

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG

ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO CONCRETO PRODUZIDO COM ÁGUA TRATADA
MAGNETICAMENTE

AYRTON HUGO DE ANDRADE E SANTOS

BELO HORIZONTE

2006

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM
ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE**

Ayrton Hugo de Andrade e Santos

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG

ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO
CONCRETO PRODUZIDO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE

AYRTON HUGO DE ANDRADE E SANTOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Geras, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ney Amorim Silva
DEES – UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Moysés Costa (Co-Orientador)
Universidade de Itauna

Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira
DEES – UFMG

Prof. Dr. Reginaldo Carneiro da Silva
DEC – UFV

Prof. Msc. Wellerson Romaniello
PUC MINAS (Convidado Especial)

Belo Horizonte, __ de _____ de 2006.

(...) Destino é a gente que faz. Quem faz o destino é a gente. Na mente de quem for capaz.

(Raul Seixas – Messias Indeciso)

A Deus e Nossa Senhora Aparecida que me iluminaram, aos meus pais Ayrton Geraldo Mota Santos e Maria Alice de Andrade e Santos, pelos ensinamentos, dedicação, desprendimento total, amor e carinho. As minhas irmãs Hersília de Andrade e Santos e Isabel Alice de Andrade e Santos pela amizade.

AGRADECIMENTOS

Coragem não é a ausência do medo, mas sim a presença do medo com o desejo de vencê-lo.

Citar nomes é complicado, pois pode-se cometer o equívoco de esquecer de alguns, assim agradeço a todos que de algum modo, em algum momento contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço primeiramente ao prof. Ney Amorim Silva que mais do que a relação de orientador e orientando, acredito que foi para mim um amigo ou pelo menos um grande colega, que me ajudou a crescer profissionalmente e culturalmente.

Ao Prof. Roque Luis da Silva Pitangueira pela disponibilidade nos momentos necessários.

Agradeço ao Departamento de Engenharia de Estruturas, por ter me fornecido meios de concluir esta dissertação. Quando digo o Departamento, me refiro principalmente aos funcionários Maria Inês, Renatinha, Lucíola, Fátima, Patrícia, dentre outros.

Agradeço aos funcionários do LAEES, principalmente ao Geraldo e Erik, que me ajudaram a executar os ensaios.

Agradeço também aos colegas do mestrado, pelo convívio.

E por último, agradeço aos dois grandes amigos, Valquíria e Luciano, que sabem realmente o significado desta palavra.

SUMÁRIO

Apresentação

1. Introdução.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivo específico	3
1.3 Justificativa	4
1.4 Organização da dissertação.....	6
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Água Tratada Magneticamente.....	8
2.2.1 Estrutura da água	8
2.2.2 Parâmetros de potabilidade da água.....	11
2.2.2.1 Impurezas encontradas na água	12
2.2.2.2 Parâmetros de qualidade da água.....	13
2.2.3 Tratamento magnético da água.....	16
2.2.3.1 Princípio do tratamento magnético da água.....	17
2.2.3.2 Histórico da utilização	21
2.3 Concreto convencional	22
2.3.1 Cimento.....	23
2.3.1.1 Cimento Portland: seus constituintes e suas reações de hidratação....	23
2.3.1.2 Principais reações de hidratação do cimento portland.....	24
2.3.1.3 Velocidade da carbonatação	25
2.3.2 Propriedades dos principais componentes do cimento Portland.....	26
2.3.3 Propriedades Físicas e Químicas do Cimento.....	27
2.3.4 Hidrólise dos componentes da pasta de cimento	31
2.3.5 Água como um agente deteriorador.....	32
2.4 Trabalhos Utilizando a água tratada magneticamente no concreto	32
3. Ensaaios e Metodologia	37

