento a ser empregado na obra, de acordo com o responsável pela obra (ABNT, 2003a).

2.1.1.3.1. Adensamento manual com haste

A NBR 5738/2003 preconiza a introdução do concreto no molde em camadas de volume aproximadamente igual e adensar cada camada utilizando a haste, que deve penetrar no concreto com seu extremo em forma de semi-esfera o número de vezes definido na Tabela 4.

Tabela 4 - Número de camadas para moldagem dos corpos-de-prova (ABNT, 2003a)

Tipo de corpo-de-prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de camadas em função do tipo de adensamento
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	9	225
Prismático	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450	3	--	--

Obs.: Para concretos com abatimento superior a 160mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

A primeira camada deve ser atravessada em toda a sua espessura, quando adensada com a haste, evitando-se golpear a base do molde. Os golpes devem ser distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde. Cada uma das camadas seguintes também deve ser adensada em toda sua espessura, fazendo com que a haste penetre aproximadamente 20mm na camada anterior. Se a haste de adensamento criar vazios na massa de concreto, deve-se bater levemente na face externa do molde, até o fechamento destes. A última camada deve ser moldada com quantidade em excesso de concreto, de forma que ao ser adensado complete

todo o volume do molde e seja possível proceder ao seu rasamento, eliminando o material em excesso. Mas em nenhum caso é aceito completar o volume do molde com concreto após o adensamento da última camada (ABNT, 2003a).

2.1.1.3.2. Adensamento por vibração

Segundo a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), para cada classe de concreto, tipo de vibrador e de molde, é requerido um tempo particular de vibração, que deve ser mantido uniforme. Esse tempo depende da consistência do concreto e da eficiência do vibrador. A vibração deve ser finalizada quando a superfície do concreto apresentar um aspecto relativamente liso e praticamente não houver mais o aparecimento de bolhas de ar na superfície. Deve-se evitar vibrar demasiadamente o concreto, pois isso pode produzir segregação.

Ainda de acordo com a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), deverá ser colocado o concreto no molde em camadas de volumes aproximadamente iguais, de acordo com a Tabela 4, citada anteriormente. Antes de iniciar a vibração de cada camada, o molde deve conter a quantidade total de concreto correspondente a essa camada. Somente quando o adensamento for realizado por vibração interna, o concreto da última camada deve ser colocado de modo que sua superfície fique no máximo 5 mm abaixo da altura do molde, preenchendo totalmente o molde com concreto ao vibrar.

2.1.1.3.2.1. Vibração interna

Segundo a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a):

a) Para corpos-de-prova cilíndricos, a razão entre o diâmetro do corpo-de-prova e o diâmetro ou o lado externo do elemento vibrante não deve ser inferior a quatro. Ao vibrar cada camada, o elemento vibrante deve ser introduzido apenas uma vez, no centro da superfície do corpo-de-prova, ao longo de seu eixo.

b) Para corpos-de-prova prismáticos, a razão entre a largura do molde e o diâmetro ou o lado externo do elemento vibrante não deve ser inferior a três. O elemento

vibrante deve ser introduzido em direção perpendicular à superfície do corpo-de-prova, em pontos afastados entre si aproximadamente a metade do comprimento do corpo-de-prova, no sentido do eixo longitudinal do corpo-de-prova.

A NBR 5738/2003 observa que ao adensar a camada inferior, evitar que o vibrador descansa sobre a base do molde ou toque suas paredes laterais; ao adensar a segunda camada, o vibrador deve penetrar aproximadamente 20mm na camada anterior. E que a retirada do vibrador deve ser realizada com todo o cuidado possível, evitando que fiquem vazios em cada local de inserção, na massa do concreto adensado. Após o adensamento de cada camada, bater levemente na face externa do molde até o fechamento dos vazios deixados pelo elemento vibrante (ABNT, 2003a).

2.1.1.3.2.2. Vibração externa

De acordo com a NBR 5738/2003, devem ser tomadas todas as precauções para que o molde se mantenha fixo à superfície ou ao elemento vibrante (ABNT, 2003a).

2.1.2. Variáveis inerentes às bases dos corpos-de-prova

Segundo SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986), para a execução do ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova de concreto, é necessário que as superfícies, onde se aplicam as cargas, sejam planas, paralelas e lisas, de modo que o carregamento seja uniforme. As faces devem ainda, ser ortogonais ao eixo do corpo-de-prova. De acordo com os autores, os corpos-de-prova cúbicos levam vantagens neste particular, visto que ao usar moldes adequado é fácil de se obter pelo menos duas faces paralelas, entre as seis existentes. Isto não acontece facilmente com corpos de prova cilíndricos, visto que as duas faces usadas para carregamento no ensaio de compressão axial são as únicas duas faces planas. Pequenas irregularidades na superfície já são suficientes para provocar excentricidade pelo carregamento desuniforme e, conseqüentemente, uma diminuição da resistência final, como demonstra a Figura 1 (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).

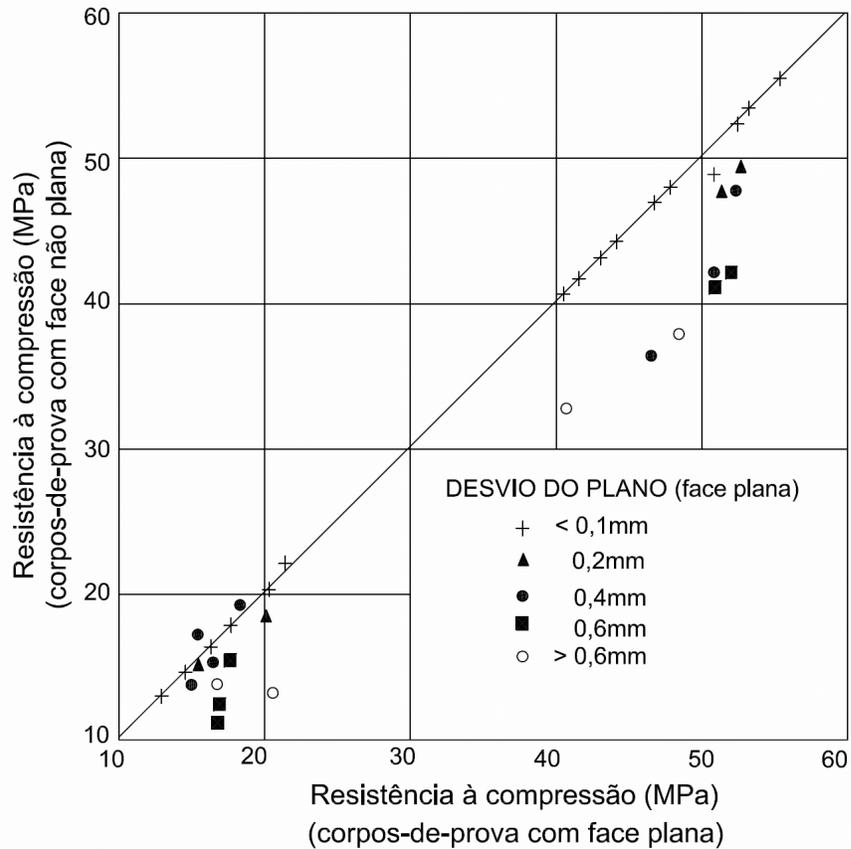


Figura 1 - Influência da planeza da superfície de carga de corpos-de-prova cúbicos de concreto sobre a resistência à compressão (adaptado de BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983)

A norma ASTM C 39 (ASTM, 2003) requer que as extremidades dos corpos-de-prova sejam retificadas ou capeadas de modo que as superfícies do carregamento sejam planas dentro de 0,05mm e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo-de-prova com desvio máximo de 0,5°.

Para garantir a distribuição uniforme de tensões quando as faces a serem comprimidas não estão planas existem, basicamente, três sistemas de regularização das bases dos corpos-de-prova:

- sistemas de capeamento colados;
- sistemas de capeamento não colados;
- sistemas de desgaste mecânico;

2.1.2.1. Sistemas de capeamento colados

Os sistemas de capeamento colados consistem no uso de materiais que formam uma camada regular que adere, fisicamente ou quimicamente, à superfície da base do corpo-de-prova.

Segundo a Norma Brasileira NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), o capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos-de-prova com uma fina camada de material apropriado, com as seguintes características:

- aderência ao corpo-de-prova;
- compatibilidade química com o concreto;
- fluidez, no momento de sua aplicação;
- acabamento liso e plano após endurecimento;
- resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

Em caso de dúvida, a adequabilidade do material de capeamento utilizado deve ser testada por uma comparação estatística, com resultados obtidos de corpos-de-prova cujos topos foram preparados por retificação.

A NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a) cita que:

- deve ser utilizado um dispositivo auxiliar, denominado capeador, que garanta a perpendicularidade da superfície obtida com a geratriz do corpo-de-prova;
- a superfície resultante deve ser lisa, isenta de riscos ou vazios e não ter falhas de planicidade superiores a 0,05mm em qualquer ponto;
- a espessura da camada de capeamento não deve exceder 3mm em cada topo.

Outros processos podem ser adotados, desde que estes sejam submetidos à avaliação prévia por comparação estatística, com resultados obtidos de corpos-de-prova capeados por processo tradicional, e os resultados obtidos apresentem-se compatíveis com este processo.

A Norma Mercosul NM 77:96 (CMN, 1996) e a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a) estabelecem que a preparação das bases de corpos-de-prova cilíndricos de concreto fresco deve ser realizada com pasta ou argamassa de cimento e a preparação dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto endurecido e dos testemunhos cilíndricos de estruturas de concreto deve ser realizada com argamassas de enxofre ou por processo de desgaste mecânico, com disco diamantado.

SCANDIUZZI E ANDRIOLO (1986) alcançaram resistências à compressão maiores e variações menores dos resultados nos ensaios que utilizaram capeamento com enxofre, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Influência do capeamento na resistência da argamassa (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986)

Valores	Cimento	Resistência à compressão					
		3 dias		7 dias		28 dias	
		Tipo de capeamento					
		Mistura Enxofre *	Pasta de Cimento **	Mistura Enxofre *	Pasta de Cimento **	Mistura Enxofre *	Pasta de Cimento **
Média (MPa)	A***	20,8	18,7	25,7	22,9	34,1	29,2
Coefficiente de variação (%)		1,2	6,8	2,0	4,3	1,6	9,8
Média (MPa)	B****	12,4	11,7	20,4	18,7	37,3	35,8
Coefficiente de variação (%)		2,0	4,3	2,1	5,5	2,2	4,4

* Enxofre 67,5% e 32,5% de areia quartzosa com finura Blaine 2.000 cm²/g;

** Pasta de consistência normal;

*** Composição do Cimento A: Clínquer (88,4%), Escoria (11,3%), Calcário (0,1%), Gesso (0,2%).
Valor médio de massa específica: Xilol (xileno) - 3,08 g/cm³ e Querosene 3,07 g/cm³.

**** Composição do Cimento B: Clínquer (47,1%), Escoria (52,2%), Calcário (0,4%), Gesso (0,3%).
Valor médio de massa específica: Xilol (xileno) - 3,06 g/cm³ e Querosene 3,05 g/cm³.

BUCHER e RODRIGUES FILHO (1983) chegaram às seguintes conclusões sobre as propriedades do material para capeamento:

- tanto a resistência mecânica como o módulo de elasticidade devem ser iguais ou superiores ao dos corpos-de-prova no instante do ensaio;
- o capeamento deve, em curto espaço de tempo, desenvolver elevadas resistências à compressão, de forma a que no caso de danos sofridos na camada momentos antes do ensaio ou para o remate de testemunhos recém-chegados ao laboratório para ensaio, possa o mesmo ser rapidamente aplicado sem interferir na idade do ensaio;
- a espessura da camada de capeamento deve ser a menor possível e de no máximo 3mm;
- o material deve ter uma boa aderência com a superfície da argamassa e/ou concreto;
- o material deve ser homogêneo e isotrópico;
- tanto as condições de aplicação do capeamento, como o próprio material utilizado, não devem afetar sensivelmente as propriedades do corpo-de-prova;
- a manipulação deve ser simples e segura, do ponto de vista do ensaio;
- o custo de processo de capeamento deve ser o menor possível, considerando mão-de-obra, aparelhagem, material, etc.

2.1.2.1.1. Capeamento com pasta ou argamassa de cimento

Segundo a NBR 5738/2003 (ABNT, 2003a), antes de ensaiar os corpos-de-prova, é imprescindível preparar suas bases, de modo que se tornem superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo-de-prova. Ainda segundo a norma,

poderá ser feito um procedimento opcional de remate com pasta de cimento, que consiste em:

- a) Decorridas 6h às 15h do momento da moldagem, passar uma escova de aço sobre o topo do corpo-de-prova e rematá-lo com uma fina camada de pasta de cimento consistente, com espessura menor ou igual a 3mm;
- b) A pasta deve ser preparada cerca de 2h às 4h antes de seu emprego;
- c) O acabamento dos topos dos corpos-de-prova deve ser feito com o auxílio de uma placa de vidro plana, com no mínimo 12mm de espessura e dimensões que ultrapassem em pelo menos 25mm a dimensão transversal do molde;
- d) A pasta de cimento colocada sobre o topo do corpo-de-prova deve ser trabalhada com a placa até que a face inferior desta fique em contato firme com a borda superior do molde em todos os pontos;
- e) A aderência da pasta à placa de capeamento deve ser evitada, lubrificando-se esta última com uma fina película de óleo mineral;
- f) A placa deve permanecer sobre o topo do corpo-de-prova até a desforma.

Os corpos-de-prova que não tiverem sido rematados devem ser capeados ou retificados.

A NM 77:96 (CMN, 1996) diz que as bases devem ser preparadas com uma camada de pasta ou argamassa de cimento portland, que é colocada geralmente de 2h às 4h após a moldagem dos corpos-de-prova, que deve ser preparada 2h às 4h antes do seu emprego. Especifica que a pasta de cimento de consistência adequada é obtida normalmente com uma relação água/cimento da ordem de 0,32 a 0,36 (em massa) com cimento portland comum e 0,35 a 0,39 com cimento portland de alta resistência inicial. Já a argamassa de cimento deve ter dosagem de 1:1 em massa, com areia que passe pela peneira 300 μ m e fique retida na peneira 150 μ m, com relação água/cimento da ordem de 0,38.

2.1.2.1.2. Capeamento com enxofre

Segundo BUCHER e RODRIGUES FILHO (1983), o capeamento com uma mistura de enxofre com filler inerte, aplicada em estado líquido (fundida) tem sido utilizado desde o final da década de 20 pela facilidade de aplicação, embora seu manuseio seja perigoso, exigindo precauções quanto à segurança.

Atualmente, tem-se utilizado somente o enxofre sem adições em estado líquido (fundido) para o capeamento.

O uso do enxofre como material de capeamento tem como vantagens o endurecimento rápido, alta produtividade no tocante a número de unidades capeadas num determinado período de tempo, boa aderência e elevada resistência à compressão às primeiras horas de idade (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).

A NM 77:96 (CMN, 1996) prevê a preparação de bases de corpos-de-prova de concreto endurecido em cura úmida ou curado ao ar com argamassa de enxofre. Recomenda-se corte com disco diamantado quando os corpos-de-prova de concreto apresentarem uma base muito irregular e não possa realizar o capeamento com argamassa de enxofre, de forma a obter uma superfície perfeitamente plana, que permita realizar o ensaio de compressão.

A NM 77:96 (CMN, 1996), recomenda que a resistência à compressão da argamassa de enxofre seja superior a 34,5MPa após 2h a sua moldagem, e permite que qualquer material seja utilizado para preparar as bases, desde que a espessura da camada seja no mínimo 3mm e em nenhum ponto da superfície exceda a 8 mm. Cita, ainda, que o material de capeamento não deve fluir nem fraturar durante o ensaio dos corpos-de-prova e deve apresentar resistência à compressão e módulo de elasticidade superiores ao do concreto a ser ensaiado. A norma recomenda a seguinte dosagem aproximada em massa para a argamassa de enxofre:

- 75% de enxofre;
- 5% de grafite;

- 20% de material inerte.

Para garantir que o capeamento com enxofre fundido atenda os quesitos de espessura da camada, perpendicularidade da face com o eixo longitudinal do corpo-de-prova e obtenha superfície perfeitamente plana, é utilizado um capeador de enxofre, que é composto pelo gabarito capeador e prato de capeamento, que podem ser vistos na Figura 2.

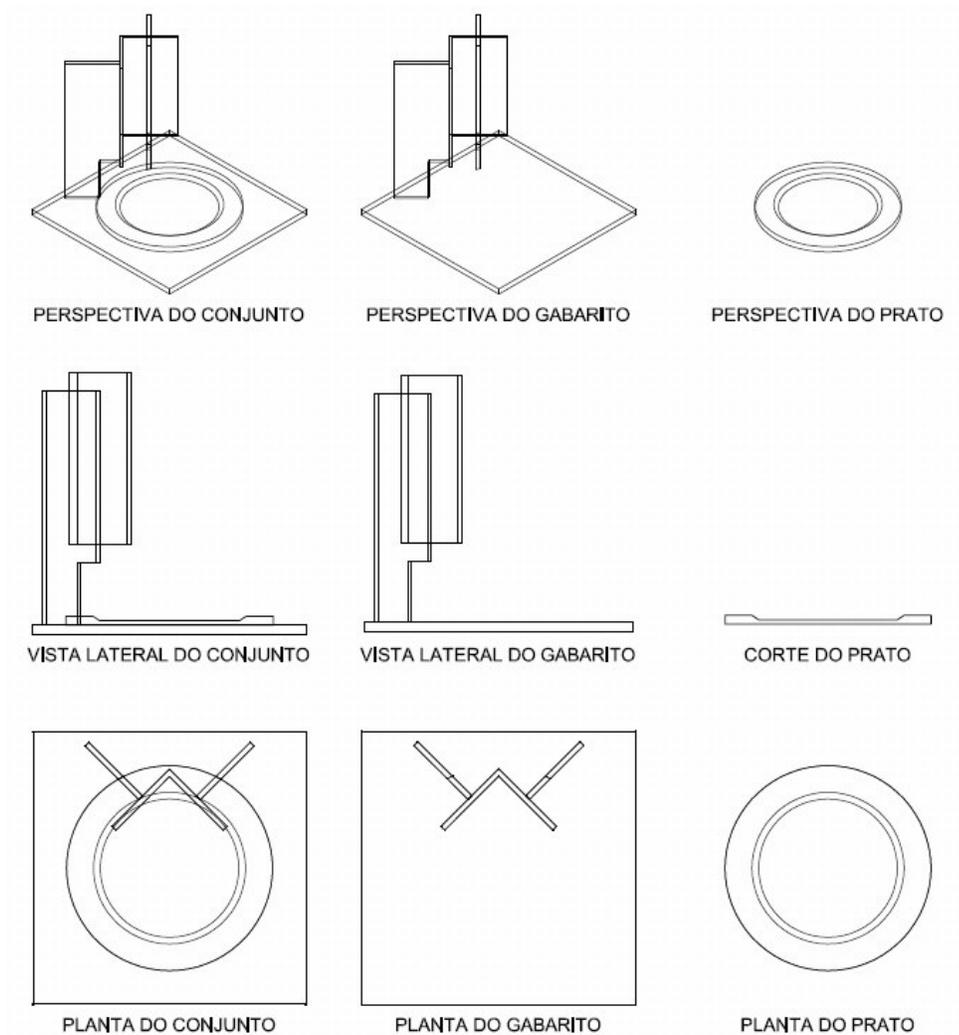


Figura 2 - Capeador de enxofre para corpos-de-prova de concreto

Ainda segundo a NM 77:96 (CMN, 1996), a argamassa de enxofre deve ser formada por uma mistura de enxofre, grafite e material granuloso que passe pela peneira

150 μ m devendo desenvolver, na ocasião do ensaio, resistência à compressão superior a resistência prevista para o corpo-de-prova a ser ensaiado.

A norma ASTM C 617 (ASTM, 1998), prevê a preparação da argamassa de enxofre no mínimo 2h antes do ensaio para concretos com resistência menor que 35MPa. Para concretos com resistência igual ou superior a 35MPa, o capeamento de argamassa de enxofre deve ser preparado pelo menos 16h antes do ensaio. Quando corpos-de-prova de concretos de alta resistência são capeados, a espessura e a resistência do capeamento são mais importantes do que para concretos normais. Um capeamento uniforme a uma espessura de 2mm ou menos se faz necessário para concretos de alta resistência. Espessuras de capeamentos maiores resultam em resistências à compressão menores dos corpos-de-prova (ACI, 1998).

A NBR 7215/1996 (ABNT, 1996), que trata a determinação de resistência a compressão de cimentos portland, diz que o material para capeamento deve ser preparado fundindo-se enxofre com caulim, pozolanas, quartzo em pó ou outras substâncias, em proporções tais que não interfiram no resultado do ensaio. Os corpos-de-prova devem ser capeados com a mistura de enxofre a quente, de maneira que a camada formada em cada extremidade satisfaça às condições geométricas e apresente espessura máxima de 2mm.

Usualmente compostos comuns de enxofre alcançam resistências à compressão em cubo de 50mm não menor que 35MPa, sendo possível encontrar compostos de altas resistências chegando a resistências de 70MPa (MARCO; REGINATTO e JACOSKI, 2003; ACI, 1998). Argamassas de enxofre com resistência variando de 55 e 70MPa são capazes de capearem corpos-de-prova de concretos de até 70MPa sem haver grandes variações nos resultados. Para concretos de resistência superior a 70MPa os resultados encontrados variam muito (ROSENBAUM, 1990 apud ACI, 1998)

A determinação da resistência à compressão em um cubo de 50mm se passa em condições de ensaio diferentes dos compostos de capeamento dentro de uma camada fina (2mm a 3mm) que é comprimida entre o corpo-de-prova e os pratos da prensa de ensaio. No capeamento fino, o composto de enxofre é comprimido num estado confinado e sabe-se que materiais confinados exibem resistência à

compressão aparente muito maior do que os não confinados (LESSARD e AÏTCIN, 1992 apud MARCO; REGINATTO e JACOSKI, 2003; ACI, 1998), conforme se vê na Figura 3.

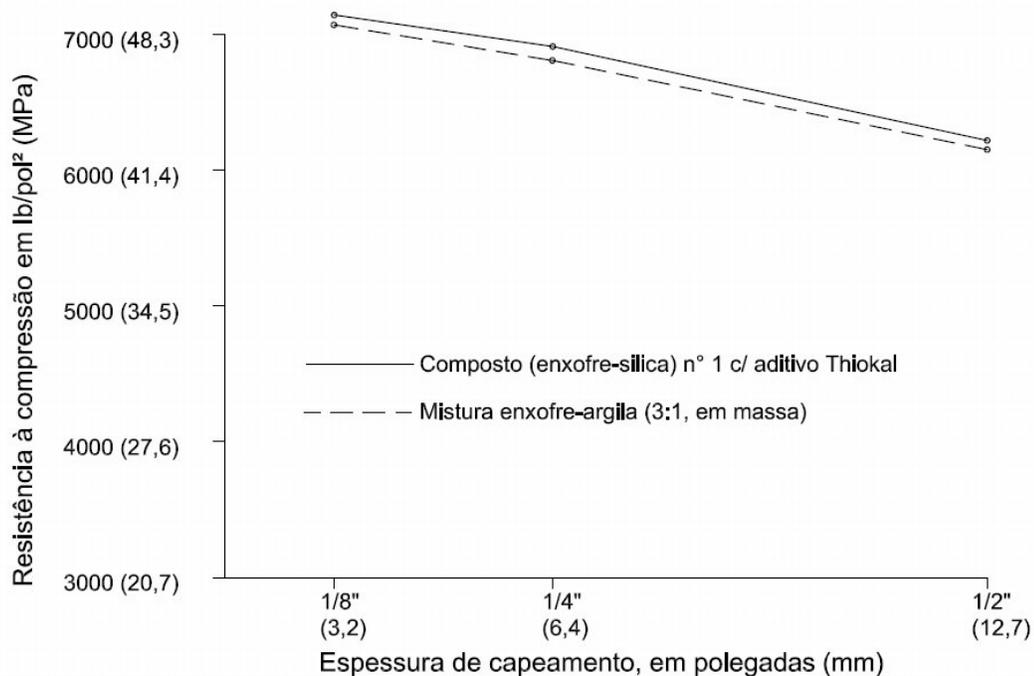


Figura 3 - Influência da espessura do capeamento sobre a resistência à compressão (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983)

A grande desvantagem do capeamento com argamassa de enxofre é a liberação do gás sulfídrico durante a fusão do enxofre em pó quando contaminado com materiais orgânicos, como parafina ou óleo. Em concentrações elevadas é letal. É aconselhável que o recipiente de derretimento esteja dentro de uma capela de exaustão com as emanações esgotadas fora do ambiente para impedir o acúmulo do gás (UDOT/TTQP, 2005; ASTM, 1998). O risco de inalação do gás dióxido de enxofre (SO₂) que formado como produto da combustão é altamente tóxico e irritante para as mucosas das vias respiratórias. Os sintomas da inalação do SO₂ vão de uma simples tosse até a morte. Esse gás é perigoso porque, ao se combinar com a água e com o oxigênio, forma ácido sulfúrico. Esta reação química é $SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O = H_2SO_4$, a mesma que acontece nas nuvens, quando se forma a chuva ácida. Na fusão do enxofre devido às impurezas de hidrocarbonetos, é liberado gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H₂S) somente gerado em

temperaturas acima de 120°C, que é altamente tóxico mesmo em baixas concentrações. É um gás incolor, forma mistura explosiva com o ar, altamente tóxico, possui cheiro de ovo podre em baixas concentrações e inibe o olfato em concentrações elevadas.

2.1.2.2. Sistemas de capeamento não colados

O sistema de capeamento não colado ou não aderente ao concreto consiste no uso de um material como almofada para bases do corpo-de-prova, podendo ser confinado ou não. Atualmente os materiais mais utilizados são os elastômeros, principalmente o neoprene, mas também podem ser usados areias e outros materiais.