3.1	Introdução	37
3.2	Ensaio Não-destrutivo	38
3.2.1	Ultra-som	38
3.2.1.1	Determinação da Homogeneidade do Concreto	43
3.2.1.2	Aparelho para Ultra-sonografia	43
3.3	Ensaio Destrutivo.....	44
3.3.1	Resistência à Compressão.....	45
3.3.2	Módulo de Elasticidade	46
3.4	Procedimento Experimental.....	49
3.4.1	Condicionador físico.....	51
3.4.2	Esquema Experimental Para Magnetização da Água	52
3.4.3	Comprovação da magnetização da água.....	55
3.4.3.1	Ensaio Para Medição do Campo Magnético Gerado Pelo Condicionador Físico	56
3.4.3.2	Ensaio da Tensão Superficial da Água Magnetizada.....	57
3.4.4	Definição dos traços.....	59
3.4.5	Determinação do Número de Corpos-de-Prova.....	60
3.4.6	Propriedades dos Materiais	61
3.4.6.1	Agregados Graúdos / Miúdos	61
3.4.6.2	Cimentos	62
3.4.7	Moldagem dos corpos-de-prova	62
3.4.8	Cura e preparação dos corpos-de-prova.....	65
4.	Análise dos Resultados.....	66
4.1	Introdução	66
4.2	Análise Estatística.....	67
4.2.1	Resistência à compressão – Análise Geral	67
4.2.1.1	Resistência à compressão em função dos componentes do concreto.	77
4.2.1.2	Resistência à compressão – Idade.....	77
4.2.2	Módulo de Elasticidade	80
4.2.3	Trabalhabilidade	82
4.2.4	Velocidade do pulso ultra-sônico	83
4.2.4.1	Compacidade/ Homogeneidade	94

5. Considerações finais e Recomendações.....	96
5.1 Introdução	96
5.2 Considerações finais	96
5.3 Recomendações para trabalhos futuros.....	99
6. Referências Bibliográficas	101
ANEXO A – Relatório de ensaios para a resistência à compressão	106
ANEXO B – Relatório de ensaios para o módulo de elasticidade.....	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1– Modelo da molécula de água	8
FIGURA 2.2– Tipologias da ação da tensão superficial nas moléculas de água junto a sólidos.	10
FIGURA 2.3– Estrutura de gelo.	10
FIGURA 2.4– Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho (SPERLING (1996))	12
FIGURA 2.5– Parte do modelo da água	18
FIGURA 2.6– Esquema da força de Lorentz.....	19
FIGURA 2.7– Trajetória da partícula – (HALLIDAY, 1996).....	20
FIGURA 2.8– Efeito do campo magnético na moléculas de água: (a) Conjunto de moléculas de água termodinamicamente estável; (b) Moléculas de água após a passagem pelo campo magnético.....	34
FIGURA 2.9– Cristais de hidróxido de cálcio na pasta de cimento, preparada com água de torneira. (SU, 2003)	35
FIGURA 2.10– Cristais de hidróxido de cálcio na pasta de cimento, preparada com água tratada magneticamente. (SU, 2003).....	35
FIGURA 3.1– Posicionamento dos transdutores, segundo NBR 8802:1994	41
FIGURA 3.2– Ultra-som V Meter Mark II – James Instruments Inc. Non Destructive Testing Systems	44
FIGURA 3.3– Transdutores de 150 kHz	44
FIGURA. 3.4– Máquina Servo Controlada – PC 200 - EMIC	45
FIGURA 3.5– Máquina DL 3000 – EMIC	47
FIGURA 3.6– Strain Gage.....	48

FIGURA 3.7– Strain Gage afixado ao corpo de prova.....	48
FIGURA 3.8– Gráficos analisando os dados obtidos por SU (2000).....	51
FIGURA 3.9– Condicionador físico.....	51
FIGURA 3.10– Esquema do condicionador físico.....	52
FIGURA 3.11– Croqui do esquema experimental.....	53
FIGURA 3.12– Foto da instalação do esquema experimental.....	54
FIGURA 3.13– Foto da instalação do esquema experimental.....	54
FIGURA 3.14– Bomba centrífuga.....	55
FIGURA 3.15– Medidor de campo magnético – GaussMeter MG-2000.....	56
FIGURA. 3.16– Sonda instalada no GaussMeter MG-2000.....	57
FIGURA 3.17– Tensiômetro Digital k10st - KRUSS.....	58
FIGURA 3.18– Betoneira de 80 Litros.....	63
FIGURA 3.19– Captação da água magnetizada.....	63
FIGURA 3.20– Moldagem dos corpos-de-prova.....	64
FIGURA 3.21–Tronco de cone.....	64
FIGURA 3.22– Desforma do tronco de cone.....	64
FIGURA 3.23– Medição do “Slump”.....	64
FIGURA 3.24– Cura final dos CP’s imersos em água comum.....	65
FIGURA 4.1– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).....	68
FIGURA 4.2– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM).....	70
FIGURA 4.3– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM).....	71

FIGURA 4.4– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM).....	73
FIGURA 4.5– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)	74
FIGURA 4.6– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 11 (CRV-BG-AC) e 12 (CRV-BG-AM).....	76
FIGURA 4.7– Gráfico comparativo da resistência à compressão em função da idade dos corpos-de-prova	78
FIGURA 4.8– Posicionamento das leituras da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova.	84
FIGURA 4.9– Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).....	85
FIGURA 4.10-Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM).....	87
FIGURA 4.11- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 05 (CV-BC-AC) e 06(CV-BC-AM)	88
FIGURA 4.12- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 07(CV-BG-AC) e 08(CV-BG-AM).....	89
FIGURA 4.13- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 09(CVR-BC-AC) e 10(CVR-BC-AM)	90
FIGURA 4.14– <i>Boxplots</i> da velocidade do pulso ultra-sônico - traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)	92
FIGURA 4.15– Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica em função da idade	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1– Forma física preponderante representada pelos parâmetros de qualidade (SPERLIN, 1996).....	13
TABELA 2.2– Principais parâmetros a serem investigados numa análise de água (SPERLING 1996).....	14
TABELA. 2.3– Associação entre os usos da água e os requisitos de qualidade (SPERLING 1996).....	15
TABELA. 2.4 – Algumas propriedades dos principais componentes do cimento Portland.(COSTA, 1999)	27
TABELA 2.5 – Calor de hidratação dos componentes do cimento.....	30
TABELA 3.1– Tolerância de tempos para o ensaio de compressão em função da idade de ruptura (NBR5739:1994)	46
TABELA 3.2– Valores referentes à tensão superficial de amostras de água	58
TABELA. 3.3– Traços em pesos e caracterização dos concretos	60
TABELA 3.4– Caracterização dos agregados	62
TABELA 4.1– Resistência real (MPa) dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).	68
TABELA 4.2– Variação percentual da resistência real dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).....	69
TABELA 4.3– Resistência real (MPa) dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM).....	69
TABELA 4.4– Variação percentual da resistência real dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM).....	70
TABELA 4.5– Resistência real (MPa) dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM).....	71

TABELA 4.6– Variação percentual da resistência real dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM).....	72
TABELA 4.7– Resistência real (MPa) dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)	72
TABELA 4.8– Variação percentual da resistência real dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM).....	73
TABELA 4.9– Resistência real (MPa) dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM).....	74
TABELA 4.10– Variação percentual da resistência real dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)	75
TABELA 4.11– Resistência real (MPa) dos traços 11 (CRV-BG-AC) e 12 (CRV-BG-AM).....	75
TABELA 4.12– Variação percentual da resistência real dos traços 11 (CRV-BG-AC) e 12 (CRV-BG-AM).....	76
TABELA 4.13– Ganhos percentuais médios de resistência à compressão para os traços utilizando água tratada magneticamente.....	78
TABELA 4.14– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias da resistência à compressão em função da idade.	79
TABELA 4.15– Módulo de elasticidade, tensão e deformação para os traços ensaiados	81
TABELA 4.16– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias do módulo de elasticidade para a idade de 90 dias.....	82
TABELA 4.17– Abatimento do cone para os traços ensaiados.....	83