Segundo BUCHER e RODRIGUES FILHO (1983), uma maneira de evitar a execução dos capeamentos colados foi idealizada mediante o uso de lâminas de papelão, chumbo ou borracha, interpostas entre os pratos da máquina e as faces dos corpos-de-prova, que foram utilizadas durante certa época. No entanto essas lâminas possuem baixa resistência ou escoam sob carga, produzindo tensões de tração tangenciais que fazem com que os corpos-de-prova rompam pela combinação de tração e compressão com a conseqüente queda acentuada da resistência à compressão, estas deixaram de ser usadas.

Ainda segundo BUCHER e RODRIGUES FILHO (1983), também já foram usados como capeamento leitos confinados de areia de granulometria entre 0,84 e 0,60mm desenvolvidos na década de 20, mas eram satisfatórios somente para concretos de até 25MPa de resistência.

A Figura 4 mostra detalhes dos capeamentos com almofada polimérica e areia.

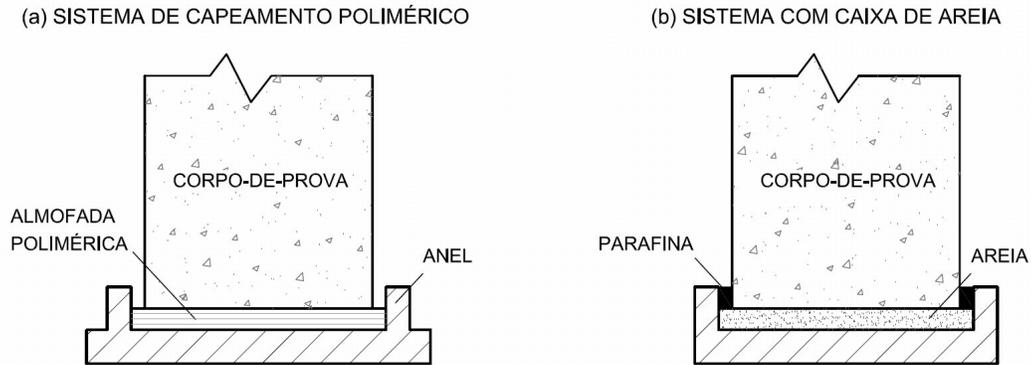


Figura 4 - Sistemas de capeamento não colado

(a) almofada polimérica restringida por anel de metal, e (b) areia em container rígido de metal (BOULAY e DE LARRARD 1993; BOULAY, 1996)

2.1.2.2.1. Capeamento com almofadas elastoméricas

O capeamento com almofadas elastoméricas está sendo amplamente utilizado no Brasil e no mundo, mas ainda existem poucos estudos a respeito do seu emprego.

O principal elastômero pesquisado e utilizado no ensaio de resistência à compressão é o Policloroprene, comercialmente conhecido como Neoprene.

2.1.2.2.1.1. Neoprene não confinado

O capeamento com almofadas de neoprene não confinado foi estudado por alguns autores. MARCO; REGINATTO e JACOSKI (2003) perceberam disparidade e inconsistência dos resultados obtidos com o capeamento de neoprene não confinado em relação ao capeamento de enxofre.

Isso ocorre devido ao fato que não confinado a almofada de neoprene deforma-se radialmente mais que o corpo-de-prova ensaiado, gerando forças de tração na base dos corpos-de-prova, conforme demonstrado na Figura 5.

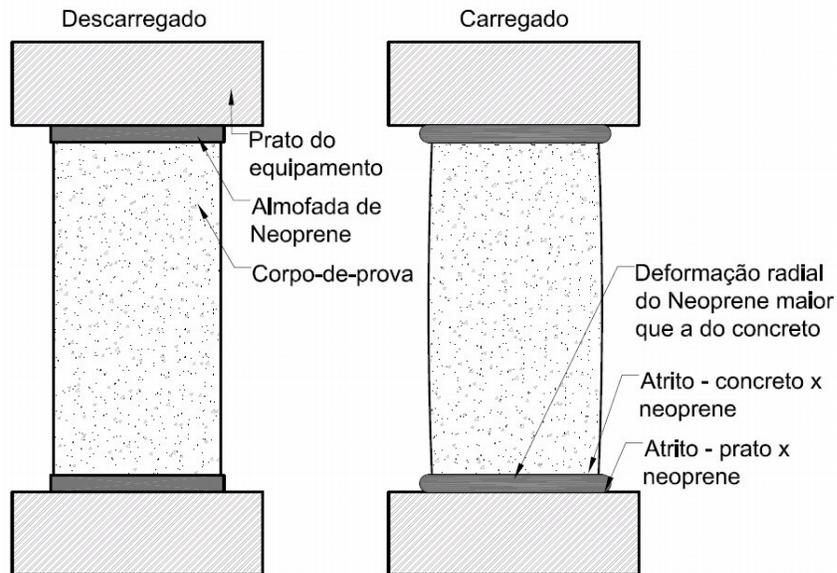


Figura 5 - Capeamento com almofadas de neoprene não confinado

2.1.2.2.1.2. Neoprene confinado

O capeamento elastomérico, usualmente, é utilizado confinado por uma base metálica. A função da base metálica, reforço metálico ou anel de retenção é restringir a deformação lateral do elastômero.

As almofadas elastoméricas deformam-se no carregamento inicial para conformar-se às extremidades do corpo-de-prova e são contidas da propagação excessiva da lateral por placas e anéis de metal que garantem uma distribuição uniforme da carga aplicada pelo equipamento de ensaio (ASTM, 2000).

Segundo a ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), os capeamentos não colados não devem ser usados para ensaios de aceitação de concretos com resistências abaixo de 10 MPa ou acima de 85 MPa.

Apesar da ASTM C 1231/C 1231M não recomendar, os sistemas de capeamento não colados, compostos de almofadas poliméricas confinadas, foram usados com sucesso com concretos de alta resistência de até 130MPa (PISTILLI e WILLEMS, 1993 apud ACI, 1998).

O capeamento com almofadas de neoprene confinadas é composto por um par de almofadas e um par de bases metálicas com anel que envolve a almofada de neoprene (Figura 6).



Figura 6 - Capeador elastomérico - Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene

Este conjunto é chamado de capeador elastomérico e pode ser reutilizado. Segundo VIEIRA (1991), a base metálica é reaproveitada e a borracha tem um período de utilização de até 1.000 (mil) vezes, portanto, sendo a parte descartável do sistema. Ainda segundo VIEIRA (1991), devem ser tomados alguns cuidados, como a borracha não deve ser invertida dentro da base metálica e caso a borracha apresente excessivo desgaste nas bordas, deve ser trocada imediatamente.

A ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), prevê o uso do neoprene como almofada de capeamento elastomérico dentro das condições da Tabela 6 e com espessura de 13 ± 2 mm. O diâmetro da almofada de neoprene não deve ser mais que 2mm menor que o anel de retenção.

Tabela 6 - Condições para o uso de almofadas de policlороprene - Neoprene (Adaptado de ASTM, 2000)

Resistência à compressão do corpo-de-prova (MPa)	Dureza Shore A	Teste de qualificação	Número máximo de reuso
10 a 40	50	Não	100
17 a 50	60	Não	100
28 a 50	70	Não	100
50 a 80	70	Necessário	50
Acima de 80	-	Não permitido	-

É válido ressaltar que segundo a ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), desníveis transversais ao diâmetro das bases dos corpos-de-prova não devem exceder 5mm. Se as extremidades do cilindro não se enquadrarem nesta tolerância, o corpo-de-prova não deve ser testado a menos que as irregularidades sejam corrigidas por corte ou retifica.

A ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), restringe a cavidade no reforço metálico a uma profundidade de pelo menos duas vezes a espessura da almofada. O diâmetro interno dos anéis de retenção não será menos de 102% ou no máximo 107% do diâmetro do corpo-de-prova. As bases do reforço metálico que contatam os pratos da máquina de ensaios serão planas com no máximo 0,05mm de desnível.

É válido ressaltar que a NBR 7456/1982 - Plástico - Determinação da dureza Shore (ABNT,1982), diz que o corpo-de-prova deve ter pelo menos 5mm de espessura para determinação da dureza Shore A, e pelo menos 3mm para a determinação da dureza Shore D.

Um corpo-de-prova pode ser composto por camadas mais finas para se obter a espessura requerida, porém, a determinação feita sobre o mesmo não pode ser comparada com aquela feita sobre um corpo-de-prova constituído de uma só peça vista que as superfícies entre as camadas podem não estar em contato completo. As dimensões do corpo-de-prova devem ser tais que permitam efetuar medidas a pelo menos 12mm de cada borda, exceto se for reconhecido que resultados idênticos são obtidos em medidas efetuadas a distâncias menores (ABNT,1982).

A superfície do corpo-de-prova deve ser plana, colocado sobre uma superfície que permita à base de pressão tomar apoio sobre o corpo-de-prova, em uma superfície que possua um raio de pelo menos 6mm ao redor da ponta do penetrador. Determinações satisfatórias de dureza por meio de um durômetro não podem ser efetuadas sobre superfícies arredondadas, irregulares ou rugosas (ABNT,1982).

MARCO; REGINATTO e JACOSKI (2003) obtiveram os seguintes resultados no ensaio de resistência à compressão com alguns tipos de capeamento para um concreto dosado de F_{ck} 20MPa, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios à compressão de concreto (adaptado de MARCO; REGINATTO e JACOSKI, 2003)

Lote	Capeamento c/ neoprene confinado (MPa)	Capeamento c/ neoprene confinado (MPa)	Capeamento c/ pasta de cimento (MPa)	Capeamento c/ enxofre (MPa)
1	16,38	22,60	19,71	24,45
2	18,49	23,59	19,01	24,44
3	16,44	23,70	20,21	24,86
4	11,53	25,60	19,89	25,51
5	12,69	25,79	18,89	25,36
6	16,93	24,60	19,63	25,37
7	18,01	24,30	19,65	25,44
8	18,53	22,07	21,06	25,64
9	17,03	24,73	20,58	25,81
10	16,39	24,11	18,76	27,6
11	16,41	23,77	19,65	24,46
Média	16,26	24,08	19,73	25,36
Desvio Padrão	2,22	1,13	0,70	0,90

Deve-se tomar cuidado com os corpos-de-prova ensaiados com capeamentos elastoméricos, pois a ruptura é mais violenta comparada com os ensaiados com capeamentos colados e devem ser tomadas precauções para evitar ferimento ao pessoal do laboratório (UDOT/TTQP, 2003; ASTM, 2000; ACI, 1998), devido ao fato dos capeamentos elastoméricos absorverem mais energia de deformação.

Alguns fabricantes recomendam espanar as almofadas e extremidades dos corpos-de-prova com amido de milho ou talco antes do ensaio (ASTM, 2000).

2.1.2.2. Capeamento com almofadas de areia

Uma alternativa de capeamento não colado é usando a areia seca; que foi introduzido na França (BOULAY e DE LARRARD, 1993; BOULAY,1996; ACI, 1998). Este capeamento é conhecido como *Sand box*. Procedimentos similares foram explorados nos Estados Unidos na década de 20 (CARINO et al., 1994 apud ACI, 1998). Um molde de aço é usado para prender a areia seca. O corpo-de-prova é posicionado na areia usando um gabarito similar àquele usado para capear com o enxofre. A areia é vibrada e parafina derretida é derramada em torno do cilindro para manter a areia dentro lugar quando a outra extremidade for preparada em uma forma similar. Na Figura 7 é mostrado um esquema do capeamento com almofada de areia.

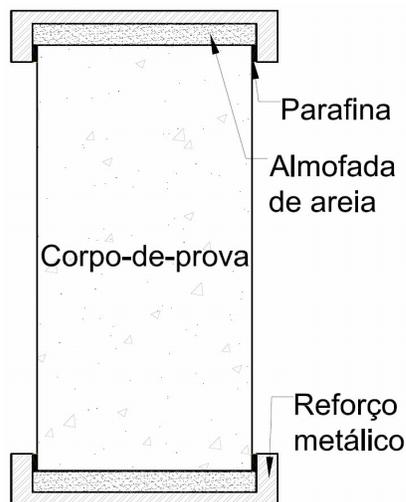


Figura 7 - Capeamento com almofada de areia

A resistência à compressão dos corpos-de-prova testados usando o sistema da caixa de areia foi de 0 a 5% mais baixa do que corpos-de-prova retificado, dependendo do nível de resistência. O método foi adotado como um padrão na França (ACI, 1998).

2.1.2.3. Sistemas de desgaste mecânico - Retificação

Consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo a ser preparado. Esta operação é normalmente executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade, com a utilização de ferramentas abrasivas. A retificação deve ser feita de tal forma que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos. As falhas de planicidade em qualquer ponto da superfície obtida, não devem ser superiores a 0,05mm (ABNT, 2003a).

A NM 77:96 (CMN, 1996), diz que quando os corpos-de-prova de concreto apresentar em uma base muito irregular e não se possa realizar o capeamento com argamassa de enxofre, deve-se proceder ao corte com disco diamantado, de forma a obter uma superfície perfeitamente plana, que permita realizar o ensaio de compressão.

O investimento inicial e o custo de operação dos equipamentos de retifica, geralmente, são muito altos em comparação com os demais sistemas de capeamento, desta forma restringindo seu uso.

2.1.2.4. Sistema de moldes especiais

Atualmente, no Brasil, o molde mais utilizado na confecção de corpos-de-prova é o de aço, mas existem outros materiais sendo utilizados como matéria-prima dos moldes, como papelão e plástico (PVC ou PEAD).

O tipo de material do molde, a habilidade de manter sua forma e sua impermeabilidade pode ter um efeito significativo na resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto. A consolidação é mais eficaz com moldes rígidos. Moldes rígidos de plástico com espessuras de parede de 6mm ou maior foram usados com sucesso para o concretos de 70MPa (FORSTIE e SCHNORMEIR, 1981 apud ACI, 1998). Moldes de plástico com espessura de parede menor que 6mm devem ter um tampão para manter uma forma circular. Os tampões com fechamento

apropriado também podem ser usados para minimizar perda de água. Em todos os casos a perda da umidade deve ser impedida. Quanto aos moldes de papelão, mesmo os de alta qualidade, produzem resultados de resistência à compressão aproximadamente treze por cento mais baixos do que quando os moldes de aço são usados (BLICK, 1973 apud ACI, 1998). Conseqüentemente, os moldes de papelão não são recomendados (ACI, 1998).

ROCHA (2002) um novo sistema de moldagem desenvolvido que utiliza um molde fabricado com resinas de engenharia de alto desempenho, proporcionando grande resistência ao impacto e durabilidade. Este consiste em dois meio-troncos, duas tampas e duas canaletas de fixação que tem o intuito de obter um molde cilíndrico com desvios dimensionais inferiores aos previstos por norma.

O sistema de moldes de resina descrito por ROCHA (2002) possui as seguintes etapas:

- a) lubrificação das partes que ficarão em contato com o concreto e toda a área interna do molde;
- b) montagem do molde, através da justaposição dos meio-troncos, colocação de uma das tampas e das duas canaletas;
- c) a moldagem deve ser feita de acordo com a norma vigente;
- d) após a moldagem a segunda tampa deve ser colocada, certificando-se de que entrou completamente no tronco;
- e) logo após, o molde deve ser colocado na posição horizontal até o endurecimento total do concreto.

Segundo ROCHA (2002), uma das grandes vantagens deste sistema de moldagem é o fato dele permitir o retorno imediato do molde recém preenchido diretamente ao laboratório, devido à estanqueidade do molde, o que impossibilita perda de concreto do seu interior. Outro ponto citado pelo autor é que o molde funciona como processo de cura, pois impossibilita a perda de água para o meio externo.

A principal vantagem deste sistema de moldagem é a possibilidade de ensaiar o corpo-de-prova diretamente em contato com os pratos da prensa hidráulica, sem a necessidade de qualquer tipo de capeamento ou retifica superficial, uma vez que o sistema, por curar o corpo-de-prova na posição horizontal, é capaz de fornecer planicidade suficiente as ambas às faces.

ROCHA (2002) apresentou um estudo comparativo entre a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro por 200mm de altura moldados com o molde de resina e de corpos-de-prova cilíndricos moldados com moldes convencionais de aço capeados com enxofre. Foram confeccionados três traços conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Traços utilizados no estudo comparativo do molde de resina x molde de aço com capeamento de enxofre (ROCHA, 2002)

	Traço 1	Traço 2	Traço3
Abatimento (mm)	50	100	200
Fator água/cimento	0,975	0,677	0,294
Cimento (kg)	200	300	500
Areia média artificial gnaisse (kg)	830	713	799
Brita 1 (25 mm) (kg)	1128	1138	1046
Água (litros)	195	203	147
Aditivo plastificante (ml)	500	750	-
Aditivo Superplastificante (ml)	-	-	7500

Os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados no molde de resina, obtidos pelo rompimento dos mesmos sem qualquer tipo de capeamento, foram muito semelhantes aos resultados de corpos-de-prova moldados pelo processo convencional, e capeados com enxofre, porém com desvios padrão menores, conforme Tabela 9 (ROCHA, 2002).

Tabela 9 - Resultados dos testes de resistência à compressão em MPa (ROCHA, 2002)

Molde	Traço 1 (MPa)		Traço 2 (MPa)		Traço 3 (MPa)	
	Aço	Resina	Aço	Resina	Aço	Resina
3 dias	10,5	11,6	14,0	16,5	43,0	40,5
	12,0	11,9	15,1	15,8	40,5	42,0
	11,7	11,1	14,9	15,8	41,9	39,9
Média	11,4	11,5	14,7	16,0	41,8	40,8
Desvio padrão	0,8	0,4	0,6	0,4	1,3	1,1
7 dias	15,5	15,8	22,8	22,7	53,0	56,5
	15,4	16,0	24,1	22,9	57,5	58,0
	16,5	15,5	23,0	23,3	56,5	62,0
Média	15,8	15,8	23,3	23,0	55,7	58,8
Desvio padrão	0,6	0,3	0,7	0,3	2,4	2,8
28 dias	20,1	22,5	30,1	30,5	66,7	67,5
	19,5	20,7	29,5	31,5	71,0	69,0
	21,7	20,3	31,0	30,6	68,9	69,0
Média	20,4	21,2	30,2	30,9	68,9	67,5
Desvio padrão	1,1	1,2	0,8	0,6	2,2	1,5

Nova versão do novo sistema de moldagem foi desenvolvida e consiste em dois meio-troncos com fundo que são unidos por meio de parafusos com porcas-borboletas e uma tampa, conforme pode ser visto na Figura 8.



Figura 8 - Nova versão do novo sistema de moldes em resina

É válido ressaltar que o objetivo principal do novo sistema de moldes em resina é garantir uma boa moldagem e garantir maior proteção para os corpos-de-prova. Esta nova versão aparentemente é bem mais prática que a versão antiga, mas ainda está em fase de desenvolvimento no que diz respeito à eliminação do capeamento. Para isso estão sendo utilizados discos planos nas duas extremidades do molde.

2.1.3. Variáveis inerentes ao ensaio

Como já foi dito anteriormente, existem variáveis inerentes ao ensaio que influenciam nos resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto, como a velocidade de carregamento e rigidez do equipamento.

2.1.3.1. Velocidade da aplicação de carga

Quanto mais lentamente aumenta a tensão aplicada tanto menor será a resistência, pelo menos dentro do intervalo de tempo que vulgarmente se considera nos ensaios

correntes do concreto, de alguns minutos ou horas. Segundo COUTINHO e GONÇALVES (1994) este resultado, que é uma propriedade geral dos materiais, deve-se ao aumento da deformação com o tempo, provocado pela fluência. Como geralmente a fluência ocorre em tempos bem superiores aos dos ensaios de resistência à compressão essa queda dos resultados pode-se ser relacionada à propagação de fissuras do material.

Segundo SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986), a aplicação da carga na execução do ensaio de compressão axial simples para concretos é feita a uma velocidade entre 0,15 a 0,35MPa/s, até a ruptura do corpo-de-prova, anotando-se o valor da carga máxima observada.

Para a determinação da resistência a compressão dos concretos, a NBR 5739/1994 (ABNT, 1994) estabelece que a carga de ensaio deva ser aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3MPa/s a 0,8MPa/s. Nenhum ajuste deve ser efetuado nos controles da máquina, quando o corpo-de-prova estiver se deformando rapidamente ao se aproximar de sua ruptura.

Para a determinação da resistência a compressão dos cimentos, a NBR 7215/1996 (ABNT, 1996), estabelece que a velocidade de carregamento da máquina de ensaio, ao transmitir a carga de compressão ao corpo-de-prova, deve ser equivalente a $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

No caso de máquinas comuns de laboratório, o intervalo prático de aplicação da tensão é de 0,07 a 0,7MPa/s e, dentro deste intervalo, a resistência varia apenas de 0,97 a 1,03 vezes a tensão de ruptura determinada com a velocidade de 0,2MPa/s. Mas se considerar uma variação entre 0,01 e 10MPa/s a resistência já pode ficar compreendida entre 0,88 e 1,12 vezes com esta tensão (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

2.1.3.2. Máquina de ensaio

Segundo a NBR 5739/1994 (ABNT, 1994), a estrutura de aplicação da carga deve ter capacidade compatível com os ensaios a serem realizados, permitindo a aplicação controlada de carga sobre o corpo-de-prova colocado entre os pratos de compressão. O prato que se desloca deve ter movimento na direção vertical, mantendo paralelismo com o eixo vertical da máquina. A máquina deve permitir o ajuste da distância entre os pratos de compressão antes do ensaio com deslocamentos que superem a altura do corpo-de-prova em, no mínimo, 5 mm. O ajuste pode ser feito através de um mecanismo da máquina, independente do sistema de aplicação de carga.

Para COUTINHO e GONÇALVES (1994), uma máquina para ensaios de compressão é fundamentalmente constituída por um êmbolo que recebe a ação de óleo sob pressão, dois pratos entre os quais se interpõe o corpo-de-prova a ensaiar e uma estrutura onde este conjunto está montado. Um dos pratos da prensa, quase sempre o superior, é munido de uma rótula esférica que lhe permite movimentos de rotação de modo a ajustar-se o mais perfeitamente possível à face do espécime, distribuindo a carga uniformemente.

Concretos com resistências à compressão superiores a 70MPa estão cada vez mais comuns. Os equipamentos de ensaio para corpos-de-prova cilíndricos de 150mm de diâmetro por 300mm de altura de concretos de 100MPa, por exemplo, necessitam aplicar um carregamento de 1.767KN sem influenciar nos ensaios, para isso a rigidez do equipamento torna-se essencial.

2.2. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade

Para muitos materiais da engenharia, tais como o aço, o comportamento observado tensão-deformação quando um espécime é sujeitado a um carregamento pode ser dividido em duas porções. Inicialmente, quando a deformação é proporcional a tensão aplicada e é reversível quando descarregado, é chamada deformação elástica. O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão e a

deformação elástica. Em materiais homogêneos, o módulo de elasticidade é uma medida das forças de ligações interatômicas e não é afetado por mudanças microestruturais. Isto não é verdadeiro dos materiais com mais de uma fase, heterogêneos, tais como o concreto. O módulo de elasticidade do concreto na compressão varia de 14 a 40GPa (MEHTA e MONTEIRO, 2001).

2.2.1. Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade estático para um material sob a tração ou a compressão uniaxial é dado pela inclinação da curva tensão-deformação (MEHTA e MONTEIRO, 2001).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2001), devido à curva para o concreto não ser linear existem três métodos usados para calcular o módulo, que são:

- módulo tangente dado pela inclinação de uma linha tangente à curva do gráfico tensão-deformação em qualquer momento na curva;
- módulo secante dado pela inclinação de uma linha extraída da origem a um ponto na curva que corresponde a 40% da carga de ruptura;
- módulo da corda é dado pela inclinação de uma linha extraída entre dois pontos na curva do tensão-deformação. Comparado ao módulo secante, em vez da origem a linha é extraída de um ponto que representa uma deformação longitudinal de 50 $\mu\text{m/m}$ ao ponto que corresponde a 40% da carga de ruptura;

A NBR 8522/2003 (ABNT, 2003b), define dois tipos de carregamento para a determinação de módulos de deformação, podendo ser obtido o módulo de deformação secante ou o módulo de elasticidade.

O módulo de deformação secante (E_{cs}): propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos seus pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão de 0,5MPa e à tensão considerada no ensaio (ABNT, 2003b).

O módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}): módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0,5MPa e 30% da resistência à compressão, para o carregamento estabelecido neste método de ensaio (ABNT, 2003b).

2.2.2. Módulo de elasticidade dinâmico

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2001), o módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma tensão instantânea muito pequena, e é dado aproximadamente pelo inicial tangente, que é o módulo tangente para uma linha extraída na origem. É, geralmente, 20, 30 e 40% mais elevado do que o módulo de elasticidade estático para concretos de elevada, média, e baixa resistência, respectivamente. Para a análise da resistência das estruturas sujeitas a terremotos ou impactos é mais apropriado usar o módulo de elasticidade dinâmico, que pode ser determinado mais exatamente por um teste sônico.

2.2.2.1. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante

Para a determinação do módulo de elasticidade por frequência ressonante o corpo-de-prova a ser testado é montado na bancada do equipamento como ilustrado na Figura 9. Um vibrador acústico é posicionado em um lado do corpo-de-prova e um acelerômetro é montado em outro lado. Um gerador dirige o vibrador acústico em uma frequência dada e a vibração do corpo-de-prova é medida pelo acelerômetro. A frequência do vibrador acústico é variada continuamente e a amplitude correspondente da vibração do espécime é monitorada. Quando o corpo-de-prova é dirigido em sua frequência ressonante, a amplitude da vibração do espécime está em seu máximo, permitindo que o material seja avaliado por suas propriedades elásticas (GERMANN INSTRUMENTS, 2007).

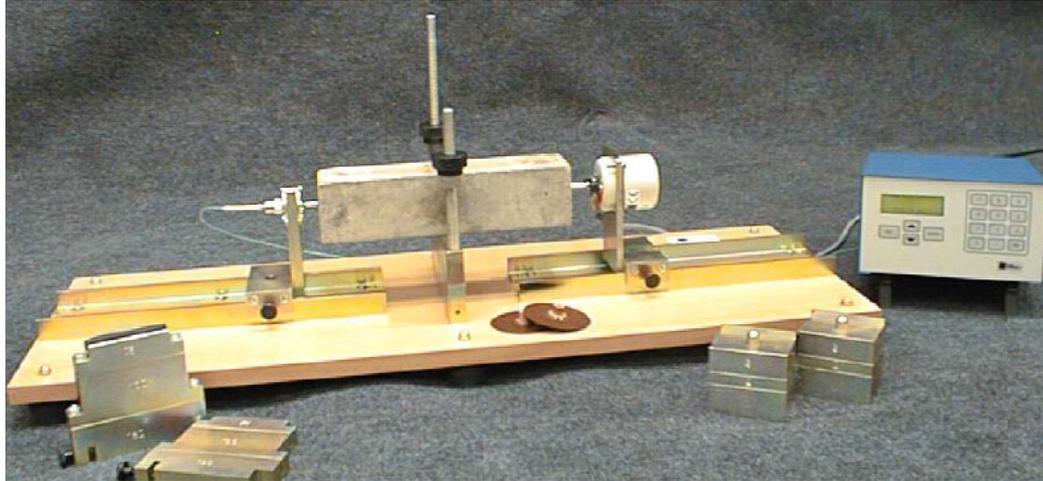


Figura 9 - Equipamento ERUDITE MKII para determinação do módulo de elasticidade dinâmico
(GERMANN INSTRUMENTS, 2007)

Na modalidade manual o controle preciso da tensão e da frequência da saída é obtido. Esta modalidade é usada normalmente para determinar a tensão correta ou a faixa das frequências para um espécime particular. É usada também para medir a frequência ressonante e o valor “Q” manualmente. Com a modalidade automática a frequência ressonante, as duas frequências 3dB e o valor “Q” são encontrados automaticamente. O usuário incorpora uma escala das frequências para varrer completamente. Se uma frequência ressonante for encontrada, esta está indicada com as duas frequências 3dB e o valor “Q” (GERMANN INSTRUMENTS, 2007 e CNS, 1995).

O valor “Q” é calculado a partir da frequência ressonante fundamental e das frequências em um e ou outro lado da frequência ressonante aonde a amplitude da vibração é 0,707 da amplitude máxima, conforme Figura 10.

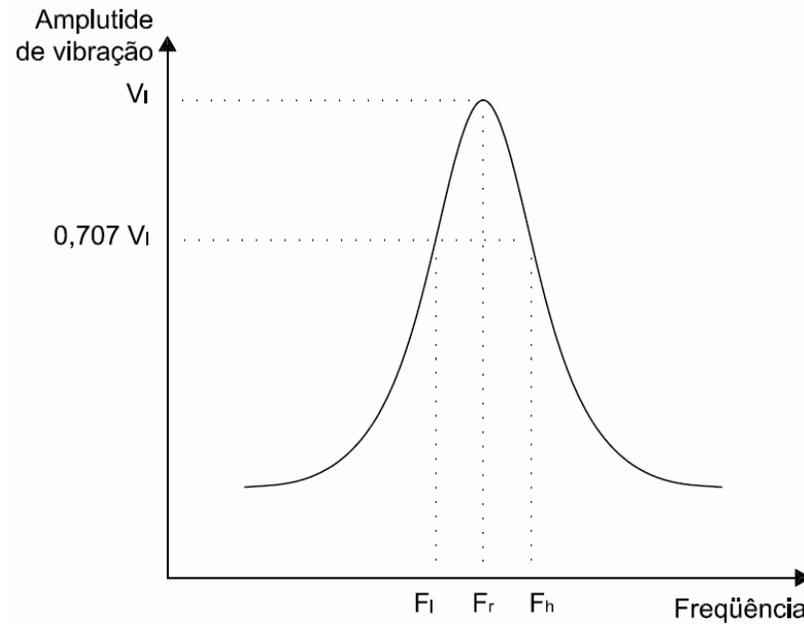


Figura 10 - Curva típica da amplitude de vibração pela frequência (CNS, 1995)

A partir da Equação 2 o valor “Q” pode ser calculado:

$$Q = \frac{F_r}{F_h - F_l} \quad (2)$$

Quanto mais próximo estiver o F_h e o F_l maior será o valor de “Q”, por exemplo na Figura 11, a curva em vermelho terá um valor para “Q” maior.

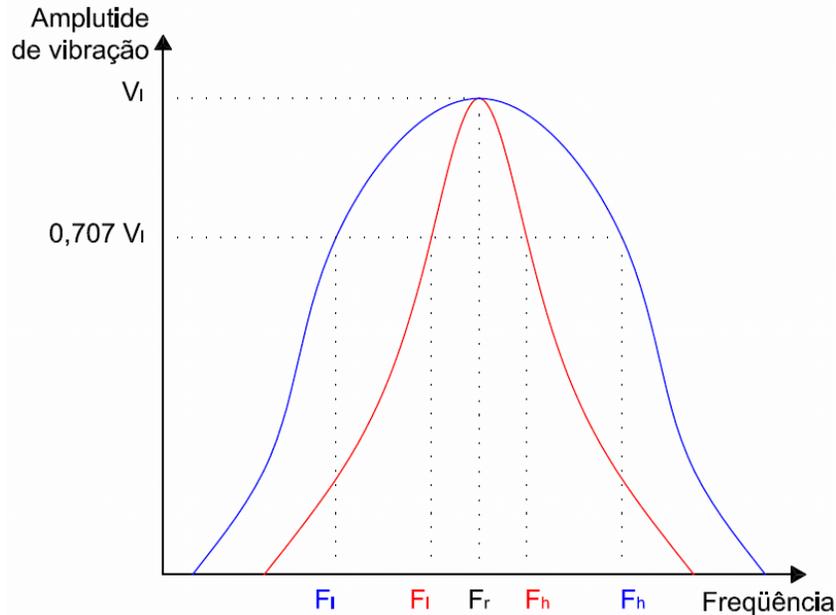


Figura 11 - Curvas da amplitude de vibração pela frequência (GERMANN INSTRUMENTS, 2007)

O valor “Q” indica à homogeneidade de uma amostra mais precisamente do que é o módulo de elasticidade dinâmico. As imperfeições pequenas no material tal como as micro-fissuras do concreto podem causar somente uma mudança pequena no módulo dinâmico, mas uma mudança relativamente grande no valor “Q” (GERMANN INSTRUMENTS, 2007 e CNS, 1995).

Mudando as condições de suporte do corpo-de-prova, a posição do vibrador acústico, e a posição do acelerômetro, o usuário pode medir as frequências ressonantes para a modalidade longitudinal, a modalidade transversal, e a modalidade de torção. Da massa e geometria do corpo de prova, e das frequências medidas, as equações dadas em ASTM C 215 são usadas para computar as propriedades elásticas dinâmicas. Na instalação da Figura 9, o corpo-de-prova está vibrando na modalidade longitudinal e o valor do módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}) pode ser determinado com a Equação 3 (GERMANN INSTRUMENTS, 2007 e ASTM, 2002).

$$E_{dyn} = D m (n')^2 \quad (3)$$

Onde,

D → depende da geometria; = 5,093 (L/d²), N.s² (kg.m²) para cilindro
= 4 (L/bt), N.s² / (kg.m²) para prisma

m → massa;

n' → frequência longitudinal fundamental;

Segundo o manual de operação do equipamento ERUDITE MKII (CNS, 1995), o módulo de elasticidade dinâmico (E_D) para modo longitudinal em MN/m² é dado pela Equação 4.

$$E_D = 4n^2l^2\rho \times 10^{-12} \quad (4)$$

Onde,

l = comprimento do corpo-de-prova em mm;

n = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz;

ρ = densidade em Kg/m³.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consistiu em submeter corpos-de-prova de concreto, cujas superfícies planas foram regularizadas de modos diferentes, a ensaios de compressão e módulo de elasticidade. Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados no presente trabalho. Na primeira parte se descrevem os materiais utilizados tanto para a confecção do concreto como dos materiais de capeamento. Em seguida é apresentado o procedimento experimental. Por último é descrita a simulação computacional utilizada

3.1. Materiais

3.1.1. Materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova

O presente trabalho contou com uma fase experimental composta pela confecção, cura e ensaios laboratoriais de corpos-de-prova de concreto. Inicialmente foram confeccionados dois traços com os materiais apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Descrição dos materiais utilizados para confecção dos traços 1 e 2

Materiais	Descrição	Massa específica M.E. (Kg/dm ³)	Massa unitária M.U. (Kg/dm ³)	Módulo de finura M.F.
Cimento	Cimento Portland III – 40 RS	2,950	1,000	-
Areia 1	Areia Natural	2,667	1,420	2,760
Areia 2	Pó de pedra	2,717	1,684	3,377
Pedra 1	Brita 1	2,682	1,000	6,949
Água	-	-	-	-
Aditivo	EXPA 925	-	-	-

Em um segundo momento foi confeccionado o traço 3 que utilizou os materiais listados na Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição dos materiais utilizados para confecção do traço 3

Materiais	Descrição	Massa específica M.E. (Kg/dm³)	Massa unitária M.U. (Kg/dm³)	Módulo de finura M.F.
Cimento	Cimento Duracem AD300	2,950	1,000	-
Areia 1	Areia Natural	2,667	1,420	2,760
Areia 2	Pó de pedra	2,717	1,684	3,377
Pedra 0	Brita 0	2,660	1,000	6,051
Pedra 1	Brita 1	2,682	1,000	6,949
Água	-	-	-	-
Aditivo 1	Maste4rmix 460 N	-	-	-
Aditivo 2	Glenium 3200 HE	-	-	-

3.1.2. Materiais utilizados nos capeamentos

Os ensaios de resistência à compressão para os traços 1 e 2 foram realizados com diferentes tipos de capeamento. Basicamente, foi utilizado o enxofre em pó duplamente ventilado, almofadas de neoprene com durezas de 68, 78 e 82 Shore A, e areia confinada. Estes materiais foram aplicados em espessuras distintas, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Materiais de capeamento utilizados para os traços 1 e 2 no ensaio de resistência à compressão

Tipo de capeamento	Espessura (mm)
Enxofre puro	≈ 2
Neoprene 68 Shore A confinado	10
Neoprene 78 Shore A confinado	10
Neoprene 82 Shore A confinado	5
Neoprene 82 Shore A confinado	3
Neoprene 68 Shore A não confinado	10
Neoprene 82 Shore A não confinado	5
Neoprene 82 Shore A não confinado	3
Areia em contêiner e parafina	≈ 5

Diversas bibliografias citam a importância do material de capeamento obter resistência à compressão maior do que o material a ser ensaiado (BUCHER e

RODRIGUES FILHO, 1983). Visando o controle dessa variável, a resistência à compressão do enxofre foi determinada em dois corpos de prova cilíndricos confeccionados de 50mm de diâmetro por 100mm de altura (Figura 12).



Figura 12 - Corpo-de-prova cilíndrico 50 x 100 mm de enxofre ao lado de um corpo-de-prova 100 x 200 mm de concreto

Esses corpos-de-prova foram ensaiados e apresentaram tensão de ruptura de 34,73 e 35,13MPa. As rupturas foram explosivas e cônicas. No caso do Neoprene controlou-se apenas a dureza. Quanto aos outros materiais não foi possível avaliar a resistência.

Para o ensaio de resistência à compressão no traço 3 foram utilizados os materiais mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Materiais de capeamento utilizados para o traço 3 no ensaio de resistência à compressão

Tipo de capeamento	Espessura (mm)
Enxofre puro	≈ 2
Neoprene 68 Shore A confinado	10
Neoprene 78 Shore A confinado	10
Sem capeamento (Moldes de resina)	-

No capeamento com enxofre foi utilizado enxofre puro duplamente ventilado em pó. Para o capeamento com almofadas elastoméricas foram utilizados vários conjuntos de neoprene com durezas e espessuras distintas. O neoprene comprado como de dureza 70 ± 5 Shore A foi utilizado em três espessuras distintas. Os discos de neoprene de 10mm de espessura são encontrados facilmente nas durezas de 60 ± 5 e 70 ± 5 Shore A, e são os que usualmente estão sendo usados pela as empresas que efetuam controle tecnológico de concreto no estado de Minas Gerais. Já os discos de espessuras menores foram comprados por encomenda em uma empresa especializada em elastômeros. Nos ensaios para conferência da dureza, os discos de neoprene apresentaram dureza diferente da especificada comercialmente (Tabela 14):

Tabela 14 - Especificação das almofadas elastoméricas

Material	Dureza especificada (Shore A)	Dureza medida (Shore A)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
Neoprene	70 ± 5	68	10	104 mm
	70 ± 5	78	10 mm	106 mm
	70 ± 5	82	5 mm	106 mm
	70 ± 5		3 mm	106 mm

Para o capeamento com almofada de areia foi utilizada areia padrão IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) na granulometria de 0,3mm.

3.2. Métodos

3.2.1. Métodos utilizados na confecção dos corpos-de-prova

O presente trabalho contou com uma fase experimental composta pela confecção, cura e ensaios laboratoriais de corpos-de-prova de concretos. Inicialmente foram confeccionados dois traços.

A ABNT (2004) na NBR 6118/2004 elaborou uma correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto, sendo que essa qualidade é representada

pela relação água/cimento em massa e classe de resistência do concreto, como pode-se ver na Tabela 15.

Tabela 15 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (ABNT, 2004)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de resistência do concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NOTAS:					
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.					
2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Os traços experimentais 1 e 2 foram confeccionados para atender os dois extremos da Tabela 15. O primeiro traço atendendo a classe de agressividade IV com relação água/cimento $\leq 0,45$ e classe de concreto $\geq C40$, e o segundo atendendo a classe de agressividade I com relação água/cimento $\leq 0,65$ e classe de concreto $\geq C20$.

As classes de resistência do concreto foram determinadas pela NBR (ABNT, 1992). Elas são divididas conforme descrito nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Classes de resistência do grupo I (ABNT, 1992)

Grupo I de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)
C10	10
C15	15
C20	20
C25	25
C30	30
C35	35
C40	40
C45	45
C50	50

Tabela 17 - Classes de resistência do grupo II (ABNT, 1992)

Grupo I de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)
C55	55
C60	60
C70	70
C80	80

A composição em peso, em volume e por metro cúbico de concreto produzido dos traços confeccionados são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Quantidade de materiais utilizados nos traços 1 e 2

Materiais	Traço 1 (peso)	Traço 1 (volume)	Traço 1 (por m³)	Traço 2 (peso)	Traço 2 (volume)	Traço 2 (por m³)
Cimento	1,000	1,000	400 kg	1,000	1,00	285 kg
Areia 1	1,423	1,002	569 kg	2,246	1,581	640 kg
Areia 2	0,480	0,285	192 kg	0,761	0,452	217 kg
Pedra 1	2,490	2,490	996 kg	3,477	3,477	991 kg
Água	0,450	0,450	180 l	0,650	0,650	185 l
Aditivo	-	-	1.600 ml	-	-	1.138 ml
Slump	45 mm			110 mm		

Para cada traço foram confeccionados 42 espécimes em moldes cilíndricos de aço, de 100mm de diâmetro por 200mm de altura. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes durante 24h, e após a desforma foram imersos em água potável para cura até o dia anterior a realização dos ensaios de resistência à compressão.

Os corpos-de-prova de ambos os traços foram divididos em grupos de 3 corpos-de-prova e ensaiados a resistência à compressão. O traço 1 foi ensaiado a resistência à compressão aos 29 dias e o traço 2 aos 33 dias da confecção do concreto. Os ensaios estavam programados para os 28 dias, mas devido à logística de laboratórios e disponibilidade de equipamentos, estes foram realizados em datas diferentes das planejadas. Como não é o objetivo avaliar os traços, mas sim, os capeamentos, não foram percebidos problemas nestas alterações de datas.

Em um segundo momento foi confeccionado o traço 3 para um concreto que atingisse resistências à compressão superiores aos traços anteriores. O traço 3 teve o consumo de cimento por metro cúbico bem próximo do traço 1, porém o consumo de água foi menor, gerando uma relação água cimento mais baixa que os dois traços anteriores. O traço 3 foi composto conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Quantidade de materiais utilizados no traço 3

Materiais	Traço 3 (peso)	Traço 3 (volume)	Traço 3 (por m ³)
Cimento	1,000	1,000	397 kg
Areia 1	1,564	1,102	621 kg
Areia 2	0,529	0,314	210 kg
Pedra 0	0,393	0,393	156 kg
Pedra 1	2,252	2,252	894 kg
Água	0,338	0,338	134 l
Aditivo 1	-	-	3573 ml
Aditivo 2	-	-	3969 ml
Slump		120 mm	

Para o traço 3 foram confeccionados 18 espécimes em moldes cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, sendo 15 espécimes em moldes de aço e 3 espécimes em moldes de resina. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes durante 24h, e após a desforma foram imersos em água para cura até o dia anterior a realização dos ensaios de resistência à compressão.

Os corpos-de-prova do traço 3 foram divididos em grupos de 3 corpos-de-prova e ensaiados a resistência à compressão aos 8 dias da confecção do concreto.

3.2.2. Métodos utilizados no ensaio de resistência à compressão

Para o rompimento dos corpos-de-prova foi utilizada uma prensa hidráulica informatizada com capacidade máxima de 2.000KN e controle manual de velocidade de aplicação de carga, tendo curso útil do pistão de 25mm. O controle de velocidade do equipamento funciona através de uma válvula de fluxo de óleo. Em função do carregamento do material ensaiado e do tempo de ensaio foi possível estimar a

velocidade de aplicação de carregamento do ensaio para cada posição do controle do equipamento.

Para os traços 1 e 2, o ensaio de resistência à compressão foi realizado com diferentes tipos de capeamento e com o controle do equipamento em posições diferentes, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Distribuição dos corpos-de-prova dos traços 1 e 2 no ensaio de resistência à compressão

Tipo de capeamento	Espessura (mm)	Número de corpos-de-prova		Posição do controle de velocidade
		Traço 1	Traço 2	
Enxofre puro	≈ 2	3	3	2
		3	3	4
		3	3	6
Neoprene 68 Shore A confinado	10	3	3	2
		3	3	4
		3	3	6
Neoprene 78 Shore A confinado	10	3	3	2
Neoprene 82 Shore A confinado	5	3	3	2
Neoprene 82 Shore A confinado	3	3	3	2
Neoprene 68 Shore A não confinado	10	3	3	2
Neoprene 82 Shore A não confinado	5	3	3	2
Neoprene 82 Shore A não confinado	3	3	3	2
Areia em contêiner e parafina	≈ 5	3	3	2
Total		39	39	-

Para o traço 3, o ensaio de resistência à compressão foi realizado com diferentes tipos de capeamento e com o controle de velocidade do equipamento em distintas posições, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Distribuição dos corpos-de-prova do traço 3 no ensaio de resistência à compressão

Tipo de capeamento	Espessura (mm)	Número de corpos-de-prova	Posição do controle de velocidade
Enxofre puro	≈ 2	3	2
Neoprene 68 Shore A confinado	10	6	2,7
Neoprene 78 Shore A confinado	10	3	2,7
Sem capeamento (Moldes de resina)	-	3	2
Total		15	-

A posição do controle de velocidade do equipamento de ensaio foi alterada para os capeamentos elastoméricos com intuito que o tempo de ruptura e a velocidade do carregamento fossem próximos para todos os corpos-de-prova do traço 3.

3.2.2.1. Métodos de capeamento

No capeamento com enxofre foi utilizado enxofre duplamente ventilado em pó fundido em fogareiro de bancada. A resistência à compressão desse material foi determinada em dois corpos de prova cilíndricos confeccionados de 50mm de diâmetro por 100mm de altura.

Depois de fundido, o enxofre em estado líquido foi vertido em disco metálico do gabarito capeador construído em aço (Figura 13), que garante ângulo reto no capeamento dos corpos-de-prova de concreto e argamassa.



Figura 13 - Gabarito capeador de enxofre

O corpo-de-prova é apoiado no gabarito e deslizado na vertical para baixo até ser apoiado no disco metálico sem deixar de apoiar-se no gabarito. O enxofre em estado

líquido solidifica em alguns segundos, ficando com a aparência apresentada na Figura 14.



Figura 14 - Corpos-de-prova capeados com enxofre

Para o capeamento com almofadas elastoméricas foram utilizados dois pares de capeadores elastoméricos (bases metálicas) e vários conjuntos de neoprene em durezas e espessuras distintas.

Os conjuntos de bases com anel para restringir a deformação radial do neoprene são apresentados abaixo nas Figuras 15 e 16.

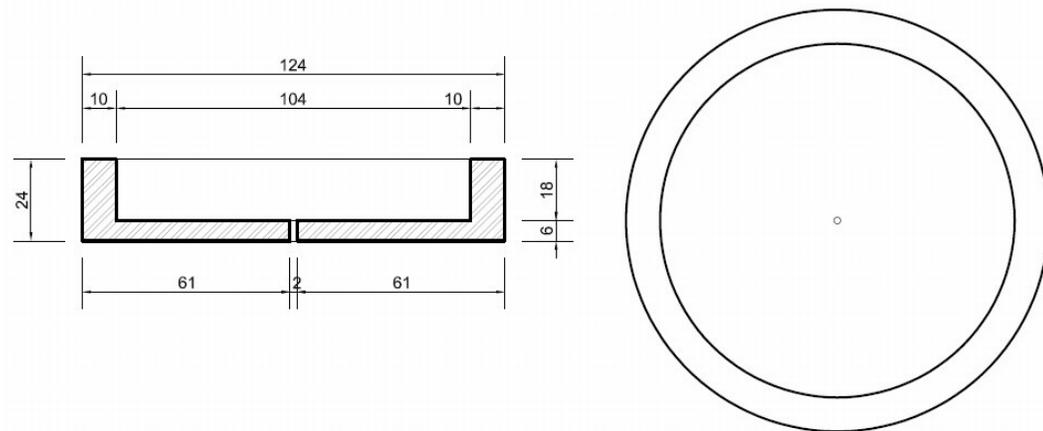


Figura 15 - Capeador elastomérico n° 1

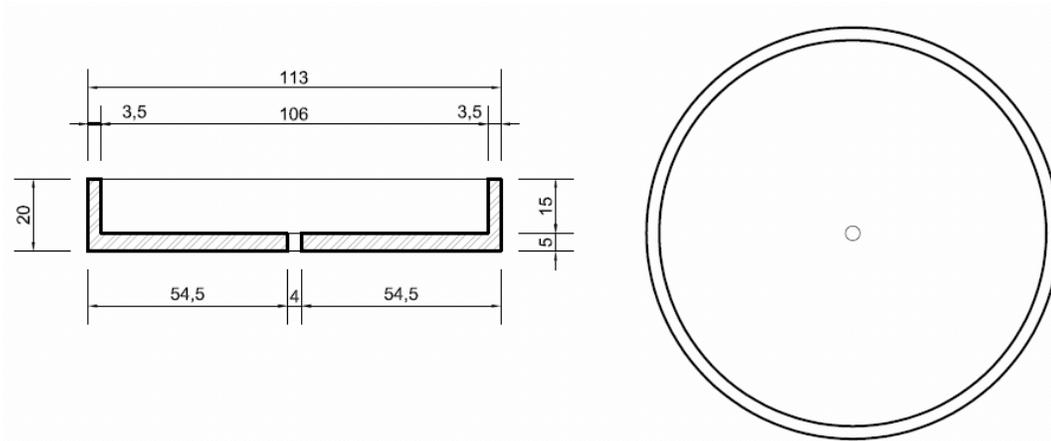


Figura 16 - Capeador elastomérico n° 2

O material elastomérico utilizado está correlacionado com os capeadores da seguinte forma (Tabela 22):

Tabela 22 - Especificação das almofadas elastoméricas

Material	Dureza (Shore A)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Capeador
Neoprene	68	10	104	1
	78	10	106	2
	82	5	106	2
		3	106	2

As duas bases metálicas (anel de retenção), que funcionam como confinamento para o neoprene, foram escolhidas por serem capeadores elastoméricos facilmente encontrados no mercado e utilizados amplamente por empresas que realizam controle tecnológico de concreto no estado de Minas Gerais.

O capeamento com almofada de areia utilizou o capeador elastomérico 1 para restringir à areia, conforme Figura 17.

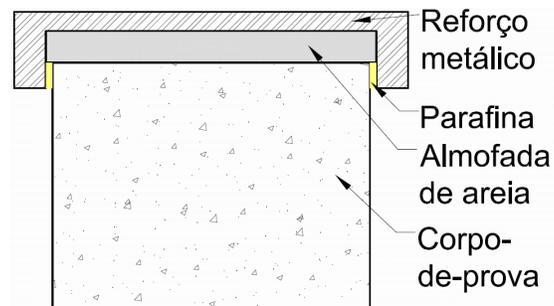


Figura 17 - Capeamento com caixa de areia

Para garantir a perpendicularidade entre a superfície do reforço metálico da almofada de areia com o corpo-de-prova foi utilizado o gabarito capeador utilizado para capeamentos de enxofre.

A moldagem dos corpos-de-prova com o molde especial de resina seguiu o mesmo procedimento de adensamento utilizado para os moldes de aço. Foram utilizados três conjuntos de moldes idênticos ao da Figura 18.



Figura 18 - Molde especial de resina utilizado

Para garantir a planicidade e paralelismo das bases dos corpos-de-prova foram utilizados discos de aço planos (Figura 19) em cada extremidade dos moldes e foi utilizado o recurso de colocar o molde na posição horizontal logo após a moldagem.



Figura 19 - Discos de aço planos

3.2.3. Métodos utilizados no ensaio de módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade dos concretos confeccionados foram utilizados neste trabalho método de módulo de elasticidade estático e dinâmico por frequência ressonante.

3.2.3.1. Módulo de elasticidade estático

Para a determinação do módulo de elasticidade estático foram utilizados os parâmetros da NBR 8522/2003 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação.