TABELA 4.18– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM)	85
TABELA 4.19– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)	86
TABELA 4.20– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM)	87
TABELA 4.21– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)	89
TABELA 4.22– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 09 (CVR-BC- AC) e 10 (CVR-BC-AM)	90
TABELA 4.23- Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 11 (CVR-BG- AC) e 12 (CVR-BG-AM)	91
TABELA 4.24– Variação percentual da velocidade do pulso ultra-sônico em função da idade	93
TABELA 4.25– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico em função da idade.	94

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS e SÍMBOLOS.

a/c – relação água/cimento

AC – Água comum ou de torneira

AM – Água tratada magneticamente

B - campo magnético

BC - Brita calcária dolomítica

BG - Brita gnaisse

cp – corpo-de-prova

cps – corpos-de-prova

CII – Cimento CII-E-32

CV – Cimento CPV-plus

CVR- CIMENTO CPV – RS

d – diâmetro do corpo-de-prova (cm)

ε - deformação específica

END – Ensaio não destrutivo

E_{ci} – módulo de elasticidade tangente

f - frequência com a partícula gira

F – vetor força, oriunda do campo magnético e da velocidade do fluxo

σ – tensão específica (MPa)

k - constante

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

m = massa da partícula

MEV-Microscópio Eletrônico de Varredura

μ - constante de Poisson

q – carga (íon livre)

r - Raio de Larmor

ρ - densidade do material (Kg/m^3)

τ_0 – período de vibração,

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

T – temperatura absoluta

U – é uma barreira potencial que separa uma posição de equilíbrio da próxima.

UPV - velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (*Ultrasonic Pulse Test*)

V – velocidade de propagação da onda ultra-sônica (m/s)

\mathbf{v} – vetor velocidade do fluxo

RESUMO

Este trabalho, dentro da perspectiva de melhoria do concreto, visa analisar o comportamento do concreto produzido com água tratada magneticamente contrapondo com os resultados obtidos com o concreto produzido convencionalmente (água comum ou de torneira) objetivando assim avaliar os efeitos da água de amassamento tratada magneticamente, na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e módulo de elasticidade). A alteração molecular da estrutura da água em função do tratamento magnético, conforme estudos apresentados por autores de outros países, é o fator que deve influenciar as melhorias do concreto. Diante disto, tentando contrapor estes resultados à realidade brasileira, foram confeccionados 12 traços distintos, variando-se três tipos de cimento (CP II E 32, CP V – PLUS e CP V - RS), dois tipos de agregados graúdos (gnaisse, calcário dolomítico) além dos dois tipos de água. Os concretos produzidos foram ensaiados em 6 idades distintas (3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias). O teste de ultra-som (UPV - Ultrasonic Pulse Velocity) foi utilizado para avaliar qualitativamente o concreto, corroborando com a análise feita usando os ensaios destrutivos. Os resultados mostram que a água tratada magneticamente melhora a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas dos concretos analisados.

Palavras-Chave: Concreto, Água Tratada Magneticamente, Propriedades Mecânicas do Concreto, Ultra-som.

ABSTRACT

The related work, as a perspective of concrete improvement, seeks to analyze concrete behavior with magnetically treated water compared with the obtained results on conventionally produced concrete (common or tap water). The objective is to evaluate the effects of the magnetical treatment water in the workability of the concrete as well as on the mechanical properties (compressive strenght, modulus of elasticity). The molecular decay in water structure due to magnetic treatment, as studies presented by authors of other countries, is the main influence factor in concrete improvement. Therefore trying to oppose these results to the Brazilian reality 12 distinct mix proportions were produced using three cement (Brazilian: CP II E 32; CP V – PLUS; CP V – RS), two large aggregates (gnaisse, dolomitic limestone) and the two kinds of water. The mechanical properties were evaluated at 6 distinct ages (3, 7, 14, 28, 56 and 90 days). The Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) is a means to evaluate qualitatively the concrete, corroborating with the analysis done using destructive essays. The results show that magnetically treated water improves the workability and mechanical properties of the analyzed concretes.

Keywords: Concrete, Magnetically Treated Water, Properties Mechanical of the Concrete, Ultrasonic Pulse Velocity.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A água é um dos elementos da natureza que está presente em todas as etapas da vida do ser humano, bem como em suas atividades (indústria, agricultura, comércio, etc.). Numa época de incertezas, onde o homem procura outras fontes de energia, a água surge como uma possível opção, não só para este fim, mas principalmente, para a otimização de processos industriais que contribuam para uma maior conservação do meio ambiente. Sendo assim, experiências realizadas com este elemento submetendo-o a influência de campos magnéticos gerados por ímãs, levaram ao surgimento da água tratada magneticamente, com amplas aplicações em quase todos os ramos da atividade humana.

No começo da era industrial, cientistas russos perceberam um problema nas tubulações das indústrias que utilizavam caldeiras. A água que circulava pelas tubulações possuía uma grande quantidade de sais dissolvidos que se depositavam em suas paredes internas, formando incrustações que reduzia o seu diâmetro interno e conseqüentemente sua vida útil. Isso exigia uma manutenção periódica cuja única opção consistia em

desmontar a tubulação fazendo a raspagem e limpeza das paredes internas e montá-la novamente no menor tempo de paralisação possível, o que naturalmente elevava os custos de produção. Além das tubulações, os radiadores de motores a explosão, com os depósitos de sais, entupiam comprometendo sua eficácia térmica.

Ao acaso, a água circulante na tubulação foi exposta a um campo magnético e constatou-se que não ocorreu a formação das incrustações e as que já se encontravam na tubulação foram desfeitas das paredes internas sem a necessidade de qualquer raspagem posterior. Esse sistema de desobstrução das incrustações logo foi adotado pelas indústrias do ramo e motivou várias experiências envolvendo a água tratada magneticamente para determinação das alterações das suas propriedades físico-químicas. Os resultados mostraram que a exposição ou passagem da água por campos magnéticos alterava, em especial, as seguintes propriedades:

- temperatura de ebulição;
- temperatura de solidificação;
- densidade;
- tensão Superficial;
- viscosidade;
- condutibilidade Elétrica;
- velocidade de Sedimentação;
- ionização.

Tais alterações nas propriedades físico-químicas da água levaram pesquisadores do mundo todo a analisar esses ganhos em diversas áreas, tais como na agricultura, na saúde, na indústria, dentre outras.

Diante deste contexto os russos Wulachoufuski e Alnanina, em 1962, começaram a estudar o uso da água tratada magneticamente na produção do concreto (FU e WANG¹) *apud* SU(2003), uma vez que entre os radicais livres deste, encontra-se o Ca^{++} , que ao

¹ FU W, WANG ZB. In: The new technology of concrete engineering. Beijing: The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 1994. p 56-59.

reagir com outros elementos pode-se transformar na calcita, principal produto das incrustações nas tubulações.

Similarmente outros pesquisadores do Japão, Europa e China confirmaram que a água tratada magneticamente pode aumentar a resistência à compressão do concreto em até 10% (SU e LEE²) *apud* SU (2003) e SU et al. (2000). Para FU (1994) e CHAU (1996)³ *apud* SU(2003) é possível fazer uma combinação destes ganhos obtendo uma economia de 5% na dosagem do cimento, reduzindo sua fluidez e mesmo assim aumentando a resistência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da magnetização da água de amassamento nas propriedades mecânicas do concreto, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

1.2.2 Objetivo específico

O objetivo específico desse trabalho de dissertação é realizar um estudo comparativo das propriedades mecânicas dos concretos convencionais, aqueles produzidos com água de torneira ou comum, com as daqueles produzidos com água tratada magneticamente, utilizando os ensaios destrutivos de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. Serão produzidos os mesmos traços de concreto com água comum e tratada magneticamente variando o tipo de cimento (classes de resistência), o tipo de agregado graúdo e idade dos ensaios.