Para a determinação do módulo estático foram disponibilizados três corpos-de-prova de cada traço, mas efetivamente foram ensaiados dois corpos-de-prova. Para o traço 1 foi ensaiado o módulo de elasticidade estático aos 30 dias. Para os traços 2 e 3 foram ensaiados aos 68 e 25 dias da confecção do concreto, respectivamente. Os ensaios dos traços 1 e 3 estavam programados para os 28 dias, mas devido à logística de laboratórios e disponibilidade de equipamentos, estes foram realizados em datas diferentes das planejadas. O traço 2 inicialmente foi programado o ensaio para 28 dias, mas como os corpos-de-prova deste traço foram utilizados para aferir o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, o mesmo foi ensaiado aos 68 dias. É válido ressaltar que seria interessante que os ensaios de módulo de elasticidade estático e dinâmico fossem realizados no mesmo dia e que os três traços fossem ensaiados na mesma idade. Como não é o objetivo do trabalho avaliar o módulo de elasticidade dos traços, mas sim, adquirir dados de entrada para a simulação computacional dos capeamentos, acredita-se que datas de realização dos ensaios não influenciem os resultados.

Para o ensaio, foi utilizado para medição de deformação axial um compressômetro com 2 relógios comparadores digitais com resolução de 0,001mm, conforme pode ser visto na Figura 20.



Figura 20 - Compressômetro para medição de deformação axial

3.2.3.2. Módulo de elasticidade dinâmico

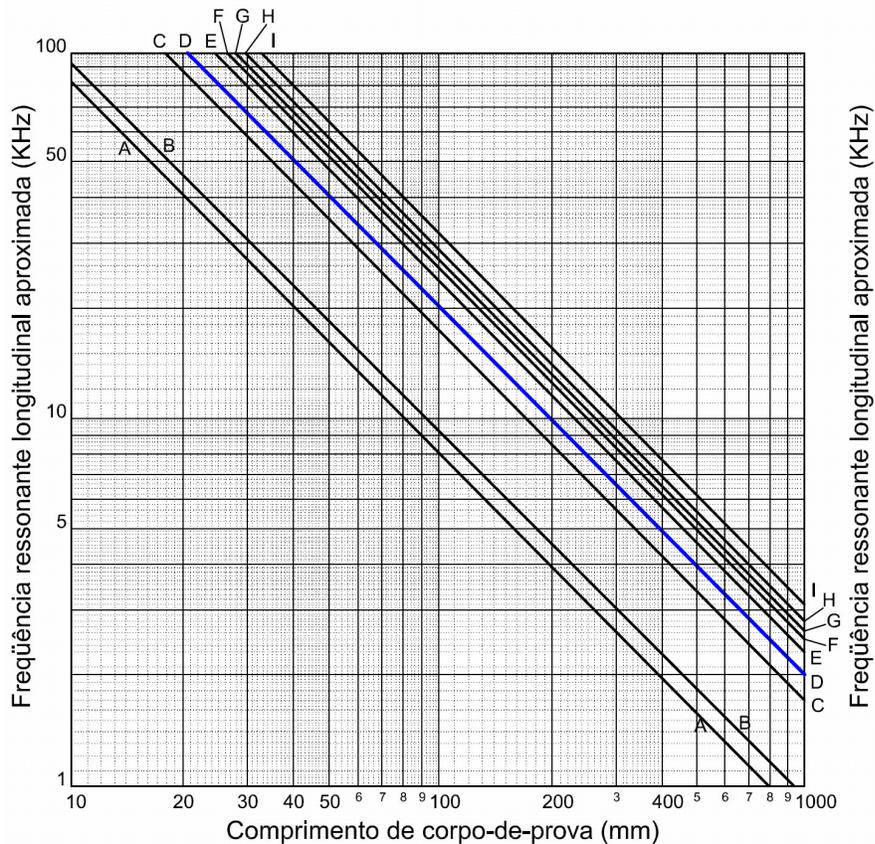
Para a determinação do módulo dinâmico foram ensaiados os mesmos dois corpos-de-prova de cada traço utilizados para o módulo de elasticidade estático, esta alternativa foi utilizada com o objetivo de diminuir as variáveis consideradas. Para os traços 1 e 3 foram ensaiados o módulo de elasticidade dinâmico aos 29 e 19 dias, respectivamente. Para o traço 2 foi o ensaio se deu aos 30, 56 e 62 dias da confecção do concreto.

Para o ensaio foi utilizado o equipamento Erudite MKII, que realiza um sistema de teste de frequência ressonante, no modo longitudinal, conforme Figura 21.



Figura 21 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal

Para a determinação do campo de frequência a ser utilizado foi adotado como valor de 10KHz de frequência ressonante longitudinal aproximada para corpo-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura em concreto extraído da Figura 22.



A = Acetal B = Acrílico C = Latão D = Ouro e Concreto E = Cristal de chumbo, Ferro fundido e Tungstênio
 F = Aço G = Ligas de alumínio H = Vidro I = Carboneto de tungstênio

Figura 22 - Frequência ressonante longitudinal aproximada (CNS, 1995)

Com base na frequência ressonante longitudinal aproximada, foram definidos valores de frequências para os extremos do campo de variação da frequência, frequência de início (F_s) e frequência de término (F_e). Determinada a frequência de vibração natural do material e com auxílio da equação 4 (tópico 2.2.2) pode-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico.

No ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico para o traço 1 foram utilizadas várias escalas em faixas com a frequência ressonante longitudinal aproximada estando nestes intervalos. A intenção foi selecionar as mais adequadas faixas de frequência para o ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm de concreto independente das possíveis variáveis do ensaio.

Para os traços 2 e 3 foram utilizadas as duas faixas de frequência mais adequadas encontradas a partir do ensaio do traço 1.

Observou-se que os resultados de frequência ressonante longitudinal e do fator Q, que descreve a heterogeneidade do corpo de prova, apresentaram grandes dispersões para o traço 1 e para o traço 2. Devido a esta dispersão o ensaio do traço 2 foi repetido mais duas vezes. O primeiro ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do traço 2 foi realizado aos 30 dias, apenas 3 dias após a retirada dos corpos-de-prova da cura.

O ensaio foi realizado novamente com os mesmos corpos-de-prova aos 56 dias sem retornarem para a cura, representando um total de 29 dias fora da cura.

Mesmo nesta segunda tentativa os resultados continuaram a apresentar grandes dispersões e houve uma redução do módulo de elasticidade dinâmico calculado a partir das frequências ressonantes encontradas.

O ensaio foi realizado pela terceira vez aos 62 dias e foram adotados critérios distintos para cada conjunto de três leituras da frequência ressonante. Um dos conjuntos de leituras obteve a mesma frequência ressonante e uma vez repetindo-se esses critérios as leituras obtiveram variações de frequência ressonante mínimas. Esses critérios foram:

- a) perfeito alinhamento entre vibrador acústico, corpo-de-prova e acelerômetro;
- b) perfeita centralização do corpo-de-prova no suporte;
- c) leve e idêntica compressão do vibrador acústico e acelerômetro em direção do corpo-de-prova;
- d) utilização de mínima quantidade de gel de contato entre o corpo-de-prova, vibrador acústico e acelerômetro.

Esses critérios foram aplicados no ensaio do traço 3 sendo obtidos resultados com desvio-padrão mínimo. Não foi possível realizar o ensaio com o traço 1 dentro

desses parâmetros, pois os corpos-de-prova já haviam sido rompidos no ensaio de módulo de elasticidade estático.

3.2.4. Métodos utilizados na simulação computacional

A simulação computacional foi realizada por elementos finitos no *software Deform* com a utilização de dados experimentais e do *software CES Selector* para inserção de dados na simulação computacional por elementos finitos.

O *software Deform*, como citado anteriormente é um *software* de simulação computacional por elementos finitos e foi utilizado para simular o ensaio de resistência à compressão dos concretos.

O *software CES Selector* é uma biblioteca de seleção de materiais que traz dados de diversos materiais, como composição, propriedades mecânica, elétrica, térmica, ótica e outras.

A simulação teve vários passos, entre eles:

- a) desenho do corpo-de-prova;
 - b) inserção da malha no corpo-de-prova;
 - c) inserção do material do corpo-de-prova;
 - d) desenho dos pratos do equipamento;
 - e) determinação do movimento dos pratos;
 - f) determinação da relação de ligação e atrito entre o corpo-de-prova e os pratos;
- e) entre outros, teve as demais configurações do sistema e a simulação propriamente dita.

Para a realização desses passos, o pré-processador do software foi acionado para que sejam realizadas algumas configurações, como o tipo de objeto, geometria, malha e a seleção do sistema de unidades que será utilizado (Figura 23).

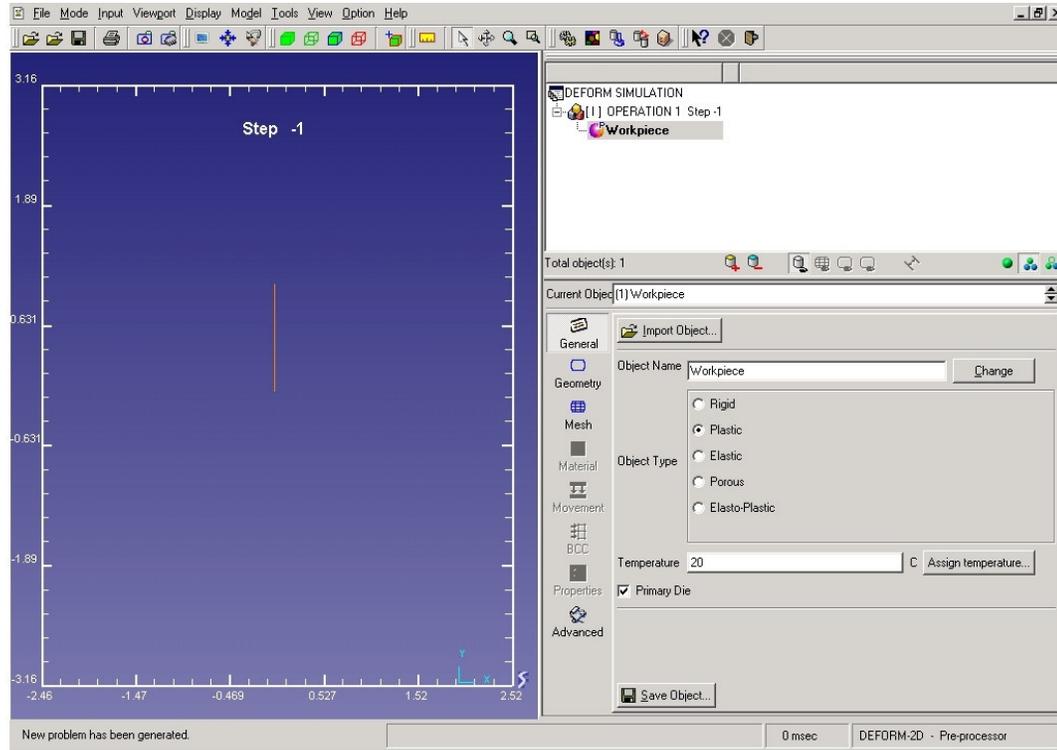


Figura 23 - Tela inicial do pré-processador do *Deform*

Adotou-se na simulação o Sistema Internacional de Unidades e a geometria axissimétrica, isto é, simétrica em relação ao eixo (Figura 24).

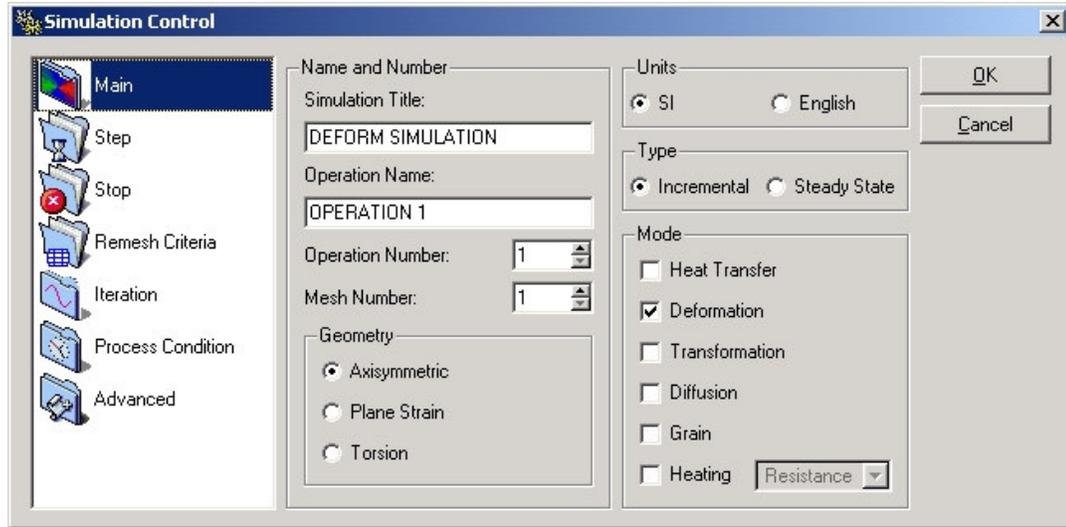


Figura 24 - Controle de simulação do pré-processador do *Deform*

O material concreto foi inserido na biblioteca de materiais do *Deform*, conforme pode ser visto na Figura 25.

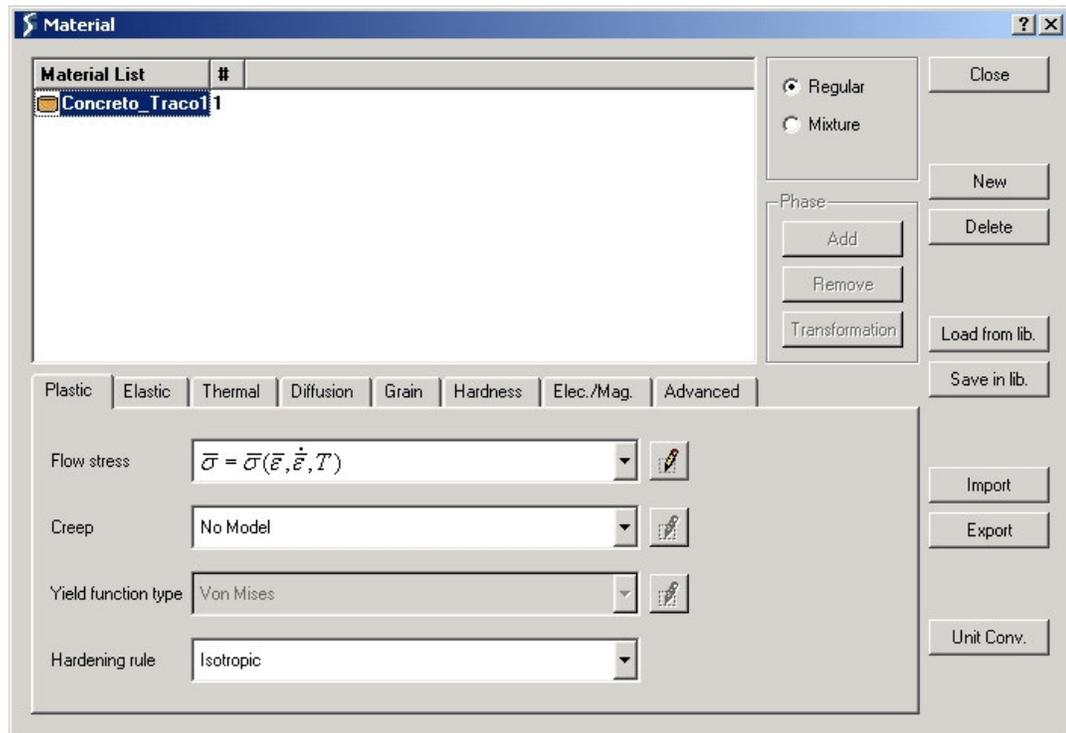


Figura 25 - Inserção de material no *software Deform*

Com base na curva tensão-deformação extraída do ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático foram cadastradas as propriedades do concreto utilizado na simulação, conforme Figura 26.

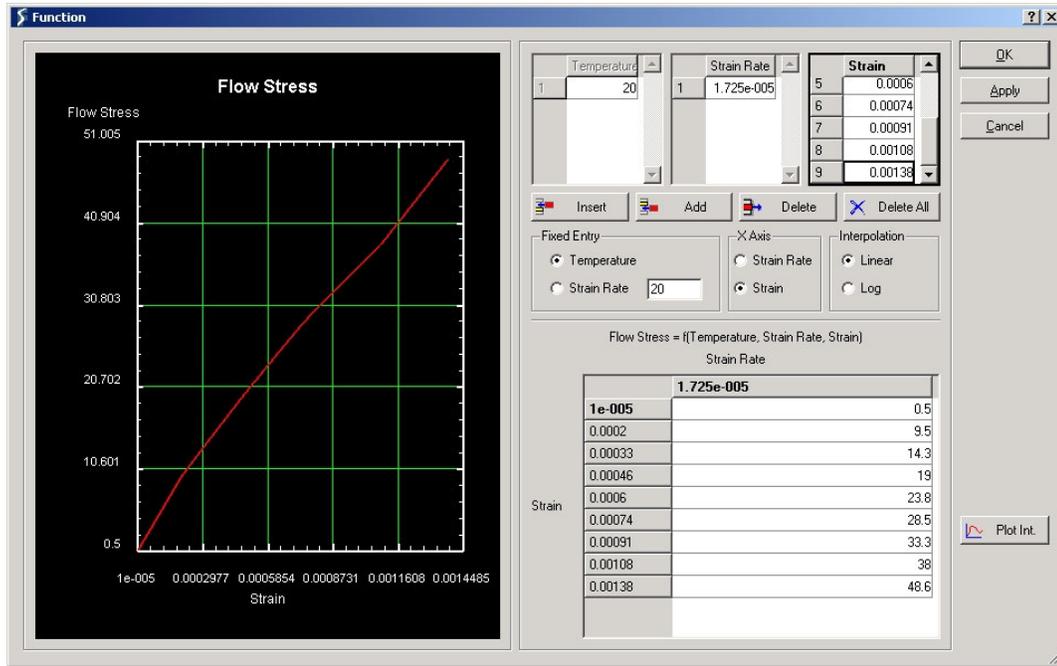


Figura 26 - Cadastro da tensão e deformação do concreto no software Deform

O corpo-de-prova foi desenhado com dimensões idênticas às dos corpos-de-prova da fase experimental, ou seja, cilindros com 100mm de diâmetro e 200mm de comprimento. Os mesmos foram simulados como objeto Elástico-Plástico e como uma malha de 2.000 elementos. Os pratos do equipamento de ensaio, considerados rígidos, possuem 200mm de diâmetro e 50mm de altura. Ambas as peças, corpo-de-prova e pratos, podem ser vistas na Figura 27.

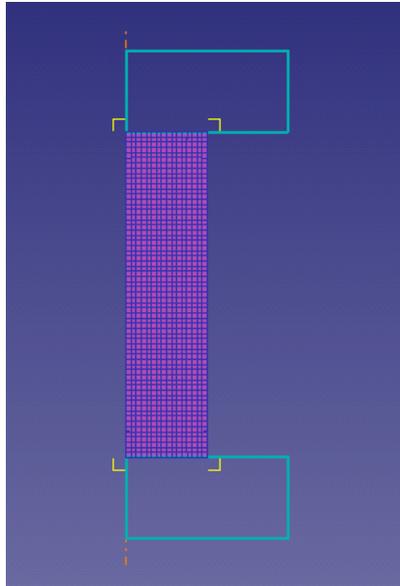


Figura 27 - Desenho do corpo-de-prova e pratos do equipamento de ensaio no *software Deform*

Para configuração de outras propriedades, como o coeficiente de Poisson, foi utilizado o *software CES Selector*, que pode ser visto na Figura 28.

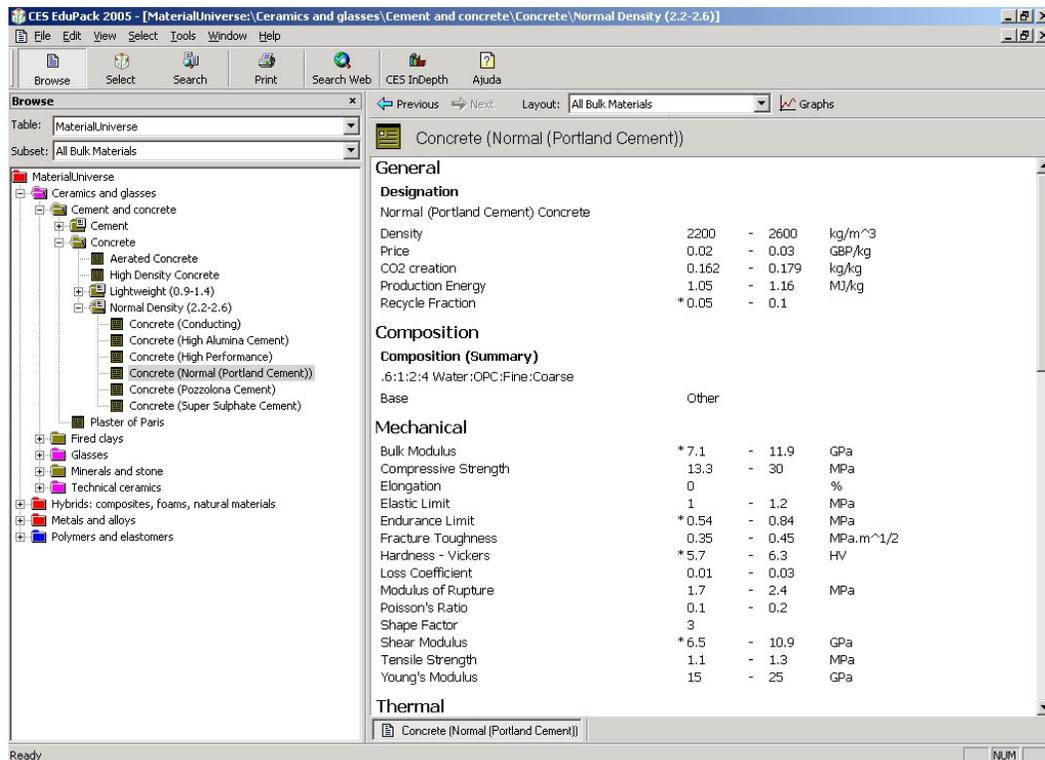


Figura 28 - Propriedades dos materiais pelo *software CES Selector*

A simulação foi processada em diversas situações. Primeiramente, foi ensaiado o corpo-de-prova de concreto sem capeamento, com as duas faces planas, paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal.

Em um segundo momento foi realizada a simulação com o corpo-de-prova dentro das mesmas condições anteriores, porém com materiais diversos de capeamento com a espessura de 2mm. Os materiais de capeamento foram especificados pelo módulo de elasticidade e pela resistência à compressão. Consideraram-se materiais com módulos e resistências maiores ou menores que o concreto simulado.

Em um terceiro momento foram criadas irregularidades nas bases, e simulada a compressão do corpo-de-prova com capeamento.

Na Tabela 23 são listadas as propriedades dos materiais utilizados como capeamentos na simulação.

Tabela 23 - Propriedades dos materiais de capeamento utilizados na simulação

Capeamento	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
1	20	20	0,200
2	90	60	0,200
3	20	60	0,200
4	90	20	0,200

O coeficiente de Poisson adotado para os capeamentos foi o mesmo utilizado nos concretos, devido o fato do mesmo não ter sido medido para ambos os materiais. Sendo que esta propriedade para os concretos foi retirada do *software CES Selector*.

Por último, a simulação foi processada com o corpo-de-prova de concreto com as duas faces planas, paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal, mas considerando-se os pratos do equipamento como de materiais não rígidos. Foram utilizados materiais da biblioteca do *Deform*, como aços e ligas de alumínio, na tentativa de simular diferenças na rigidez do equipamento.

Como materiais dos pratos de compressão do equipamento de ensaio na simulação foram utilizados os aços baixo teor de carbono AISI 1020, alto teor de carbono AISI 1095 (900-1200C°), baixa liga AISI 5120 COLD (20-800C°), baixa liga AISI 9261 (900-1200C°) e Alumínio AL-1100 COLD (20C°).

4. RESULTADOS

4.1. Ensaio de resistência à compressão

4.1.1. Dados obtidos para os traços 1 e 2

4.1.1.1. Capeamento com enxofre

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento de enxofre foi realizado com três corpos-de-prova de cada traço e o controle manual de velocidade do equipamento na posição 2.

Os resultados apresentados no ensaio de resistência à compressão podem ser vistos na Figura 29.

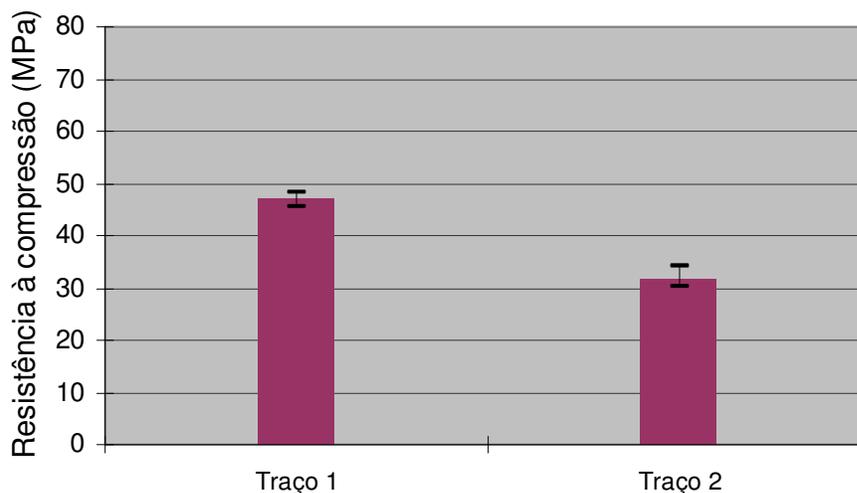


Figura 29 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova dos traços 1 e 2 capeados com enxofre

Os corpos-de-prova capeados com enxofre apresentaram, em grande parte, ruptura cônica (Figura 30).



Figura 30 - Ruptura de corpo-de-prova capeado com enxofre

4.1.1.2. Capeamento elastomérico confinado

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento elastomérico confinado seguiu os mesmos critérios citados anteriormente para o capeamento de enxofre.

Os corpos-de-prova com capeamento elastomérico apresentaram ruptura colunar ou não uniforme (Figura 31).