² SU N, LEE KC. Effect of magnetic water on mechanical properties and micro-structures of concrete. J Chin Inst Civil Hydraulic Eng, 1999. n° 11, p 175-180

³ CHAU ZJ. In. The new construction method of concrete. Beijing: The Publishing House of Chinese Architectural Industry: 1996, p. 401-407

A inclusão do ensaio não destrutivo da ultra-sonografia objetiva a verificação e comparação dos ganhos ocorridos em relação a parâmetros qualitativos, tais como compacidade e homogeneidade interna, por meio da medição da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (UPV).

Nesta busca, outros parâmetros serão necessariamente avaliados, tais como a trabalhabilidade do concreto fresco, medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone - “*Slump*”.

É importante salientar que esse trabalho será feito tentando contrapor resultados obtidos em outros países à realidade brasileira, utilizando-se materiais da região metropolitana de Belo Horizonte.

1.3 Justificativa

No século passado, o concreto foi um dos materiais de construção mais utilizados no nosso país e a tendência é que isto não seja alterado por um bom período. Desde o seu aparecimento ele é utilizado com o intuito de fornecer à construção a resistência requerida, economia e facilidade de execução, aliados a uma busca mais recente por uma maior durabilidade.

A construção civil é uma área de grande importância para a economia brasileira, uma vez que ela representa cerca de 16% do valor do PIB (CEOTTO,2006)⁴, e ajuda a melhorar os dados sociais, já que oferta empregos para as mais diversas pessoas, com os mais diversos níveis de escolaridade e capacitação profissional.

Desconsiderando o tamanho e a importância da obra, é fácil perceber que em virtude dos aspectos artesanais da produção do concreto, é necessário que se busque sempre o controle de qualidade nas suas várias etapas de produção (materiais, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura).

⁴ <http://www.uniemp.org.br/seminarios/>

Diante disto, é possível encontrar na literatura, com frequência, pesquisas que procuram meios e modos de se melhorar a qualidade do concreto e ao mesmo tempo reduzir o consumo de cimento em sua preparação.

Neste contexto é que se enquadra esta dissertação, uma vez que dentre os diversos métodos existentes que tentam alcançar os objetivos supracitados existe o tratamento magnético da água, que tem-se mostrado como um dos mais interessantes e promissores, como citado por LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), BOICHENKO & SAPOGIN (1977).

Segundo LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), é possível avaliar a influência do tratamento magnético nas características do concreto, conseguindo resultados bastante positivos no que tange a:

- aumento de resistência à compressão;
- aumento de densidade;
- menor porosidade;
- menor absorção de água;
- redução do tempo de endurecimento.

No entanto, se por um lado a literatura é rica em resultados referentes ao tratamento magnético da água utilizada para fabricação do concreto, por outro é pobre no que se refere às condições experimentais, não havendo dados quanto às características da água (densidade, pH, tensão superficial, temperatura, etc.) e às características do sistema de imantação da água (velocidade e vazão do fluxo, intensidade do campo, distância entre os ímãs, dentre outras variáveis, associadas à passagem de um líquido eletricamente carregado por um campo magnético). Esse trabalho fornece todos esses dados para os ensaios realizados.

1.4 Organização da dissertação

O Capítulo 2 visa fazer uma revisão bibliográfica, apresentando como é a estrutura da água e como esta se altera ao ser submetida a um campo magnético pré-estabelecido, descrevendo neste momento o princípio básico da magnetização. Faz-se um breve histórico da utilização da água tratada magneticamente, tanto na produção do concreto, como em outras áreas (saúde, agricultura, indústria). Ainda neste capítulo são apresentadas as principais reações químicas que ocorrem na produção do concreto convencional além de citar alguns trabalhos de outros autores utilizando a água tratada magneticamente na produção de concreto.

No Capítulo 3 abordam-se os ensaios programados e a metodologia do trabalho, dando-se ênfase para explicar como foi desenvolvido o aparato experimental e os demais procedimentos (escolha dos materiais, definição dos traços, tipo de cura, etc.) para a fabricação dos concretos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, após os mesmos terem sido tratados estatisticamente. Paralelamente a isto, é feita uma discussão a respeito dos ganhos e perdas ocorridos com o tratamento magnético na água de amassamento.

Finalizando este trabalho, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros utilizando o tratamento magnético na fabricação do concreto.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A água de amassamento que é utilizada para a fabricação do concreto, possui poucos trabalhos ou estudos difundidos no meio científico, sendo que, as próprias normas brasileiras e até mesmos as internacionais, fazem pequenas exigências em relação à água de amassamento, especificando e recomendando apenas que esta seja tratada, atingindo alguns índices de potabilidade, e que não apresentem nenhum contaminante que possa alterar as reações de hidratação dos compostos cimentícios.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, por meio de normalização específica (NBR 12654: 1992 e NBR 6118: 2003) recomenda que a água de amassamento seja avaliada nos seguintes itens: quantidade de matéria orgânica presente expressa em oxigênio consumido; teor de sólidos dissolvidos e sólidos totais; teores de sulfetos e cloretos, pH e teor de sólidos em suspensão, não se referindo a qualquer tipo de alteração física ou química da mesma.

De modo a apresentar os importantes ganhos que podem ocorrer com a alteração da estrutura molecular da água quando tratada magneticamente mostra-se neste capítulo como o tratamento é realizado e como os ganhos incentivaram pesquisadores de outras áreas científicas. Apresenta-se ainda as principais reações que ocorrem com o concreto convencional e que produzem os compostos $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e $[\text{CaCO}_3]$ que poderão interagir com a água tratada magneticamente, gerando o concreto, objeto desta dissertação.

2.2 Água Tratada Magneticamente

2.2.1 Estrutura da água

A água, como é sabido, é o constituinte inorgânico mais abundante dentro e fora do corpo dos seres vivos, e atrai deste muito tempo interesses pelo seu comportamento. Estruturalmente a molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio, sendo ligados por uma ligação covalente. A disposição espacial desses átomos não é linear, formando um dipolo como apresentado na FIG. 2.1.

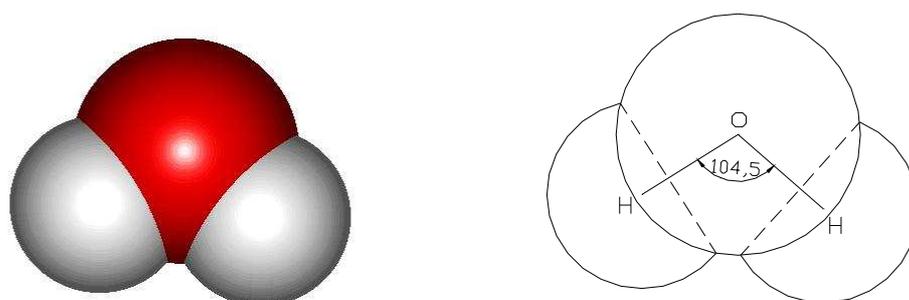


FIGURA 2.1– Modelo da molécula de água

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), “Devido a diferenças nos centros de carga do hidrogênio e do oxigênio, o próton do íon de hidrogênio positivamente carregado pertencente a uma molécula de água atrai os elétrons negativamente carregados das moléculas de água vizinhas. Esta força de atração relativamente fraca,