Figura 31 - Ruptura com capeamento elastomérico confinado

Na utilização do capeamento elastomérico com almofadas de espessuras distintas percebe-se que a utilização do neoprene com espessura mais próxima de 13 mm, como recomenda a ASTM C 1231/C 1231M, alcançou valores de resistência à compressão maiores e com menor desvio-padrão (Figura 32 e Figura 33).

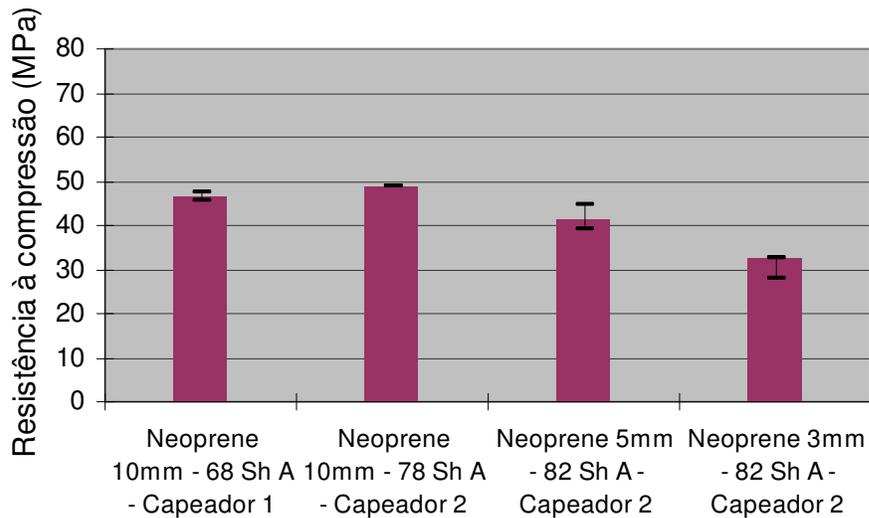


Figura 32 - Comparação da resistência à compressão do traço 1 com capeamentos elastoméricos com neoprene confinado de espessuras diferentes

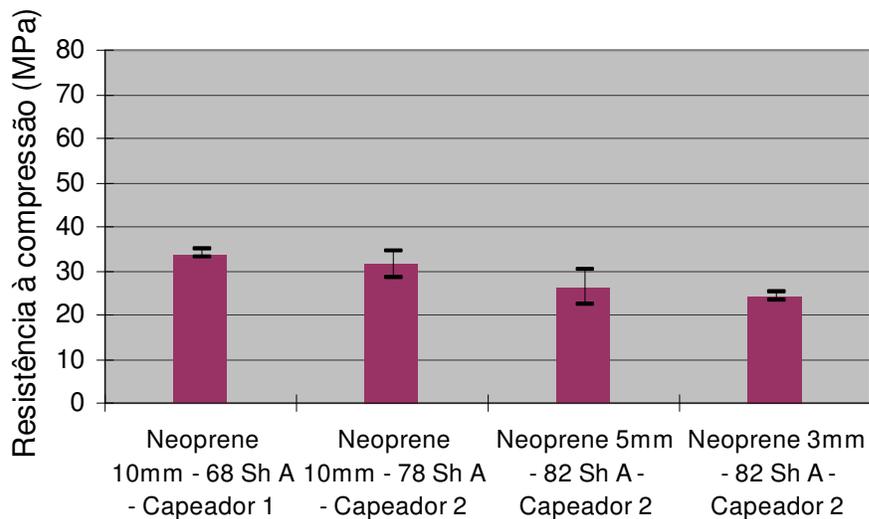


Figura 33 - Comparação da resistência à compressão do traço 2 com capeamentos elastoméricos com neoprene confinado de espessuras diferentes

4.1.1.3. Capeamento elastomérico não confinado

Na utilização do capeamento elastomérico não confinado que é dado pelo anel de retenção do capeador os corpos-de-prova do traço 1 e 2 obtiveram resistência à compressão bem menores que com o neoprene confinado (Figura 34 e Figura 35).

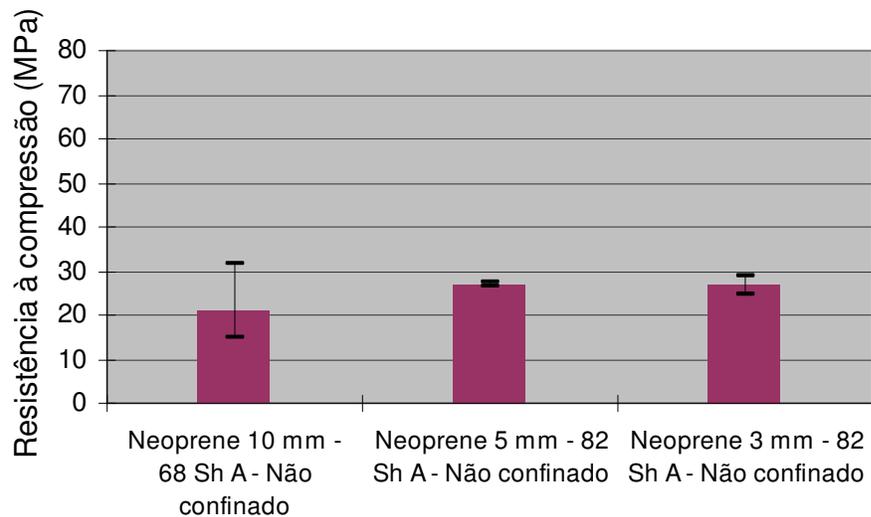


Figura 34 - Resistência à compressão do traço 1 com capeamentos elastoméricos não confinado

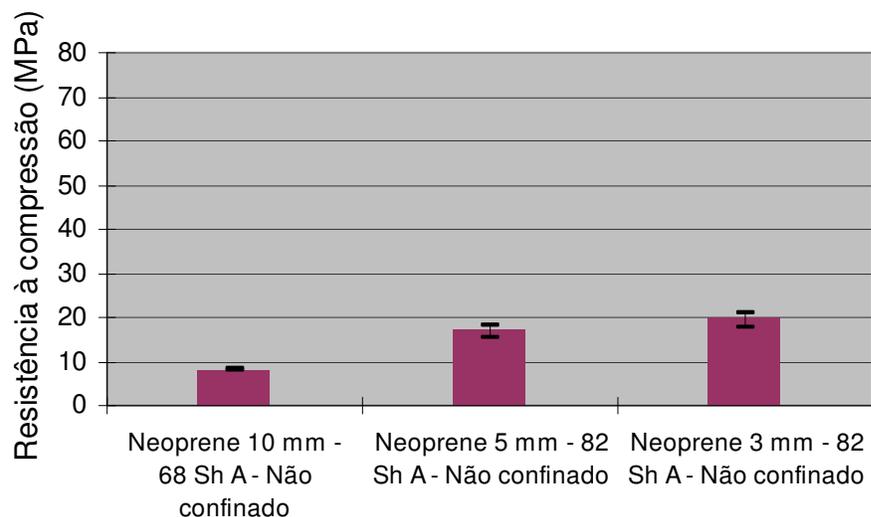


Figura 35 - Resistência à compressão do traço 2 com capeamentos elastoméricos não confinado

A ruptura dos corpos-de-prova com capeamento elastomérico não confinado ocorreu de forma desuniforme, em grande parte das vezes soltando lascas das bases do cilindro (Figura 36).

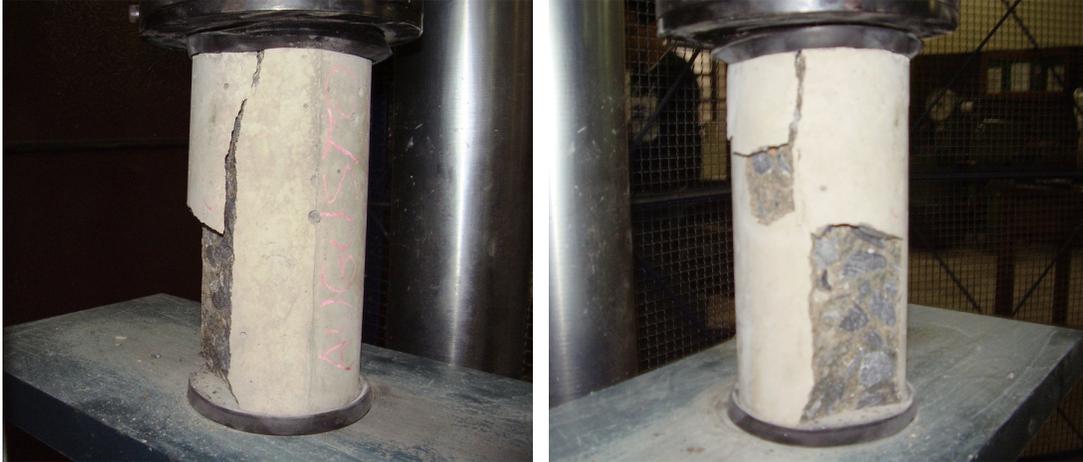


Figura 36 - Ruptura com capeamento elastomérico não confinado

4.1.1.4. Capeamento com areia confinada

O capeamento realizado com areia confinada (*sand box*) obteve resistência à compressão inferior aos capeamentos com enxofre e elastomérico de neoprene confinado $e=10\text{mm}$ (Figura 37).

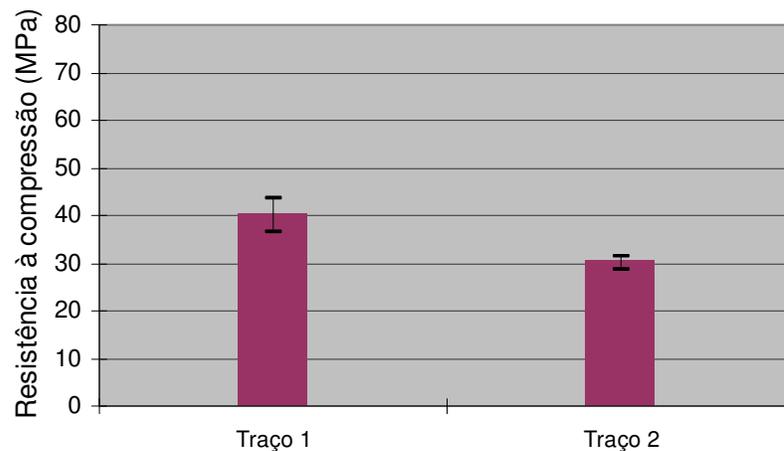


Figura 37 - Resistência à compressão dos traços 1 e 2 com capeamento de areia confinada

A ruptura dos corpos-de-prova com capeamento de areia ocorreu por esmagamento, ocorrendo ruptura em todo cilindro (Figura 38).



Figura 38 - Ruptura com o capeamento de areia

4.1.1.5. Velocidade do ensaio

A velocidade aproximada de aplicação do carregamento foi obtida pela razão das médias dos resultados de resistência à compressão e dos tempos de ruptura dos corpos-de-prova.

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento de enxofre foi realizado em três velocidades de carregamento distintas. Ou seja, para o rompimento de cada um dos três corpos-de-prova o controle manual de velocidade do equipamento de ensaio era colocado em uma posição diferente, o que corresponde a velocidades distintas.

Inicialmente o controle foi colocado na posição 2 e depois nas posições 4 e 6. Isto representou significativo aumento na velocidade de ruptura dos corpos-de-prova. Na posição 2 os corpos-de-prova do traço 1 atingiram a ruptura no tempo médio 80 segundos, para as posições 4 e 6 os tempos médios foram 21 e 10 segundos, respectivamente. Para o traço 2 a ruptura foi alcançada no tempo médio de 55, 15 e 8 segundos nas posições 2, 4 e 6, respectivamente.

Os ensaios apresentaram diferenças na resistência à compressão conforme se pode ver na Tabela 24.

Tabela 24 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio para os traços 1 e 2 capeados com enxofre

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento (MPa/s)
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação (%)		
1	47,90	48,37	45,38	47,22	1,61	3,411	80,00	0,59
1	38,01	52,61	48,36	46,33	7,51	16,205	21,33	2,17
1	46,59	49,16	46,71	47,49	1,45	3,053	10,00	4,75
2	30,37	30,58	34,17	31,70	2,14	6,736	55,00	0,58
2	30,20	32,22	32,07	31,50	1,13	3,575	15,33	2,05
2	35,07	32,88	34,61	34,18	1,16	3,379	8,22	4,16

Para os traços 1 e 2 com o capeamento de enxofre nas velocidades de carregamento aplicadas não foi possível detectar influência significativa, mas houve aumento de resistência à compressão da menor velocidade para a maior.

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento elastomérico, inicialmente, foi realizado em três velocidades de carregamento distintas seguindo os mesmos critérios citados anteriormente para o capeamento de enxofre. O capeador elastomérico composto pela capeador nº1 e o neoprene com dureza de 68 Shore A e espessura de 10 mm foi o utilizado nas três velocidades de carregamento. As demais combinações de capeamento elastomérico somente foram testadas na velocidade originada da posição 2 do controle de velocidade do equipamento de ensaio.

Para o traço 1, no primeiro comando os corpos-de-prova atingiram a ruptura no tempo médio 166 segundos, para as posições subseqüentes os tempos médios foram 41 e 20 segundos. No traço 2, a ruptura foi atingida nos tempos médios de 101, 36 e 18 segundos nas posições 2, 4 e 6, respectivamente.

Os ensaios apresentaram diferenças na resistência à compressão conforme podemos ver na Tabela 25.

Tabela 25 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio para os corpos-de-prova capeados com neoprene confinado

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento (MPa/s)
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
1	47,63	46,82	45,48	46,64	1,08	2,322	166,00	0,28
1	51,24	47,55	49,82	49,54	1,86	3,761	41,00	1,21
1	47,59	52,08	49,45	49,71	2,25	4,535	19,67	2,53
2	34,88	33,04	33,19	33,71	1,02	3,030	101,00	0,33
2	32,04	36,16	33,53	33,91	2,09	6,153	36,00	0,94
2	33,99	34,20	34,10	34,09	0,11	0,313	18,00	1,89

Comparando o capeamento de enxofre com o elastomérico de neoprene (68 shore A - Esp. 10 mm) para os traços 1 e 2, pode-se verificar nas Figuras 43 e 44, que para a mesma faixa de velocidade de carregamento, o capeamento elastomérico obteve maiores resistências.

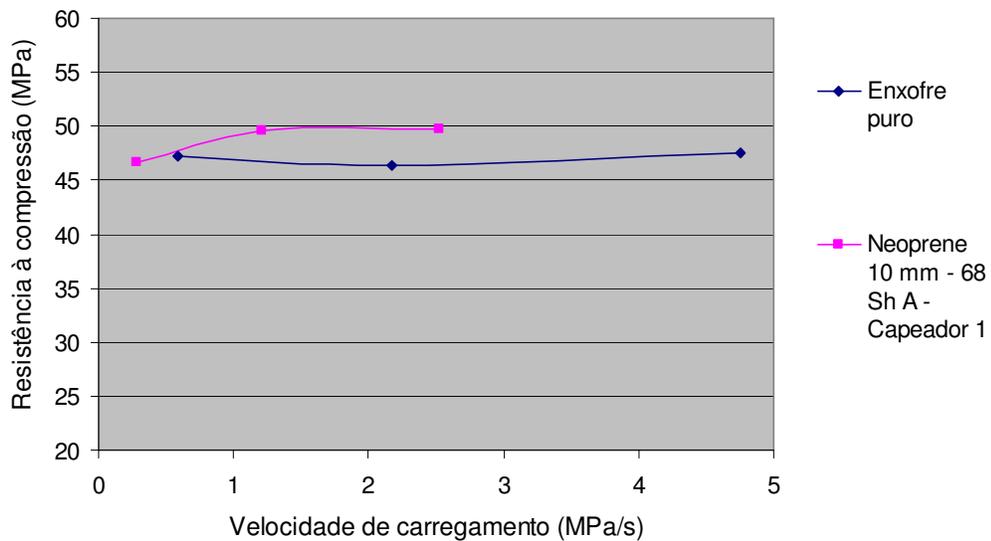


Figura 39 - Comparação da resistência à compressão do traço 1 com o capeamento de enxofre e o elastomérico

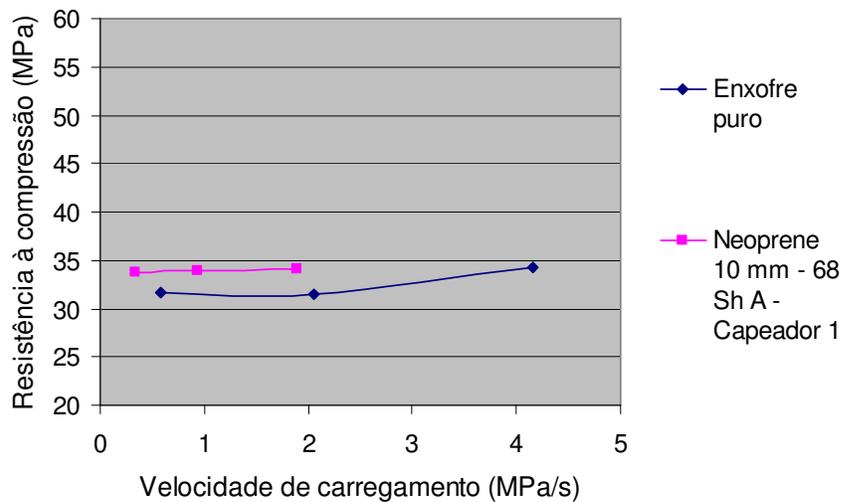


Figura 40 - Comparação da resistência à compressão do traço 2 com o capeamento de enxofre e o elastomérico

É importante explicitar que mesmo o controle de velocidade do equipamento estando na mesma posição no ensaio de resistência à compressão para diversos corpos-de-prova com diferentes tipos de capeamento a velocidade de carregamento variou conforme mostra a Tabela 26.

Tabela 26 - Velocidade de carregamento por tipo de capeamento

Tipo de capeamento	Controle de velocidade do equipamento	Velocidade de carregamento (MPa/s)	
		Traço 1	Traço 2
Enxofre puro	2	0,59	0,58
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2	0,28	0,33
Neoprene 10 mm - 78 Sh A - Capeador 2	2	0,32	0,23
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	0,32	0,23
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	0,41	0,36
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Sem anel	2	0,06	0,03
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	0,27	0,19
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	0,39	0,29
Anel com areia e parafina	2	0,28	0,25

Para grande parte dos capeamentos o traço 1 que apresentou maior resistência a compressão apresentou maior velocidade de carregamento que o traço 2, devido à menor deformação originada do maior módulo de elasticidade.

Os corpos-de-prova que utilizaram capeamento elastomérico apresentaram ruptura mais tardia devido à deformação do neoprene (Tabela 27).

Tabela 27 - Tipo de capeamento, velocidade de carregamento e tensão de ruptura

Traço	Capeamento	Velocidade de carregamento			Tensão de ruptura		
		Equip	Tempo (s)	MPa/s	Média	Desvio-Padrão	Coefic. Var. (%)
1	Enxofre puro	2	80,00	0,59	47,22	1,61	3,411
		4	21,33	2,17	46,33	7,51	16,205
		6	10,00	4,75	47,49	1,45	3,053
	Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2	166,00	0,28	46,64	1,08	2,322
		4	41,00	1,21	49,54	1,86	3,761
		6	19,67	2,53	49,71	2,25	4,535
2	Enxofre puro	2	55,00	0,58	31,70	2,14	6,736
		4	15,33	2,05	31,50	1,13	3,575
		6	8,22	4,16	34,18	1,16	3,379
	Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2	101,00	0,33	33,71	1,02	3,030
		4	36,00	0,94	33,91	2,09	6,153
		6	18,00	1,89	34,09	0,11	0,313

4.1.2. Dados obtidos para o traço 3

4.1.2.1. Capeamento com enxofre

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento de enxofre foi realizado em uma velocidade de carregamento. Para o rompimento dos três corpos-de-prova o controle manual de velocidade do equipamento de ensaio foi colocado na posição 2. Os corpos-de-prova atingiram a ruptura no tempo médio 93 segundos e apresentaram resistências à compressão próximas, conforme pode-se ver na Tabela 28.

Tabela 28 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com enxofre

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento MPa/s
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
3	70,74	69,92	70,33	70,33	0,41	0,586	93,33	0,75

4.1.2.2. Capeamento elastomérico confinado

O ensaio de resistência à compressão com o capeamento elastomérico para o traço 3 foi realizado com o controle de velocidade de carregamento do equipamento na posição 2,7, com o intuito que todos os corpos-de-prova sofressem velocidades de carregamento próximas. O capeador elastomérico composto pelo capeador nº1 e o neoprene com dureza de 68 Shore A e espessura de 10 mm foi testado e os corpos-de-prova atingiram a ruptura no tempo médio 101 segundos e apresentaram resistências à compressão próximas, conforme pode-se ver na Tabela 29.

Tabela 29 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene confinado (Capeador 1)

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento MPa/s
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
3	77,35	77,08	77,38	77,27	0,17	0,216	101,00	0,77

Percebe-se que para a posição 2,7 do controle de velocidade do equipamento de ensaio, a aplicação do carregamento nos corpos-de-prova com capeamento elastomérico foi bem próxima da aplicação nos corpos-de-prova capeados com enxofre que passaram pelo o ensaio com o controle de velocidade na posição 2.

Comparando o capeamento de enxofre com o elastomérico de neoprene (68 shore A - Esp. 10 mm) para o traço 3 pode-se verificar que o capeamento elastomérico alcançou maiores resistências.

Na tentativa de verificar a influência da reutilização da almofada de neoprene no ensaio de compressão de concretos de alta resistência, três corpos-de-prova do traço 3 foram ensaiados com as almofada utilizadas para o traço 1.

Os dados obtidos no ensaio de resistência à compressão com a almofada reutilizada não foram tão homogêneos como os encontrados com capeamento utilizando almofadas novas. Os dados podem ser vistos na Tabela 30.

Tabela 30 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene reutilizado confinado (Capeador 1)

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento MPa/s
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
3	80,00	69,14	76,94	75,36	5,60	7,429	117,33	0,64

O capeador elastomérico composto pelo capeador nº2 e o neoprene com dureza de 78 Shore A e espessura de 10 mm foi testado e os corpos-de-prova atingiram a ruptura no tempo médio 173 segundos e apresentaram resistências à compressão inferiores às obtidas com o primeiro conjunto, conforme pode-se ver na Tabela 31.

Tabela 31 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento dos corpos-de-prova do traço 3 capeados com neoprene confinado (Capeador 2)

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento MPa/s
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
3	73,81	74,57	73,08	73,82	0,75	1,009	173,33	0,43

Para o traço 1, o capeador 2 apresentou melhor desempenho (maiores resistências e menor desvio-padrão). Para o traço 2, o capeador 1 apresentou melhor desempenho. Para o traço 3, esperava-se um desempenho melhor para o capeador 2, pois foi o que apresentou melhor desempenho no traço 1 (traço com maior resistência que o traço 2). Mas, devido à elevada resistência do traço 3 o capeador 2, que é mais esbelto que o capeador 1, sofreu deformação plástica e a almofada de neoprene extrapolou a restrição do reforço metálico. A deformação plástica do reforço metálico pode ser vista na Figura 41.



Figura 41 - Deformação plástica do capeador elastomérico 2

Esta deformação do anel de restrição influenciou negativamente o resultado, diminuindo o valor da resistência à compressão e aumentando o desvio-padrão.

4.1.2.3. Moldes especiais de resina

Para o traço 3 foram moldados três corpos-de-prova com formas especiais de resina que visam garantir uma melhor moldagem com melhoria da planicidade, paralelismo e perpendicularidade das bases com o eixo longitudinal do corpo-de-prova.

O ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados com os moldes de resina foi realizado sem capeamento. Para o rompimento dos três corpos-de-prova o controle manual de velocidade do equipamento de ensaio foi colocado na posição 2. Os corpos-de-prova atingiram a ruptura no tempo médio 67 segundos e resistências à compressão obtidas estão apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Resistência à compressão e velocidade de carregamento do ensaio dos corpos-de-prova do traço 3 moldados nos moldes de resina

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Tempo de ruptura (s)	Velocidade de carregamento MPa/s
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)		
3	46,91	42,53	34,70	41,38	6,19	14,949	67,33	0,61

Comparando a resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados em moldes de aço e capeados com enxofre com os corpos-de-prova moldados em moldes de resina e sem capeamento para o traço 3 pode-se verificar que o capeamento de enxofre conduzia a maiores resistências e menor desvio-padrão.

Não foi identificado o motivo dos corpos-de-prova moldados nos moldes de resina ter obtidos resistências bem abaixo dos corpos-de-prova capeados. Uma possível dedução seria que para concretos de alta resistência o método não se adequou, necessitando mais estudos para alcance de uma conclusão.

4.1.2.4. Velocidade do ensaio

O controle de velocidade do equipamento foi posicionado diferentemente com o objetivo que os corpos-de-prova do traço 3 sofressem velocidades de carregamento próximas durante o ensaio de resistência à compressão. Este valor foi determinado a partir da ruptura dos corpos-de-prova do traço 1.

Os corpos-de-prova capeados com enxofre do traço 1 para a posição 2 do controle de velocidade do equipamento de ensaio recebeu o carregamento de 0,59MPa/s.

Os corpos-de-prova capeados com neoprene espessura 10mm e dureza 68 Shore A confinado do traço 1 carregamentos de 0,28 e 1,21 MPa/s nas posições 2 e 4 do controle, respectivamente.

Com a intenção que os corpos-de-prova com capeamento elastomérico obtivessem velocidades de carregamento próximas aos capeados com enxofre, os segundos foram ensaiados na posição 2 do controle de velocidade e para a determinação da posição do controle do equipamento para os primeiros foi utilizada a Equação 5.

$$P_{desejada} = \left[\frac{(V_{desejada} - V_1) \times (P_2 - P_1)}{(V_2 - V_1)} \right] + P_1 \quad (5)$$

Onde,

$P_{desejada}$ → posição desejada do controle de velocidade;

$V_{desejada}$ → velocidade desejada do carregamento;

V_1 → velocidade conhecida para a posição 1 do controle de velocidade;

V_2 → velocidade conhecida para a posição 2 do controle de velocidade;

P_1 → posição 1 do controle de velocidade;

P_2 → posição 2 do controle de velocidade.

Sendo que,

$V_{desejada}$ deve estar entre V_1 e V_2 .

Utilizando a equação 5 para uma velocidade desejada de 0,59MPa/s foi encontrada a posição 2,67. Como o mostrador do equipamento não oferece tal precisão o controle foi posicionado em 2,7 e os corpos-de-prova sofreram as velocidades da Tabela 33.

Tabela 33 - Velocidade de carregamento por tipo de capeamento do traço 3

Tipo de capeamento	Mostrador do Equipamento	Velocidade de carregamento (MPa/s)
Enxofre puro	2	0,75
Neoprene 10 mm - 68 ShA - Capeador 1	2,7	0,77
Neoprene reutilizado 10 mm - 68 ShA - Capeador 1	2,7	0,64
Neoprene 10 mm - 78 ShA - Capeador 2	2,7	0,43
Sem capeamento (Molde de resina)	2	0,61

Os corpos-de-prova apresentaram velocidades de carregamento maiores do que o esperado, com exceção do capeamento elastomérico com neoprene com 10 mm de espessura e dureza 78 Shore A confinado.

Comparando as velocidades de carregamento dos corpos-de-prova capeados com enxofre para os traços 1, 2 e 3, pode-se perceber que as velocidades aumentaram com a resistência à compressão dos concretos para a mesma posição do controle de velocidade, conforme pode-se ver na Figura 42.

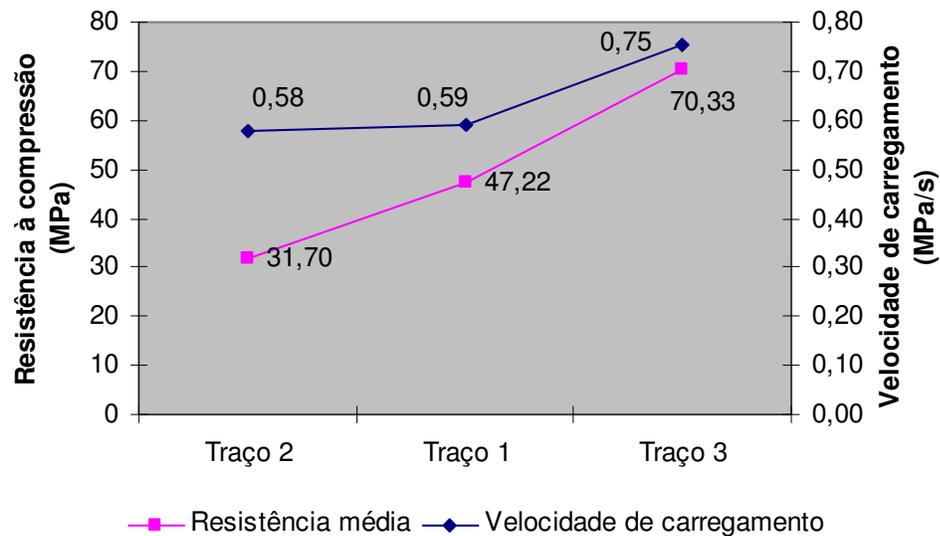


Figura 42 - Resistência à compressão do concreto versus velocidade de carregamento para corpos-de-prova capeados com enxofre e o controle de velocidade do equipamento na mesma posição

Este aumento da velocidade de carregamento para o mesmo tipo de capeamento com o controle de velocidade do equipamento na mesma posição é devido à menor deformação dos concretos com maiores resistências à compressão.

No caso dos corpos-de-prova com capeamento elastomérico com neoprene com 10mm de espessura e dureza 78 Shore A confinado não houve aumento da velocidade de carregamento devido à deformação do anel de retenção do capeador 2, que possibilitou maior deformação da almofada de neoprene.

4.1.3. Vantagens e desvantagens dos sistemas de regularização de bases

Com base nos experimentos e na pesquisa bibliográfica foi possível detectar possíveis vantagens e desvantagens de cada sistema de regularização das bases dos corpos-de-prova.

a) Capeamento com pasta ou argamassa de cimento

Vantagens:

- a pasta e a argamassa são de fácil confecção;
- o material de capeamento não é tóxico;
- baixo custo do capeamento;
- baixa deformação do material, sendo facilmente garantida a velocidade do carregamento;

Desvantagens:

- o capeamento deve ser realizado de 2 a 15 horas após a moldagem dos corpos-de-prova e quando a moldagem é realizada em canteiros de obra durante a concretagem de elementos estruturais, nem sempre existem condições de ser realizado o capeamento;
- diversos estudos mostram que esse tipo de capeamento apresenta resistência à compressão dos corpos-de-prova menor e com desvio-padrão maior que o capeamento com enxofre;
- como o capeamento é realizado pouco tempo após a moldagem, este está mais sujeito a danos decorridos do transporte e da armazenagem dos corpos-de-prova e caso este quebre antes do ensaio não é facilmente recuperável como outros tipos de capeamento.

b) Capeamento com enxofre

Vantagens:

- capeamento de médio grau de dificuldade na execução, sendo um pouco mais complexo que o capeamento com pasta de cimento;
- o capeamento está entre os que apresentam maior resistência à compressão dos corpos-de-prova e menor desvio-padrão;
- baixa deformação do material, sendo facilmente garantida a velocidade do carregamento;

- caso haja danos ao capeamento antes do ensaio é possível descartar o mesmo e confeccionar outro, estando o corpo-de-prova apto a ser ensaiado em poucas horas;
- baixo custo do capeamento.

Desvantagens:

- existe a necessidade do material de capeamento ser aquecido até a fusão que é a temperatura de 112 °C, havendo o risco de queimaduras em caso de acidentes;
- pontos de fulgor e de ignição em temperaturas relativamente baixas e próximas do ponto de fusão, 207,2 °C e 232,2 °C, respectivamente;
- risco de inalação do gás dióxido de enxofre (SO₂) que é formado como produto da combustão, que é altamente tóxico, altamente irritante para as mucosas das vias respiratórias. Os sintomas da inalação do SO₂ vão de uma simples tosse até a morte. Esse gás é perigoso porque, ao se combinar com a água e com o oxigênio forma ácido sulfúrico. Esta reação química é $SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O = H_2SO_4$, a mesma que acontece nas nuvens, quando se forma a chuva ácida.
- na fusão do enxofre, devido às impurezas de hidrocarbonetos, é liberado gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H₂S) somente gerado em temperaturas acima de 120°C, que é altamente tóxico mesmo em baixas concentrações. É um gás incolor que reage de forma explosiva com o ar, altamente tóxico, possui cheiro de ovo podre em baixas concentrações e inibe o olfato em concentrações elevadas.
- possíveis formações de trincas e fissuras no capeamento após o endurecimento do enxofre;
- a mão-de-obra pode influenciar significativamente a qualidade do capeamento.

c) Capeamento elastomérico confinado

Dos capeamentos elastoméricos confinados testados, os que levaram a melhores resultados foram os com almofadas de neoprene com espessura de 10mm. Sendo assim, somente as vantagens e desvantagens destes serão abordadas.

Vantagens:

- capeamento de fácil execução;
- mínima influência da mão-de-obra no processo de capeamento;
- o material de capeamento não é tóxico;
- o capeamento está entre os que apresentam maior resistência à compressão dos corpos-de-prova e médio desvio-padrão;
- caso haja danos ao capeamento antes do ensaio é possível descartar o mesmo e utilizar outro, estando o corpo-de-prova apto a ser ensaiado no mesmo instante;
- apesar da base metálica e da almofada de neoprene serem relativamente onerosas, devido à possibilidade de reutilização, o capeamento tem o custo relativamente baixo;

Desvantagens:

- alta deformação do material, sendo difícil garantir a velocidade do carregamento;
- incerteza do número de reuso possíveis para concretos de resistências elevadas;

d) Capeamento elastomérico não confinado

Vantagens:

- capeamento de fácil execução;
- mínima influência da mão-de-obra no processo de capeamento;
- o material de capeamento não é tóxico;
- caso haja danos ao capeamento antes do ensaio é possível descartar o mesmo e utilizar outro, estando o corpo-de-prova apto a ser ensaiado no mesmo instante;
- almofada de neoprene ser relativamente onerosa, devido à possibilidade de reutilização, o capeamento tem o custo relativamente médio;

Desvantagens:

- alta deformação do material, sendo muito difícil garantir a velocidade do carregamento;
- incerteza do número de reuso possíveis;
- o capeamento está entre os que apresentam menores resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova e maior desvio-padrão;

e) Capeamento com almofadas de areia

Vantagens:

- capeamento de médio grau de dificuldade na execução;
- o material de capeamento não é tóxico;
- o capeamento apresentou resistência à compressão dos corpos-de-prova próxima dos capeamentos que tiveram bom desempenho;
- baixa deformação do material, sendo facilmente garantida a velocidade do carregamento;

- caso haja danos ao capeamento antes do ensaio é possível descartar o mesmo e confeccionar outro, estando o corpo-de-prova apto a ser ensaiado em poucos minutos;
- baixo custo do capeamento.

Desvantagens:

- possíveis descolamentos e fissuras na parafina que veda a areia no reforço metálico;
- dificuldade na boa acomodação dos corpos-de-prova na almofada de areia com garantia do eixo de cilindro ser perpendicular a base do reforço metálico;
- dificuldade de verter a parafina entre o reforço metálico e o corpo-de-prova;
- a mão-de-obra pode influenciar significativamente a qualidade do capeamento.

f) Desgaste mecânico - Retificação

Vantagens:

- tentativa de garantia do paralelismo entre as bases do corpo-de-prova, apesar desta variável não ter sido avaliada no presente trabalho;
- tentativa de garantia da perpendicularidade das bases com o eixo do cilindro, apesar desta variável não ter sido avaliada no presente trabalho;

Desvantagens:

- alto custo do equipamento;
- alto custo de operação, devido à necessidade de troca do disco diamantado após a perda de corte;

- geração de resíduos pulverulento na atmosfera do ambiente onde está instalado o equipamento, ainda não havendo registro dos prejuízos causados à saúde dos operadores.

g) Moldes especiais

Vantagens:

- tentativa de garantia do paralelismo entre as bases do corpo-de-prova, apesar desta variável não ter sido avaliada no presente trabalho;
- tentativa de garantia da perpendicularidade das bases com o eixo do cilindro, apesar desta variável não ter sido avaliada no presente trabalho;

Desvantagens:

- perda de seção do corpo-de-prova para concretos com alto teor de ar incorporado e alto abatimento, devido à colocação do molde na posição horizontal após a moldagem;
- resultados apresentados nos ensaios de resistência à compressão não satisfatórios;
- maior dificuldade de moldagem para concretos com baixo abatimento.

4.2. Módulo de elasticidade

4.2.1. Módulo de elasticidade estático

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático foi realizado nos três traços que passaram pelo ensaio de resistência à compressão.

O traço 1 foi ensaiado a resistência à compressão aos 29 dias e ao módulo de elasticidade estático aos 30 dias. No ensaio de resistência à compressão obteve-se a média de 47,22MPa e no ensaio do módulo alcançou a ruptura com a resistência

média de 47,85MPa. Com base nos dados do ensaio de resistência à compressão a resistência prevista para o ensaio de módulo foi 47,5MPa e as reais foram 48,6 e 47,1MPa para os corpos-de-prova 1 e 2, respectivamente. Esses resultados indicam estarem os dois equipamentos utilizados aferidos.

Os dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 1 são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 1

Leitura	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Deformação Específica (mm/mm) x 10E-05			Módulo de Elasticidade (GPa)		
			CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
0,5 MPa	0,5	400	1	1	1	50,0	50,0	50,0
0,2*Fc	9,5	7606	20	20	20	47,4	47,4	47,4
0,3*Fc	14,3	11409	33	32	32,5	43,0	44,4	43,7
0,4*Fc	19,0	15212	46	45	45,5	41,1	42,0	41,6
0,5*Fc	23,8	19014	60	61	60,5	39,4	38,8	39,1
0,6*Fc	28,5	22817	74	73	73,5	38,4	38,9	38,6
0,7*Fc	33,3	26620	91	86	88,5	36,4	38,5	37,5
0,8*Fc	38,0	30423	108	99	103,5	35,0	38,3	36,7
1,0*Fc	47,5	38029						

Utilizando os dados acima segundo recomendações da norma ABNT (2003b) e de MEHTA e MONTEIRO (2001), o módulo de elasticidade para o traço 1 poderia ter os valores da Tabela 35. É válido ressaltar que o valor mais adotado no Brasil é o Módulo de elasticidade tangente inicial segundo ANBT (2003b).

Tabela 35 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 1

Autor	Valor do Módulo (GPa)
Módulo de elasticidade secante (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	41,8
Módulo de elasticidade secante (ANBT, 2003b)	36,7
Módulo de elasticidade tangente na origem (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	50,0
Módulo de elasticidade tangente inicial (ANBT, 2003b)	43,7

O traço 2 foi submetido ao ensaio de compressão aos 33 dias e ao de módulo de elasticidade estático aos 68 dias. No ensaio de resistência à compressão obteve a média de 31,70MPa e no ensaio do módulo alcançou a ruptura com a resistência

média de 37,10MPa. Como o ensaio do módulo foi realizado em idade superior, é coerente a diferença entre os dois ensaios.

Com base nos dados do ensaio de resistência à compressão, a resistência prevista para o ensaio de módulo foi 34,0MPa e as reais foram 35,4 e 38,7MPa para os corpos-de-prova 1 e 2, respectivamente. Os dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 2 são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 2

Leitura	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Deformação Específica (mm/mm) x 10E-05			Módulo de Elasticidade (GPa)		
			CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
0,5 MPa	0,5	400	3	2	2,5	16,7	25,0	20,8
0,2*Fc	6,8	5444	20	19	19,5	37,1	37,1	37,1
0,3*Fc	10,2	8166	31	30	30,5	34,6	34,6	34,6
0,4*Fc	13,6	10888	43	41	42	32,8	33,6	33,2
0,5*Fc	17,0	13610	57	55	56	30,6	31,1	30,8
0,6*Fc	20,4	16332	72	68	70	28,8	30,2	29,5
0,7*Fc	23,8	19055	94	83	88,5	25,6	28,8	27,2
0,8*Fc	27,2	21777	110	102	106	25,0	26,7	25,8
1,0*Fc	34,0	27221						

Segundo a ABNT (2003b) e MEHTA e MONTEIRO (2001), o módulo de elasticidade para o traço 2 pode ter os valores da Tabela 37.

Tabela 37 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 2

Autor	Valor do Módulo (GPa)
Módulo de elasticidade secante (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	32,4
Módulo de elasticidade secante (ANBT, 2003b)	25,8
Módulo de elasticidade tangente na origem (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	20,0
Módulo de elasticidade tangente inicial (ANBT, 2003b)	34,6

O traço 3 que foi ensaiado a resistência à compressão aos 8 dias e ao módulo de elasticidade estático aos 25 dias. No ensaio de resistência à compressão forneceu a média de 70,33MPa e no ensaio do módulo alcançou a ruptura com a resistência

média de 71,70MPa, como era um traço para atingir alta resistência inicial é normal a pequena diferença entre os dois resultados.

Com base na prova de carga feita no dia do ensaio a resistência prevista para o ensaio de módulo foi 67,1MPa e as reais foram 70,50 e 72,80MPa para os corpos-de-prova 1 e 2, respectivamente. Os dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 3 são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço 3

Leitura	Tensão (MPa)	Carga (Kgf)	Deformação Específica (mm/mm) x 10E-05			Módulo de Elasticidade (GPa)		
			CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
0,5 MPa	0,5	400	2	2	2	25,0	25,0	25,0
0,2*Fc	13,4	10744	27	30	28,5	51,7	46,1	48,9
0,3*Fc	20,1	16116	43	45	44	47,9	45,7	46,8
0,4*Fc	26,8	21488	59	61	60	46,2	44,6	45,4
0,5*Fc	33,6	26860	76	79	77,5	44,7	42,9	43,8
0,6*Fc	40,3	32233	91	97	94	44,7	41,9	43,3
0,7*Fc	47,0	37605	109	117	113	43,4	40,4	41,9
0,8*Fc	53,7	42977	126	139	132,5	42,9	38,8	40,9
1,0*Fc	67,1	53721						

Segundo a ABNT (2003b) e MEHTA e MONTEIRO (2001), o módulo de elasticidade para o traço 3 pode ter os valores da Tabela 39.

Tabela 39 - Valor do módulo de elasticidade para o traço 3

Autor	Valor do Módulo (GPa)
Módulo de elasticidade secante (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	44,7
Módulo de elasticidade secante (ANBT, 2003b)	40,9
Módulo de elasticidade tangente na origem (MEHTA e MONTEIRO, 2001)	25,0
Módulo de elasticidade tangente inicial (ANBT, 2003b)	46,8

4.2.2. Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, como já citado anteriormente, foi realizado nos três traços. Sendo o traço 1 ensaiado aos 29 dias e o traço 3 aos 19 dias. O traço 2 foi ensaiado aos 30, 56 e 62 dias.

4.2.2.1. Ensaio no traço 1

No corpo-de-prova 1 do traço 1 foram utilizadas as faixas de freqüência da Tabela 40.

Tabela 40 - Escala de freqüência escolhidas para o traço 1

Tentativa	Escala de freqüência ($F_s - F_e$) (Hz)	Freqüência ressonante longitudinal aproximada (Hz)
1	5.000 - 20.000	10.000
2	6.000 - 20.000	10.000
3	7.000 - 20.000	10.000
4	8.000 - 20.000	10.000
5	8.000 - 12.000	10.000
6	7.000 - 13.000	10.000

As faixas que conduziram aos menores desvios da freqüência ressonante longitudinal aproximada em função do Q-valor em dez leituras foram as tentativas 5 e 6, conforme pode ser visto na Figura 43.

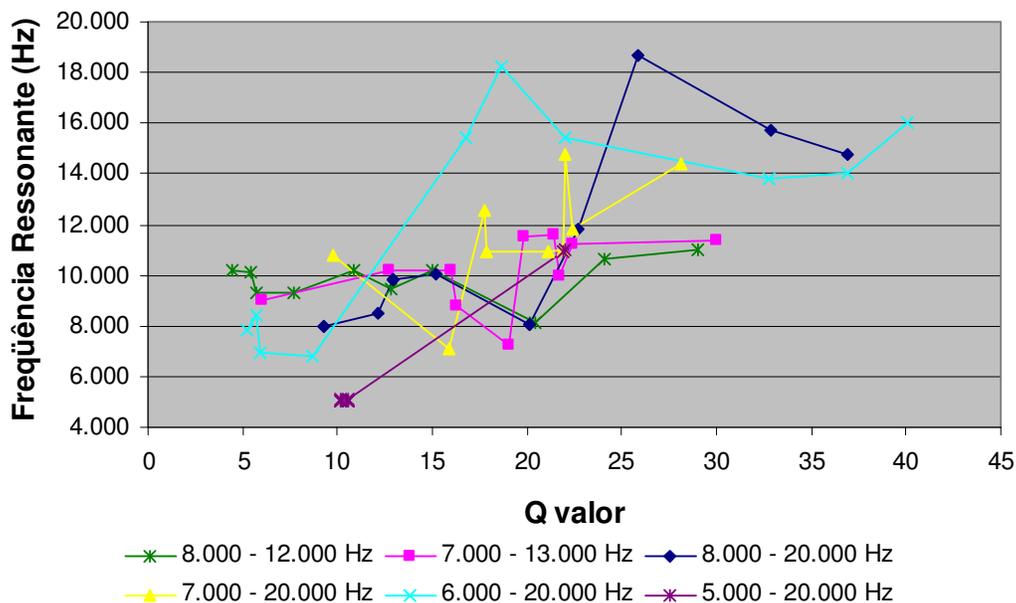


Figura 43 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o corpo-de-prova 1 do traço 1

Para a faixa de 8.000 a 12.000Hz foram encontrados os seguintes valores no traço 1 (Tabela 41).

Tabela 41 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para a faixa de frequência 8.000 a 12.000Hz do traço 1

Corpo-de-prova	Faixa de frequência (Hz)	Frequência ressonante (Hz)	Q	Módulo de elasticidade dinâmico - Ed (GPa)
1	8.000 - 12.000	10.180	4,46	39,74
1	8.000 - 12.000	10.120	5,44	39,28
1	8.000 - 12.000	9.280	5,73	33,03
1	8.000 - 12.000	9.280	7,73	33,03
1	8.000 - 12.000	10.180	10,83	39,74
1	8.000 - 12.000	9.460	12,78	34,32
1	8.000 - 12.000	10.220	15,03	40,06
1	8.000 - 12.000	8.160	20,40	25,54
1	8.000 - 12.000	10.600	24,09	43,09
1	8.000 - 12.000	11.020	29,00	46,57

Para a faixa de 7.000 a 13.000Hz foram encontrados os seguintes valores no traço 1 (Tabela 42).

Tabela 42 - Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para a faixa de frequência 7.000 a 13.000Hz do traço 1

Corpo-de-prova	Faixa de frequência (Hz)	Frequência ressonante (Hz)	Q	Ed (GPa)
1	7.000 - 13.000	8.980	5,99	30,93
1	7.000 - 13.000	10.180	12,73	39,74
1	7.000 - 13.000	10.220	15,97	40,06
1	7.000 - 13.000	8.780	16,26	29,56
1	7.000 - 13.000	7.220	19,00	19,99
1	7.000 - 13.000	11.500	19,83	50,72
1	7.000 - 13.000	11.580	21,44	51,43
1	7.000 - 13.000	10.000	21,74	38,35
1	7.000 - 13.000	11.200	22,40	48,11
1	7.000 - 13.000	11.400	30,00	49,84

Com base nestas duas faixas de frequências o corpo-de-prova 1 do traço 1 apresentou o módulo de elasticidade dinâmico de 37,44GPa e 39,87GPa na média de todas as leituras para a primeira e segunda faixa, respectivamente.

Percebe-se que a frequência ressonante e o Q-valor no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico variaram significativamente, o que pode ser indicio de falha no ensaio.

4.2.2.2. Ensaio no traço 2

No traço 2 foram utilizadas as faixas de frequência da Tabela 43, devido ser as escalas que apresentaram menor dispersão dos resultados de frequência ressonante longitudinal e Q-valor para o traço 1.

Tabela 43 - Escala de frequência escolhidas para o traço 2

Tentativa	Escala de frequência ($F_s - F_e$) (Hz)	Frequência ressonante longitudinal aproximada (Hz)
1	8.000 - 12.000	10.000
2	7.000 - 13.000	10.000

Na Figura 44 pode ser vista a leitura da freqüência ressonante longitudinal em função do Q-valor para o primeiro ensaio de módulo de elasticidade dinâmico realizado no traço 2 aos 30 dias, sendo que para cada faixa foram feitas dez leituras.

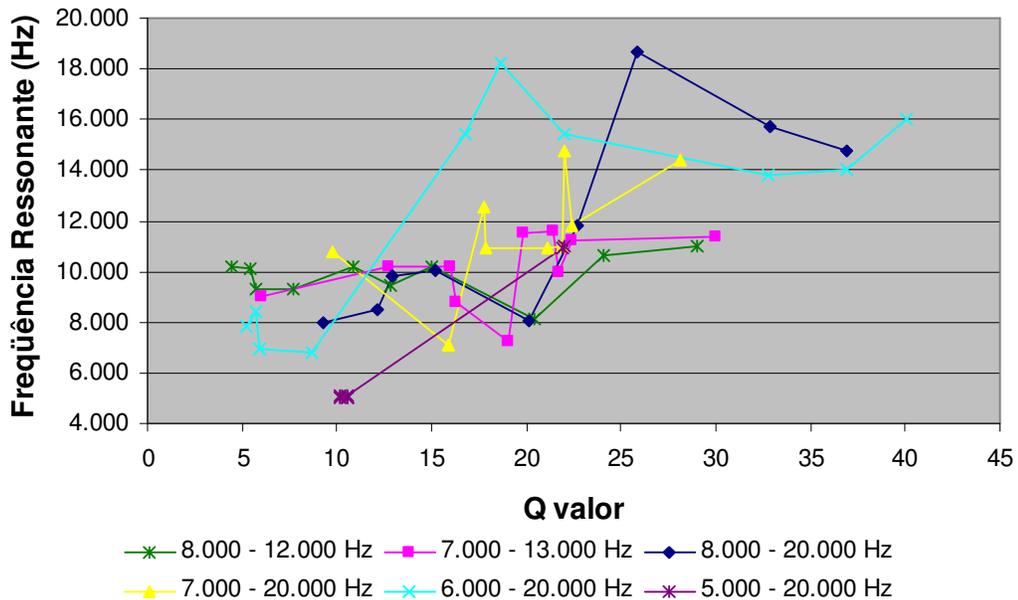


Figura 44 - Variação da freqüência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 30 dias

Para os resultados de freqüência ressonante encontrados nas faixas de 8.000 a 12.000Hz e 7.000 a 13.000Hz o módulo de elasticidade médio foi 31,82 e 34,13GPa, respectivamente.

Observa-se que os resultados apresentaram grandes dispersões e devido a esta dispersão o ensaio foi repetido. Como já citado anteriormente o primeiro ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do traço 2 foi realizado aos 30 dias, apenas 3 dias após a retirada dos corpos-de-prova da cura.

O ensaio foi realizado novamente com os mesmos corpos-de-prova aos 56 dias sem retornarem para a cura. Na Figura 45 podem ser vistas as dez leituras da freqüência ressonante longitudinal em função do Q-valor para o segundo ensaio de módulo de elasticidade dinâmico realizado no traço 2 aos 56 dias.

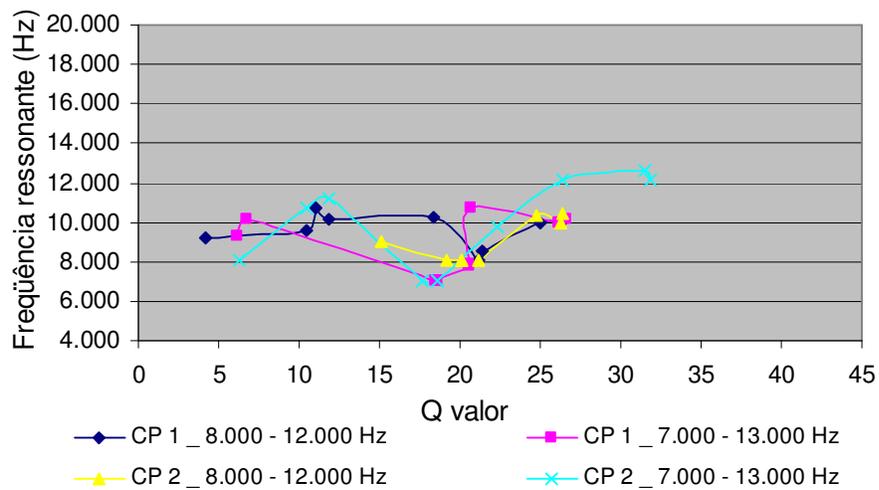


Figura 45 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 56 dias

Para os resultados de frequência ressonante encontrados nas faixas de 8.000 a 12.000Hz e 7.000 a 13.000Hz o módulo de elasticidade médio foi 30,91 e 27,43GPa, respectivamente.

Na terceira realização do ensaio no traço 2 aos 62 dias foram obtidos resultados uniformes em vinte leituras apresentadas na Figura 46.

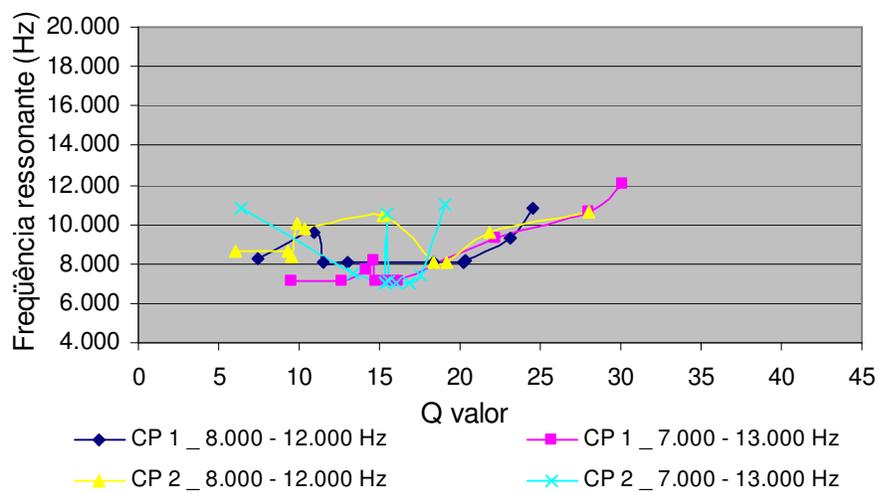


Figura 46 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 2 aos 62 dias

Para os resultados de frequência ressonante encontrados nas faixas de 8.000 a 12.000Hz e 7.000 a 13.000Hz o módulo de elasticidade médio foi 40,00 e 39,87GPa, respectivamente.

Para o traço 3 aos 19 dias foram obtidos resultados uniformes apresentados na Figura 47.

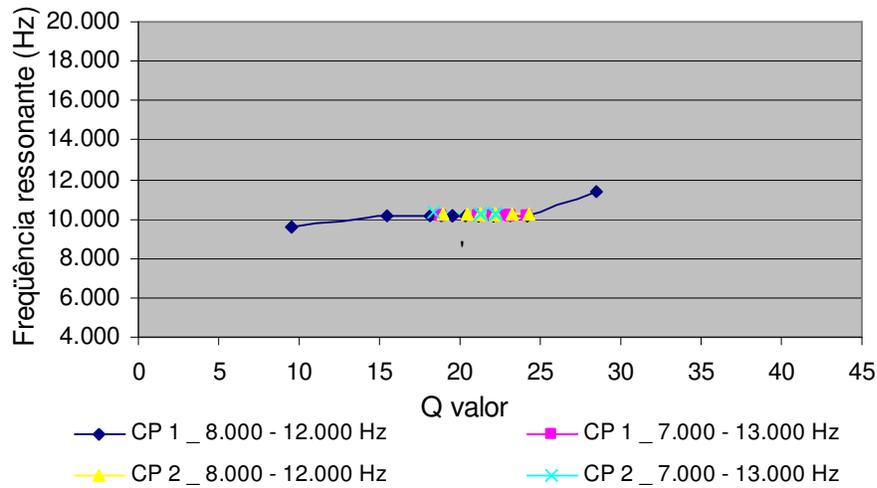


Figura 47 - Variação da frequência longitudinal lida em função do Q-valor para o traço 3 aos 19 dias

Para os resultados de frequência ressonante encontrados nas faixas de 8.000 a 12.000Hz e 7.000 a 13.000Hz o módulo de elasticidade médio foi 51,40 e 51,41GPa, respectivamente.

É válido ressaltar que as Figuras 59 e 60 apresentam vinte leituras para cada faixa de frequência. Nas figuras aparentemente são apresentadas poucas leituras devido ao fato das mesmas terem apresentado valores de frequência ressonante e Q-valor iguais.

Comparando os valores encontrados, na Figura 48, percebe-se que o módulo de elasticidade dinâmico encontrado foi maior que o módulo estático, exceto para o traço 1, que não foi ensaiado dentro dos parâmetros de ensaio que apresentaram resultados uniformes. Esses resultados são coerentes, pois definindo o módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade da propagação de ondas ultra-sonoras,

ou da determinação da frequência natural do material, a tensão aplicada durante a vibração do corpo-de-prova é desprezível e o módulo de elasticidade dinâmico será referido a um efeito puramente elástico (COUTINHO e GONÇALVES, 1994).

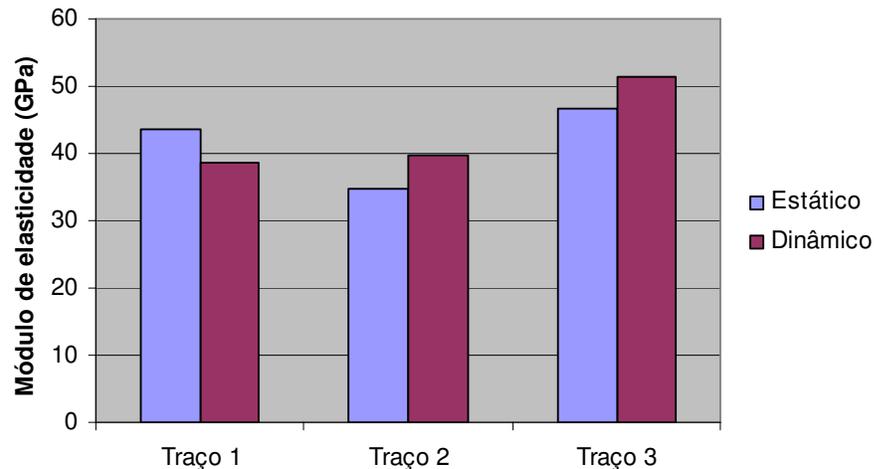


Figura 48 - Comparação entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos

A relação apresentada entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico foi 0,87 e 0,91 para os traços 2 e 3, respectivamente.

4.3. Simulação computacional

4.3.1. Dados apresentados nos corpos-de-prova com bases paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal

Na simulação computacional foram desenhados inicialmente os corpos-de-prova com as bases totalmente planas, paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal sem o uso do capeamento. Dados da simulação como resistência à compressão, deformação do conjunto e tempo de ruptura para os três traços podem ser vistos na Tabela 44.

Tabela 44 - Dados resultantes da simulação do *Deform* para os três traços

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Deformação absoluta (mm)	Deformação relativa (mm/mm)	Tempo de ruptura (s)
1	45,71	0,485	0,002425	141
2	35,52	0,545	0,002725	158
3	68,50	0,670	0,003350	194

A resistência à compressão e a deformação foram extraída com base no gráfico carregamento versus deformação gerado pelo *Deform*, conforme pode ser visto na Figura 49.

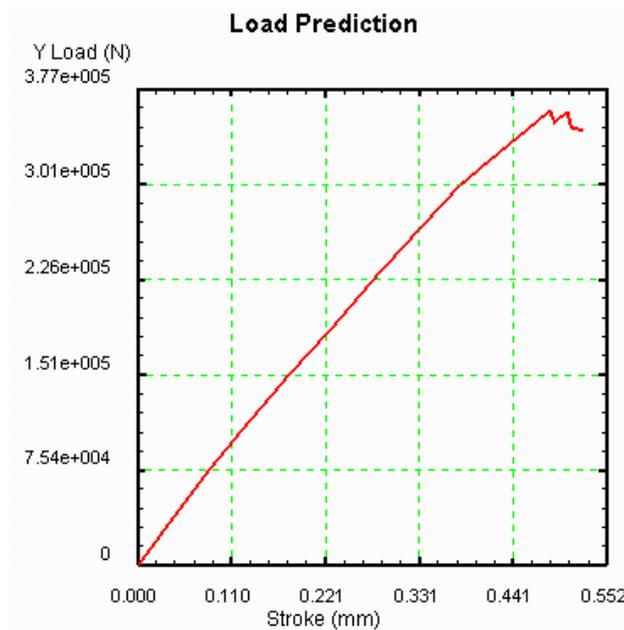


Figura 49 - Previsão de carregamento em função da deformação no corpo-de-prova com bases regulares e sem capeamento do traço 1

O tempo pode ser extraído com base no gráfico carregamento versus tempo gerado pelo *Deform*, conforme pode ser visto na Figura 50.

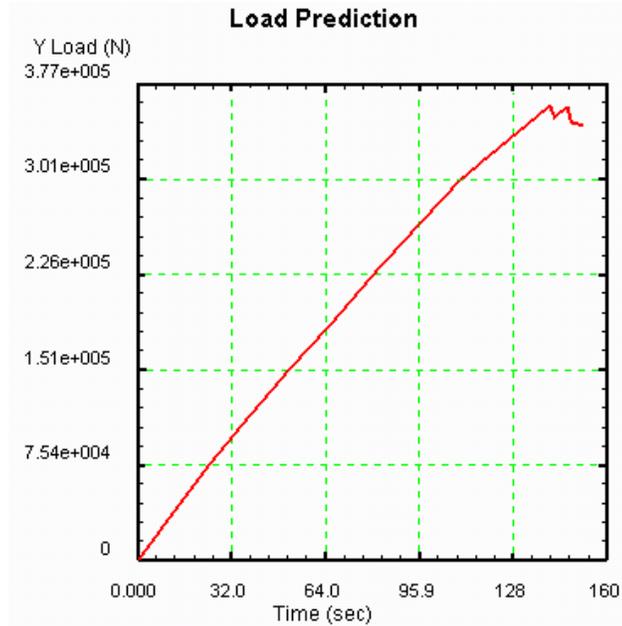


Figura 50 - Previsão de carregamento em função do tempo no corpo-de-prova com bases regulares e sem capeamento do traço 1

Com inserção dos capeamentos os resultados apresentados na simulação variaram significativamente. Para demonstrar essa variação serão apresentados os dados do traço 1 com o corpo-de-prova com as bases totalmente planas com os diferentes materiais de capeamento na Tabela 45.

Tabela 45 - Dados resultantes da simulação do *Deform* para o traço 1 com capeamentos

Capeamento	Resistência à compressão (MPa)	Deformação absoluta (mm)	Deformação relativa (mm/mm)	Tempo de ruptura (s)
Sem	45,71	0,485	0,002425	141,0
1	23,55	0,285	0,001397	84,1
2	47,74	0,515	0,002525	149,0
3	16,55	0,165	0,000809	47,8
4	47,87	0,530	0,002598	154,0

Cruzando as propriedades do material de capeamento com os resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova obtidos pela simulação podemos encontrar correlações, como pode ser visto na Tabela 46.

Tabela 46 - Resultados da simulação do traço 1 em função das propriedades do material de capeamento

		Resistência à compressão do capeamento	
		20 MPa	90 MPa
Módulo de elasticidade do capeamento	20 GPa	Capeamento 1 Resistência alcançada pelo corpo-de-prova do traço 1 = 23,55 MPa	Capeamento 4 Resistência alcançada pelo corpo-de-prova do traço 1 = 47,87 MPa
	60 GPa	Capeamento 3 Resistência alcançada pelo corpo-de-prova do traço 1 = 16,55 MPa	Capeamento 2 Resistência alcançada pelo corpo-de-prova do traço 1 = 47,74 MPa

Percebe-se que a resistência à compressão do capeamento influenciou positivamente na resistência à compressão alcançada pelo corpo-de-prova de forma significativa. Já o módulo de elasticidade do capeamento teve uma leve influência negativa na resistência à compressão alcançada pelo corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova com os capeamentos 2 e 4 alcançaram carregamentos maiores e a ruptura foi de forma mais repentina, conforme pode ser visto na Figura 51.

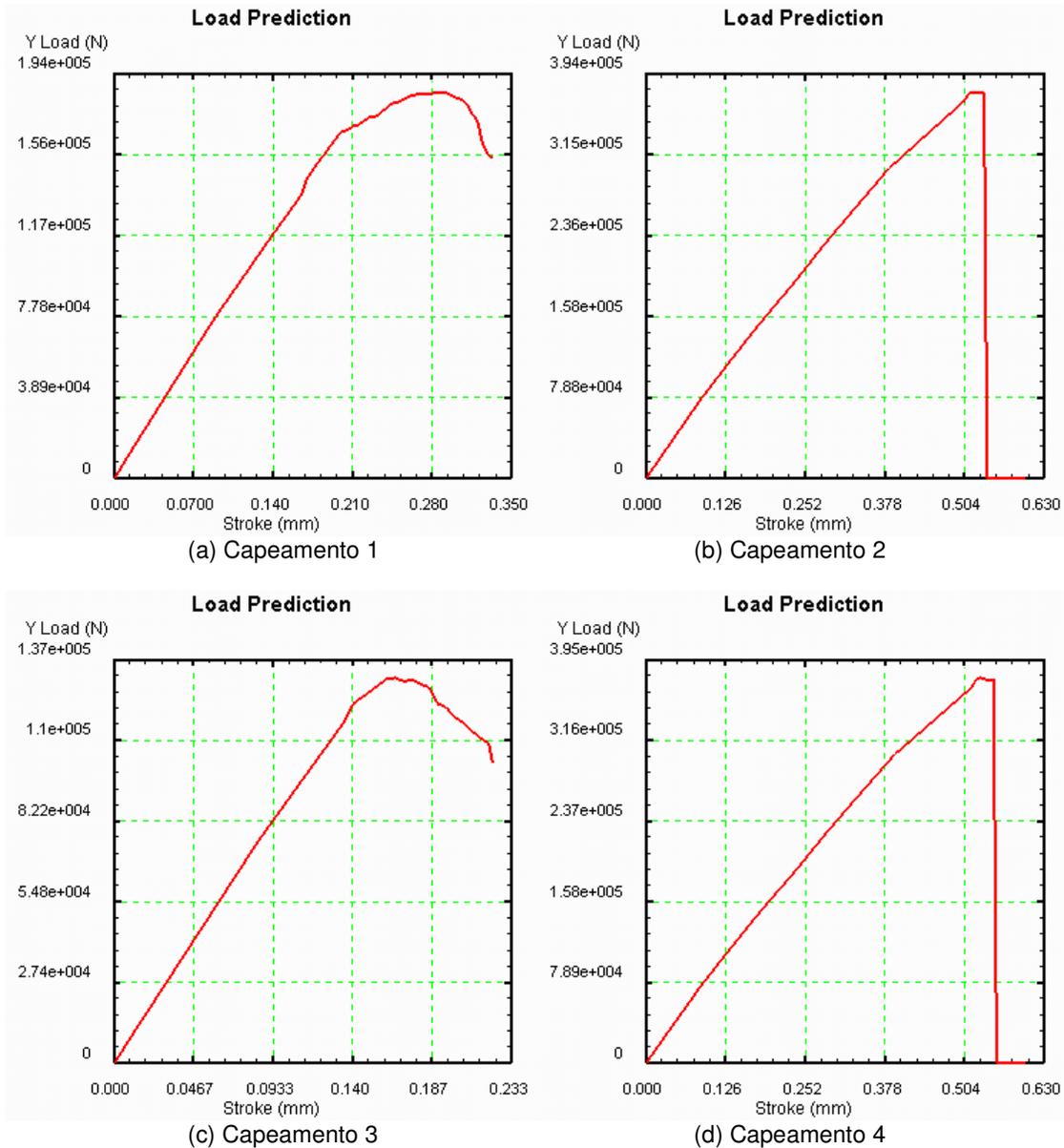


Figura 51 - Curva carregamento-deformação do traço 1 com os capeamentos

Os demais traços apresentaram resultados parecidos com os resultados apresentados na simulação do traço 1 conforme pode ser visto na Tabela 47.

Tabela 47 - Dados resultantes da simulação do *Deform* para os traços 2 e 3

Traço	Capecamento	Resistência à compressão (MPa)	Deformação absoluta (mm)	Deformação relativa (mm/mm)	Tempo de ruptura (s)
2	Sem	35,52	0,545	0,002725	158
2	1	22,28	0,515	0,002775	149
2	2	36,92	0,550	0,002750	159
2	3	23,30	0,530	0,002650	154
2	4	37,05	0,560	0,002800	162
3	Sem	68,50	0,670	0,003350	194,0
3	1	24,57	0,255	0,001275	73,9
3	2	67,74	0,705	0,003525	204,0
3	3	17,06	0,155	0,000775	44,9
3	4	71,68	0,730	0,003650	212,0

Os capecamentos que apresentaram melhores resultados na simulação do ensaio de resistência à compressão foram os com maiores resistência à compressão e módulo de elasticidade menor que os concretos simulados.

4.3.2. Dados apresentados nos corpos-de-prova com bases não paralelas e não perpendiculares ao eixo longitudinal

Na simulação computacional foram desenhados, em um segundo momento, os corpos-de-prova com as bases planas, mas não paralelas e não perpendiculares ao eixo longitudinal com o uso do capecamento. Na Figura 52 pode ser visto as irregularidades das bases.

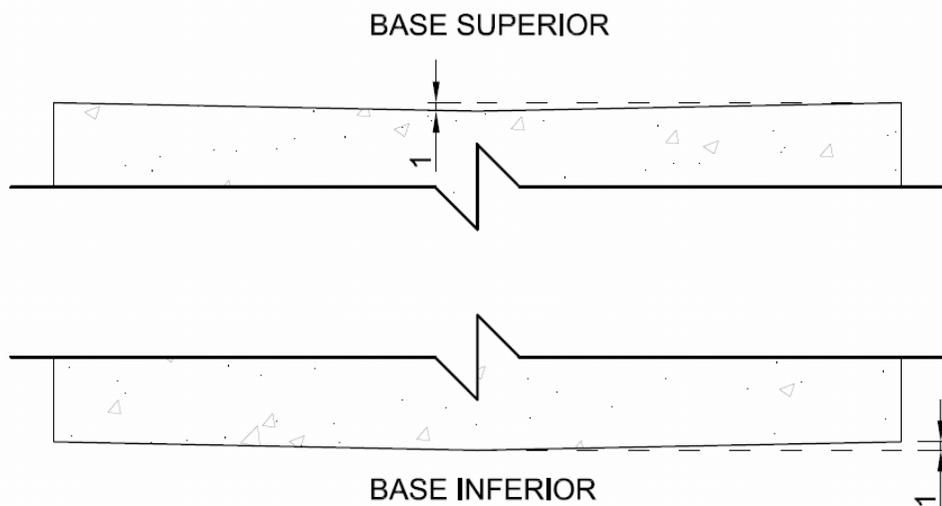


Figura 52 - Irregularidades das bases do corpo-de-prova

Os traços apresentaram resultados conforme pode ser visto na Tabela 48.

Tabela 48 - Dados resultantes da simulação do *Deform* com o corpo-de-prova com as bases irregulares para os traços 1, 2 e 3

Traço	Capecamento	Resistência à compressão (MPa)	Deformação absoluta (mm)	Deformação relativa (mm/mm)	Tempo de ruptura (s)
1	1	23,30	0,260	0,00130	75,4
1	2	47,75	0,510	0,00255	148,0
1	3	18,46	0,185	0,00093	53,6
1	4	47,75	0,520	0,00260	151,0
2	1	19,99	0,250	0,00125	72,5
2	2	36,92	0,540	0,00270	157,0
2	3	12,32	0,145	0,00073	42,0
2	4	37,05	0,555	0,00278	161,0
3	1	23,94	0,240	0,00120	69,6
3	2	68,37	0,700	0,00350	203,0
3	3	14,38	0,123	0,00062	35,5
3	4	71,56	0,720	0,00360	209,0

Comparando os dados encontrados de resistência à compressão na simulação para os corpos-de-prova com bases regulares e irregulares percebemos que os capecamentos 2 e 4 foram os que obtiveram os melhores resultados em ambas as situações nos três traços, conforme pode ser visto na Figura 53.

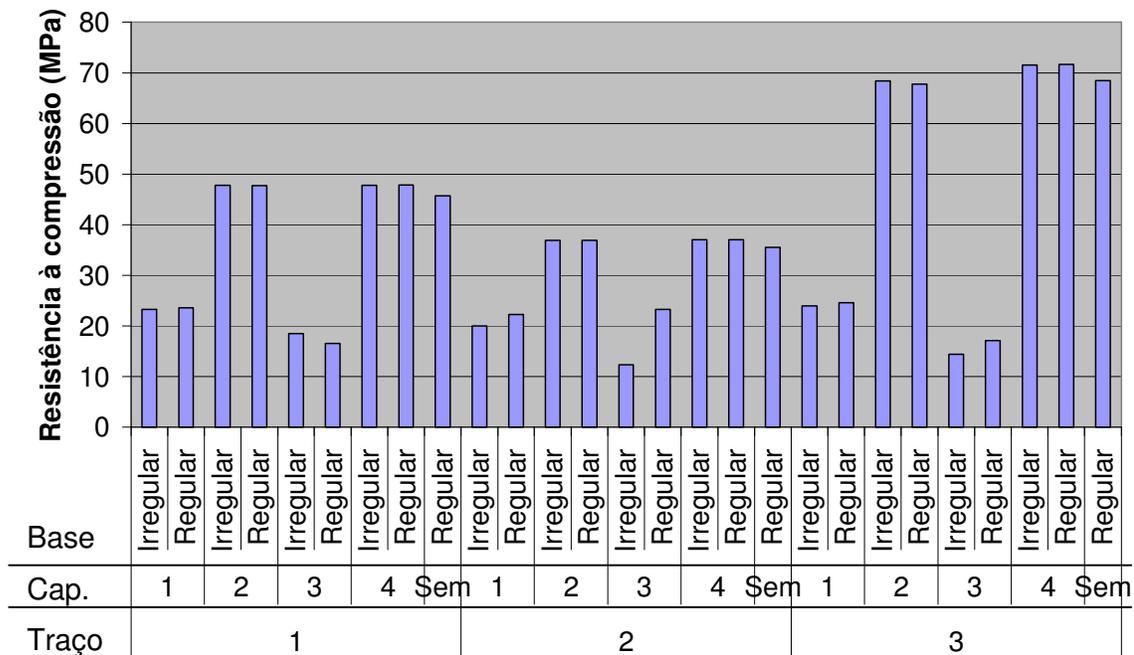


Figura 53 - Resistência à compressão da simulação para os corpos-de-prova com bases regulares e irregulares

Para os capeamentos 2 e 4, que possuem resistência à compressão maiores que o material ensaiado, foram apresentados resultados de resistência à compressão maiores para os corpos-de-prova. Próximos dos resultados encontrados para o corpo-de-prova com base regular sem capeamento.

4.3.3. Dados apresentados com o equipamento não rígido

Para simular equipamentos de ensaio com rigidezes diferentes foram aplicados materiais metálicos diversos nos pratos ou matrizes de compressão na simulação.

Inseridas matrizes de compressão com os aços de baixo teor de carbono AISI 1020, alto teor de carbono AISI 1095 (900-1200 C°), baixa liga AISI 5120 COLD (20-800 C°), baixa liga AISI 9261 (900-1200 C°) e Alumínio AL-1100 COLD (20C°), não foram percebidas diferenças entre as matrizes nos resultados de resistências à compressão encontrados para os corpos-de-prova dos três traços.

5. CONCLUSÕES

Com base nos experimentos realizados com corpos-de-prova capeados com diferentes tipos e materiais de capeamento o presente trabalho conclui que:

- a) dentro três tipos e materiais utilizados no capeamento os que apresentaram melhores resultados foram os capeamentos com enxofre e os capeamentos elastoméricos com almofada de neoprene com espessura de 10 mm e durezas de 68 e 78 shore A, utilizando reforço metálico para confinamento;
- b) o desempenho do reforço metálico para confinamento nos capeamentos elastoméricos pode influenciar significativamente os resultados de resistência à compressão para concreto de alta resistência;
- c) o capeamento elastomérico com almofadas de neoprene não confinado não apresentou resultados satisfatórios de resistência à compressão do concreto;
- d) apesar da ASTM C 1231/C 1231M prever o uso de almofadas de neoprene com espessura de 13 ± 2 mm, as almofadas com 10 mm de espessura utilizadas apresentaram resultados satisfatórios;
- e) a tentativa de utilizar capeamento elastomérico com neoprene de espessuras menores que 10 mm com e não confinado não alcançou resultados satisfatórios de resistência à compressão;
- f) a utilização de almofadas de areia apresentou resultado aproximadamente de 83% da maior média entre os capeamentos para o traço 1 e aproximadamente de 90% da maior média entre os capeamentos para o traço 2. Isso pode ter ocorrido devido ao fato dos

dispositivos utilizados não serem os mais apropriados, necessitando mais estudos para uma conclusão decisiva;

- g) a utilização de moldes de resina apresentou resultados de resistência à compressão dos concretos abaixo do esperado. Isso pode ter ocorrido devido ao fato dos dispositivos utilizados não serem os mais apropriados, necessitando mais estudos para uma conclusão decisiva;
- h) o tipo e o material de capeamento podem influenciar significativamente nos resultados do ensaio de resistência à compressão em concretos.
- i) com o aumento da velocidade de aplicação do carregamento, os resultados do ensaio de resistência à compressão de um mesmo concreto tende a aumentar;

Com base na simulação computacional realizada com corpos-de-prova capeados com materiais de diferentes propriedades o presente trabalho conclui que:

- a) o material de capeamento deve possuir resistência à compressão maior que o concreto a ser ensaiado;
- b) diferentemente do relatado na literatura, não há necessidade do módulo de elasticidade do material de capeamento ser maior que o módulo de elasticidade do concreto a ser ensaiado;
- c) as propriedades do material de capeamento podem influenciar significativamente os resultados do ensaio de resistência à compressão em concretos.

Com base na simulação computacional realizada com pratos de compressão em diferentes rigidezes o presente trabalho conclui que:

- a) a rigidez da matriz de compressão não influencia os resultados de resistência à compressão de concretos usuais.

6. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS

Para novos estudos relacionados ao presente trabalho são sugeridos os seguintes temas:

- a) Influência da preparação do enxofre fundido na resistência à compressão e módulo de elasticidade do capeamento;
- b) Influência da dureza e espessura da almofada de neoprene na resistência à compressão de concretos ensaiados com capeamento elastomérico;
- c) Influência da base metálica na resistência à compressão de concretos ensaiados com capeamento elastomérico;
- d) Influência do capeamento no ensaio de módulo de elasticidade estático;
- e) Correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico para concretos de várias faixa de resistência à compressão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 363.2R-98** - Guide to quality control and testing of High-Strength Concrete. ACI Committee 363, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1231/C 1231M** - Standard practice for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 215** - Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 39** - Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 617** - Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 1998 (Reapproved 2003).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738/2003** - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.03 - Comissão de Estudo de Ensaios Físicos para Concreto Fresco, Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739/1994** – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT/CB-18 - Comitê

Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Ensaio Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118/2004** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215/1996** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:104.03 - Comissão de Estudo de Métodos de Ensaio de Cimento Portland, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7456/1982** - Plástico - Determinação da dureza Shore, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522/2003** - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Métodos de Ensaio Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953/1992** - Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:305.02 - Comissão de Estudo de Classificação de Concretos, Rio de Janeiro, 1992.

BLICK, R. L., - **Some factors influencing high-strength concrete**. Modern Concrete, V. 36, N° 12, Apr. 1973.

BOULAY, C. - **Capping HPC cylinders with the Sand Box: New developments**. Proceedings, Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, France, May 1996.

BOULAY, C., and DE LARRARD, F. - **The Sand-Box, A new capping system for testing HPC cylinders**. Concrete International, V. 15, N° 4, Apr. 1993.

- BUCHER, H. R. E. e RODRIGUES FILHO, H. C. - **Argamassas de enxofre para capeamento de corpos de prova**. Seminário sobre controle de resistência do concreto, IBRACON, São Paulo, 1983.
- CARINO, N. J.; GUTHRIE, W. F.; and LAGERGREN, E. S. - **Effects of Testing Variables on the Measured Compressive Strength of High-Strength (90 MPa) Concrete**. NISTIR 5405, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., Oct. 1994.
- COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 77:96** - Concreto - Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão. CSM 05 – Comitê Setorial de Cimento e Concreto, 1996.
- COUTINHO, A. S. e GONÇALVES, A. - **Fabrico e propriedades do betão**. Volume III, 2° Ed, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1994.
- FORSTIE, D. A., and SCHNORMEIER, R. - **Development and use of 4 by 8 inch concrete cylinders in Arizona**. Concrete International, V. 3, No. 7, July 1981.
- GERMANN INSTRUMENTS - **NDT Systems for durability assessment, service life estimation, fast-track construction, corrosion survey, structural integrity, repair quality, structural monitoring**, Catalog NDT-2007. Copenhagen, Denmark, 2007.
- LIMA, F. B. e BARBOSA, A. H. - **Influência do tamanho e do tipo do corpo-de-prova na resistência à compressão do concreto**. 44° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Belo Horizonte, 2002.
- MARCO, F. F.; REGINATTO, G. M. e JACOSKI, C. A. - **Estudo comparativo entre capeamento de neoprene, enxofre e pasta de cimento para corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. 45° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Vitória, 2003.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. - **Concrete: Microstructure, properties and materials**, 2001.

- PATNAIK A. K. e PATNAIKUNI I. - **Correlation of strength of 75 mm diameter and 100 mm diameter cylinders for high strength concrete.** Cement and Concrete Research 32, p. 607–613, 2002.
- PISTILLI, M. F., AND WILLEMS, T., - **Evaluation of Cylinder Size and Capping Method in Compression Strength Testing of Concrete.** Cement, Concrete and Aggregates, V. 15, N° 1, 1993.
- ROCHA, G. G. N. - **Novo sistema de moldagem de corpos de prova destinados ao controle tecnológico do concreto.** 44° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Belo Horizonte, 2002.
- ROSENBAUM, D. B., - **Is concrete becoming too strong to test?** Engineering News Record, V. 224, No. 3, Jan. 1990.
- SCANDIUZZI, L. e ANDRIOLO, F. R. - **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.** Pini, São Paulo, 1986.
- UTAH DEPARTMENT OF TRANSPORTATION / TRANSPORTATION TECHNICIAN QUALIFICATION PROGRAM. **Use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders for ASTM C 1231.** Concrete Strength Testing, UDOT/TTQP, 2003.
- UTAH DEPARTMENT OF TRANSPORTATION / TRANSPORTATION TECHNICIAN QUALIFICATION PROGRAM. **Capping concrete test specimens for AASHTO T 231.** Concrete Strength Testing, UDOT/TTQP, 2005.
- VIEIRA, A. P. - **Procedimento para a realização do controle tecnológico de concreto usando o novo método de capeamento “Unbonded - cap”.** L.A. Falcão Bauer, São Paulo, 1991.

8. APÊNDICES

8.1. Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 1

Tipo de capeamento	Velocidade de carregamento				Carga de ruptura (kgf)						Tensão de ruptura (MPa)					
	Mostrador do Equipam.	Tempo aprox. (s)	kgf/s	MPa/s	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefic. Var. (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio-Padrão	Coefic. Var. (%)
Enxofre puro	2	80,00	472,5	0,59	38349	38726	36328	37801	1289,5	3,411	47,90	48,37	45,38	47,22	1,61	3,411
Enxofre puro	4	21,33	1738,6	2,17	30435	42123	38714	37091	6010,7	16,205	38,01	52,61	48,36	46,33	7,51	16,205
Enxofre puro	6	10,00	3802,0	4,75	37302	39359	37399	38020	1160,6	3,053	46,59	49,16	46,71	47,49	1,45	3,053
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2	166,00	225,0	0,28	38130	37484	36413	37342	867,2	2,322	47,63	46,82	45,48	46,64	1,08	2,322
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	4	41,00	967,3	1,21	41027	38069	39883	39660	1491,6	3,761	51,24	47,55	49,82	49,54	1,86	3,761
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	6	19,67	2023,6	2,53	38105	41697	39590	39797	1805,0	4,535	47,59	52,08	49,45	49,71	2,25	4,535
Neoprene 10 mm - 78 Sh A - Capeador 2	2	150,67	258,5	0,32	38982	38933	38945	38953	25,5	0,066	48,69	48,63	48,64	48,65	0,03	0,066
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	127,33	259,0	0,32	31994	31275	35662	32977	2352,9	7,135	39,96	39,06	44,54	41,19	2,94	7,135
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	78,67	332,0	0,41	29778	22364	26199	26114	3707,7	14,198	37,19	27,93	32,72	32,62	4,63	14,198
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Sem anel	2	344,67	48,2	0,06	12734	11785	25322	16614	7556,6	45,484	15,91	14,72	31,63	20,75	9,44	45,484
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	101,67	213,8	0,27	22133	22000	21074	21736	576,9	2,654	27,65	27,48	26,32	27,15	0,72	2,654
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	70,00	308,8	0,39	23046	19807	21987	21613	1651,5	7,641	28,79	24,74	27,46	27,00	2,06	7,641
Anel com areia IPT e parafina	2	146,00	222,3	0,28	34952	33248	29169	32456	2971,7	9,156	43,66	41,53	36,43	40,54	3,71	9,156

8.2. Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 2

Tipo de capeamento	Velocidade de carregamento				Carga de ruptura (kgf)						Tensão de ruptura (MPa)					
	Mostrador do Equipam.	Tempo aprox. (s)	kgf/s	MPa/s	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefic. Var. (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio-Padrão	Coefic. Var. (%)
Enxofre puro	2	55,00	461,5	0,58	24312	24482	27355	25383	1709,9	6,736	30,37	30,58	34,17	31,70	2,14	6,736
Enxofre puro	4	15,33	1644,6	2,05	24178	25797	25675	25217	901,6	3,575	30,20	32,22	32,07	31,50	1,13	3,575
Enxofre puro	6	8,22	3329,4	4,16	28074	26321	27708	27368	924,7	3,379	35,07	32,88	34,61	34,18	1,16	3,379
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2	101,00	267,2	0,33	27928	26455	26576	26986	817,7	3,030	34,88	33,04	33,19	33,71	1,02	3,030
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	4	36,00	754,1	0,94	25651	28950	26844	27148	1670,4	6,153	32,04	36,16	33,53	33,91	2,09	6,153
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	6	18,00	1516,5	1,89	27209	27380	27300	27296	85,6	0,313	33,99	34,20	34,10	34,09	0,11	0,313
Neoprene 10 mm - 78 Sh A - Capeador 2	2	137,67	183,8	0,23	27721	22778	25395	25298	2472,9	9,775	34,62	28,45	31,72	31,60	3,09	9,775
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	112,00	187,4	0,23	17941	20696	24324	20987	3201,4	15,254	22,41	25,85	30,38	26,21	4,00	15,254
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Capeador 2	2	67,33	288,6	0,36	18531	20027	19747	19435	795,3	4,092	23,15	25,01	24,66	24,28	0,99	4,092
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Sem anel	2	299,00	21,3	0,03	6100	6200	6805	6368,3	381,5	5,990	7,62	7,74	8,50	7,95	0,48	5,990
Neoprene 5 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	91,33	150,3	0,19	14134	12418	14621	13724	1157,2	8,432	17,65	15,51	18,26	17,14	1,45	8,432
Neoprene 3 mm - 82 Sh A - Sem anel	2	69,33	228,4	0,29	16423	14183	16898	15835	1450,0	9,157	20,51	17,72	21,11	19,78	1,81	9,157
Anel com areia IPT e parafina	2	120,67	202,2	0,25	24945	25249	22997	24397	1221,9	5,009	31,16	31,54	28,72	30,47	1,53	5,009

8.3. Dados do ensaio de resistência à compressão do traço 3

Tipo de capeamento	Velocidade de carregamento				Carga de ruptura (kgf)						Tensão de ruptura					
	Mostrador do Equipam.	Tempo aprox. (s)	kgf/s	MPa/s	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefic. Var. (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coefic. Var. (%)
Enxofre puro	2	93,33	603,3	0,75	56637	55977	56306	56307	330,0	0,586	70,74	69,92	70,33	70,33	0,41	0,586
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1 (Reutilizada)	2,7	117,33	514,2	0,64	64048	55356	61601	60335	4482,2	7,429	80,00	69,14	76,94	75,36	5,60	7,429
Neoprene 10 mm - 68 Sh A - Capeador 1	2,7	101,00	612,5	0,77	61930	61711	61954	61865	133,9	0,216	77,35	77,08	77,38	77,27	0,17	0,216
Neoprene 10 mm - 78 Sh A - Capeador 2	2,7	173,33	341,0	0,43	59097	59702	58509	59103	596,5	1,009	73,81	74,57	73,08	73,82	0,75	1,009
Sem capeamento (Molde de resina)	2	67,33	492,0	0,61	37557	34051	27781	33130	4952,7	14,949	46,91	42,53	34,70	41,38	6,19	14,949

8.4. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 1 aos 29 dias

8.4.1. Corpo-de-prova 1

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	5.000	20.000	0,10	1	20	10.980	10.880	11.380	21,96	46.235	46,23
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.080	5.000	5.480	10,58	9.897	9,90
1	5.000	20.000	0,10	1	20	10.960	10.860	11.360	21,92	46.067	46,07
1	5.000	20.000	0,10	1	20	10.960	10.880	11.360	22,83	46.067	46,07
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.060	5.000	5.480	10,54	9.819	9,82
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.060	5.000	5.480	10,54	9.819	9,82
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.060	5.000	5.500	10,12	9.819	9,82
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.060	5.000	5.500	10,12	9.819	9,82
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.060	5.000	5.480	10,54	9.819	9,82
1	5.000	20.000	0,10	1	20	5.100	5.020	5.520	10,20	9.975	9,97
2	6.000	20.000	0,10	1	20	13.800	13.780	14.200	32,80	73.034	73,03
2	6.000	20.000	0,10	1	20	16.040	15.980	16.380	40,10	98.667	98,67
2	6.000	20.000	0,10	1	20	7.800	7.580	9.060	5,27	23.332	23,33
2	6.000	20.000	0,10	1	20	14.020	14.000	14.380	36,89	75.381	75,38
2	6.000	20.000	0,10	1	20	6.800	6.400	7.180	8,72	17.733	17,73
2	6.000	20.000	0,10	1	20	18.260	18.180	19.160	18,63	127.869	127,87
2	6.000	20.000	0,10	1	20	15.400	15.280	16.200	16,74	90.951	90,95
2	6.000	20.000	0,10	1	20	15.400	15.360	16.060	22,00	90.951	90,95
2	6.000	20.000	0,10	1	20	6.980	6.780	7.960	5,92	18.684	18,68
2	6.000	20.000	0,10	1	20	8.440	7.300	8.780	5,70	27.318	27,32
3	7.000	20.000	0,10	1	20	10.980	10.880	11.380	21,96	46.235	46,23
3	7.000	20.000	0,10	1	20	10.960	10.860	11.380	21,08	46.067	46,07
3	7.000	20.000	0,10	1	20	10.960	10.860	11.360	21,92	46.067	46,07
3	7.000	20.000	0,10	1	20	11.800	11.760	12.180	28,10	53.399	53,40
3	7.000	20.000	0,10	1	20	7.100	7.020	7.420	17,75	19.332	19,33
3	7.000	20.000	0,10	1	20	14.760	14.420	15.080	22,36	83.548	83,55
3	7.000	20.000	0,10	1	20	7.200	7.000	7.740	9,73	19.881	19,88
3	7.000	20.000	0,10	1	20	14.400	14.320	14.780	31,30	79.523	79,52
3	7.000	20.000	0,10	1	20	10.800	10.500	11.180	15,88	44.731	44,73
3	7.000	20.000	0,10	1	20	12.520	12.140	12.840	17,89	60.114	60,11
4	8.000	20.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.400	20,15	24.914	24,91
4	8.000	20.000	0,10	1	20	10.020	9.980	10.640	15,18	38.504	38,50
4	8.000	20.000	0,10	1	20	15.760	15.600	16.080	32,83	95.253	95,25
4	8.000	20.000	0,10	1	20	18.640	18.340	19.060	25,89	133.247	133,25
4	8.000	20.000	0,10	1	20	14.780	14.700	15.100	36,95	83.775	83,77
4	8.000	20.000	0,10	1	20	9.840	9.420	10.180	12,95	37.133	37,13
4	8.000	20.000	0,10	1	20	9.840	9.420	10.180	12,95	37.133	37,13
4	8.000	20.000	0,10	1	20	8.000	8.000	8.860	9,30	24.544	24,54
4	8.000	20.000	0,10	1	20	11.780	11.620	12.140	22,65	53.218	53,22
4	8.000	20.000	0,10	1	20	8.480	8.280	8.280	12,11	27.578	27,58

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
5	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	8.800	11.080	4,46	39.743	39,74
5	8.000	12.000	0,10	1	20	8.160	8.060	8.460	20,40	25.536	25,54
5	8.000	12.000	0,10	1	20	11.020	11.000	11.380	29,00	46.572	46,57
5	8.000	12.000	0,10	1	20	9.280	8.460	10.080	5,73	33.026	33,03
5	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	9.780	10.720	10,83	39.743	39,74
5	8.000	12.000	0,10	1	20	9.460	9.040	9.780	12,78	34.320	34,32
5	8.000	12.000	0,10	1	20	9.280	8.380	9.580	7,73	33.026	33,03
5	8.000	12.000	0,10	1	20	10.120	9.260	11.120	5,44	39.276	39,28
5	8.000	12.000	0,10	1	20	10.220	10.060	10.740	15,03	40.056	40,06
5	8.000	12.000	0,10	1	20	10.600	10.540	10.980	24,09	43.090	43,09
6	7.000	13.000	0,10	1	20	10.000	9.940	10.400	21,74	38.350	38,35
6	7.000	13.000	0,10	1	20	11.580	11.480	12.020	21,44	51.426	51,43
6	7.000	13.000	0,10	1	20	11.200	11.080	11.580	22,40	48.106	48,11
6	7.000	13.000	0,10	1	20	11.500	11.400	11.980	19,83	50.718	50,72
6	7.000	13.000	0,10	1	20	11.400	11.400	11.780	30,00	49.840	49,84
6	7.000	13.000	0,10	1	20	8.780	8.680	9.220	16,26	29.563	29,56
6	7.000	13.000	0,10	1	20	10.220	10.200	10.840	15,97	40.056	40,06
6	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	9.760	10.560	12,73	39.743	39,74
6	7.000	13.000	0,10	1	20	7.220	7.200	7.580	19,00	19.991	19,99
6	7.000	13.000	0,10	1	20	8.980	8.140	9.640	5,99	30.926	30,93

8.4.2. Corpo-de-prova 2

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	25.119	25,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.600	8.420	9.980	6,15	35.634	35,63
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.380	9.280	10.320	9,02	34.020	34,02
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	25.119	25,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.440	18,32	25.119	25,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.560	8.440	9.400	8,92	28.332	28,33
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.540	8.040	10.180	4,46	35.190	35,19
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.040	8.000	8.380	21,10	24.994	24,99
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	25.119	25,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.440	18,32	25.119	25,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.420	16,81	19.272	19,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.560	7.400	10.580	30,10	35.338	35,34
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.400	17,65	19.272	19,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.040	7.000	7.380	18,53	19.163	19,16
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.400	17,65	19.272	19,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.400	17,65	19.272	19,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.820	9.560	10.400	11,69	37.286	37,29
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.420	16,81	19.272	19,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.780	10.600	11.100	21,56	44.933	44,93
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.420	16,81	19.272	19,27

8.5. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 30 dias

8.5.1. Corpo-de-prova 1

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.600	9.300	10.220	10,43	35.296	35,30
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.540	8.420	8.820	21,35	27.932	27,93
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.380	8.380	21,21	24.880	24,88
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.980	9.860	10.260	24,95	38.146	38,15
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.020	10.000	10.380	26,37	38.452	38,45
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.200	8.760	10.960	4,18	32.416	32,42
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	24.880	24,88
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.260	10.020	10.580	18,32	40.316	40,32
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.700	10.580	11.000	11,00	43.849	43,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.200	9.940	10.800	11,86	39.846	39,85
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.380	18,58	19.090	19,09
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.840	7.800	8.180	20,63	23.541	23,54
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.940	9.860	1.024	26,16	37.841	37,84
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.200	10.040	1.154	6,80	39.846	39,85
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.800	7.800	8.180	20,53	23.301	23,30
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.040	7.000	7.380	18,53	18.982	18,98
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.760	10.540	11.060	20,69	44.342	44,34
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.320	8.980	10.480	6,21	33.267	33,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.120	10.060	10.440	26,63	39.224	39,22
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.380	18,58	19.090	19,09

8.5.2. Corpo-de-prova 2

Tentativa	F _s (Hz)	F _e (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	F _r (Hz)	F _l (Hz)	F _h (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.040	9.000	9.600	15,07	31.265	31,27
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.400	10.000	10.380	26,42	41.380	41,38
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.400	20,15	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.420	19,19	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.380	10.320	10.740	24,71	41.221	41,22
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.400	20,15	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.060	8.000	8.380	21,21	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.980	9.900	1.030	26,26	38.105	38,11
1	8.000	12.000	0,10	1	20	6.060	8.000	8.400	20,15	14.050	14,05
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.720	10.600	11.620	10,51	43.966	43,97
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.380	18,58	19.069	19,07
2	7.000	13.000	0,10	1	20	12.600	12.560	12.960	31,50	60.739	60,74
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.380	18,58	19.069	19,07
2	7.000	13.000	0,10	1	20	8.100	7.460	8.760	6,23	25.101	25,10
2	7.000	13.000	0,10	1	20	12.120	11.940	12.400	26,35	56.199	56,20
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.060	7.000	7.400	17,65	19.069	19,07
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.800	9.800	10.240	22,27	36.743	36,74
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.200	10.720	11.660	11,91	47.991	47,99
2	7.000	13.000	0,10	1	20	12.120	12.020	12.400	31,89	56.199	56,20

8.6. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 56 dias

8.6.1. Corpo-de-prova 1

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.780	10.680	11.120	24,50	44.507	44,51
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.600	9.260	10.140	10,91	35.296	35,30
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.080	8.000	8.700	11,54	25.004	25,00
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.100	8.020	8.460	18,41	25.128	25,13
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.260	8.040	9.580	23,15	32.841	32,84
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.120	8.000	8.440	20,30	25.252	25,25
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.280	8.000	9.120	7,39	26.257	26,26
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.080	8.000	8.400	20,20	25.004	25,00
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.080	8.000	8.400	20,20	25.004	25,00
1	8.000	12.000	0,10	1	20	8.080	8.000	8.620	13,03	25.004	25,00
2	7.000	13.000	0,10	1	20	8.200	8.180	8.740	14,64	25.752	25,75
2	7.000	13.000	0,10	1	20	9.320	9.220	9.640	22,19	33.267	33,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.100	7.020	7.500	14,79	19.307	19,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	12.040	11.980	12.380	30,10	55.519	55,52
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.100	7.000	7.460	15,43	19.307	19,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.100	7.000	7.560	12,68	19.307	19,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.660	10.600	10.980	28,05	43.521	43,52
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.100	7.020	7.460	16,14	19.307	19,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.680	7.460	8.000	14,22	22.590	22,59
2	7.000	13.000	0,10	1	20	7.080	7.000	7.740	9,57	19.198	19,20

8.6.2. Corpo-de-prova 2

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	9.780	9.720	10.660	10,40	36.593	36,59
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.400	10.100	10.780	15,29	41.380	41,38
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	9.600	9.540	9.980	21,82	35.259	35,26
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	8.400	8.340	9.220	9,55	26.995	27,00
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	8.600	8.060	8.980	9,35	28.296	28,30
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	8.600	8.300	9.720	6,06	28.296	28,30
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.100	9.440	10.460	9,90	39.027	39,03
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.640	10.600	10.980	28,00	43.312	43,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	8.060	8.000	8.440	18,32	24.854	24,85
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	8.060	8.000	8.420	19,19	24.854	24,85
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.060	7.000	7.460	15,35	19.069	19,07
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.060	7.000	7.440	16,05	19.069	19,07
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.160	7.040	7.500	15,57	19.613	19,61
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.060	7.000	7.460	15,35	19.069	19,07
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.780	10.200	11.900	6,34	44.459	44,46
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.380	7.300	7.720	17,57	20.837	20,84
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	11.040	10.980	11.560	19,03	46.630	46,63
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.540	10.180	10.860	15,50	42.502	42,50
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.460	7.360	7.920	13,32	21.291	21,29
3	7.000	13.000	0,10	1	20.000	7.060	7.000	7.420	16,81	19.069	19,07

8.7. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 2 aos 62 dias

8.7.1. Corpo-de-prova 1

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.160	10.020	10.480	22,09	39.534	39,53
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	9.880	10.540	15,42	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.080	10.540	22,13	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.160	10.080	10.500	24,19	39.534	39,53
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.040	10.500	22,13	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.040	10.560	19,58	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.060	10.540	21,21	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.060	10.540	21,21	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.520	24,24	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.520	24,24	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.000	10.540	18,85	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	9.560	9.480	10.480	9,56	35.003	35,00
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.000	10.560	18,18	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.040	10.520	21,21	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.160	10.020	10.500	21,17	39.534	39,53
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.020	10.520	20,36	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.400	11.380	11.780	28,50	49.773	49,77
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.020	10.540	19,58	39.690	39,69
1	8.000	12.000	0,10	1	20	10.180	10.000	10.520	19,58	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.120	10.560	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.160	10.080	10.520	23,09	39.534	39,53
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.560	22,13	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.060	10.520	22,13	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.140	10.020	10.480	22,40	39.379	39,38
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.520	24,24	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.160	10.000	10.540	18,81	39.534	39,53
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.560	22,13	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.060	10.540	21,21	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.000	10.540	18,85	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.160	10.060	10.500	23,09	39.534	39,53
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.160	10.040	10.520	21,17	39.534	39,53
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.080	10.520	23,14	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.040	10.520	21,21	39.690	39,69
2	7.000	13.000	0,10	1	20	10.180	10.100	10.540	23,14	39.690	39,69

8.7.2. Corpo-de-prova 2

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.620	24,33	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.640	23,23	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.680	21,29	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.260	10.200	10.740	19,00	40.274	40,27
1	8.000	12.000	0,10	1	20.000	10.260	10.200	10.700	20,52	40.274	40,27
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.680	21,29	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.680	21,33	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.320	10.200	10.760	18,43	40.746	40,75
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.220	10.200	10.660	22,22	39.960	39,96
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12
2	7.000	13.000	0,10	1	20.000	10.240	10.200	10.660	22,26	40.117	40,12

8.8. Dados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o traço 3 aos 19 dias

8.8.1. Corpo-de-prova 1

Tentativa	Fs (Hz)	Fe (Hz)	V (V)	Band	Step (Hz)	Fr (Hz)	Fl (Hz)	Fh (Hz)	Q	Ed (MN/m ²)	Ed (GPa)
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.340	11.220	11.780	20,25	51.134	51,13
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.340	11.240	11.780	21,00	51.134	51,13
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.220	11.780	20,29	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.220	11.780	20,29	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
1	8.000	12.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.220	11.780	20,29	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.220	11.780	20,29	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.260	11.780	21,85	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.240	11.780	21,04	51.315	51,31
2	7.000	13.000	0,10	1	20	11.360	11.280	11.780	22,72	51.315	51,31