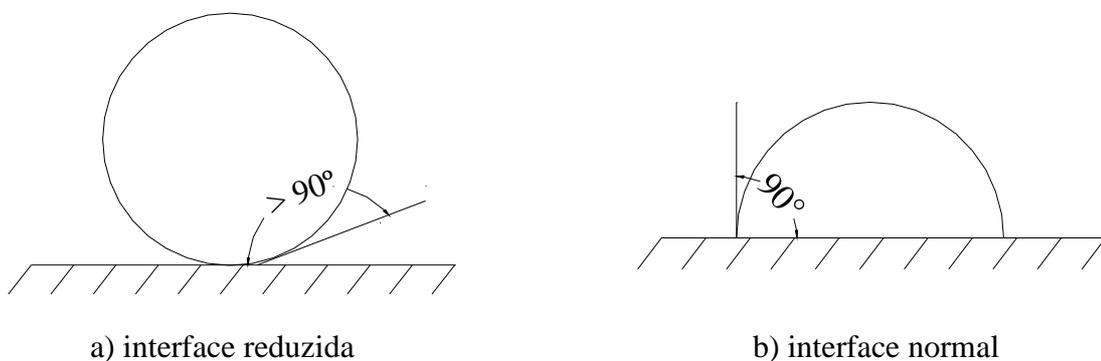
chamada ligação de hidrogênio (ou ponte de hidrogênio), é responsável pela estrutura ordenada da água”.

Cada uma das pontes de hidrogênio é uma ligação fraca que se desfaz facilmente, no entanto, enquanto uma ponte se desfaz, outra se forma, de modo que as moléculas de água ficam fortemente unidas, mantendo a água fluida e estável em condições normais de temperatura e pressão. Essa forte atração entre as moléculas de água é denominada coesão. A coesão entre as moléculas da água no estado líquido é o fator responsável por sua alta tensão superficial.

Esta propriedade da água, é que permite que alguns seres vivos possam se locomover sobre ela sem afundar, mas segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), é possível dizer que é justamente a alta tensão superficial da água, que a impede de agir como um agente plastificante eficiente em misturas de concreto.

Para GOMES et al(2002), a redução da tensão superficial permite uma ampliação na área de contato entre a água e o cimento, acarretando uma maior hidratação e conseqüentemente um incremento de resistência e durabilidade.

Desta forma, VLACK (1985), propôs três modelos distintos de distribuição da molécula de água quando a mesma entra em contato com uma superfície sólida, (FIG. 2.2).



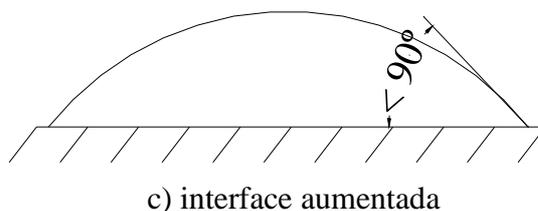


FIGURA 2.2– Tipologias da ação da tensão superficial nas moléculas de água junto a sólidos.

Para a primeira situação, FIG. 2.2-a percebe-se que a molécula de água apresenta uma elevada tensão superficial, sendo indicado pela existência de um ângulo obtuso. Para a segunda situação, FIG. 2.2-b a tensão superficial é inferior ao caso (a), mas mesmo assim apresenta um ângulo tangente de aproximadamente 90° . Já para a terceira e última situação, FIG 2.2-c, a tensão superficial é bem inferior as demais, causando uma maior superfície de molhagem.

O maior exemplo da organização de longo alcance na estrutura da água proveniente da ligação de hidrogênio é encontrado no gelo, como apresentado na FIG. 2.3.

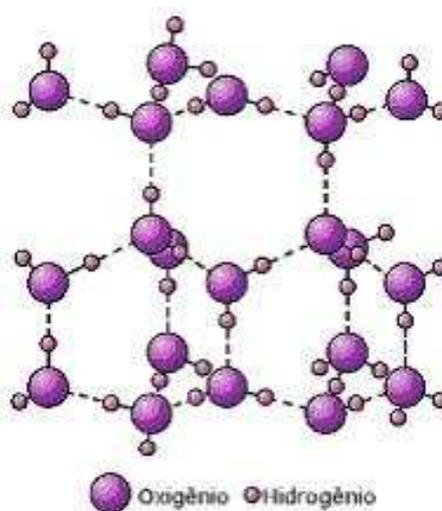


FIGURA 2.3– Estrutura de gelo.

Cada molécula de água no gelo está cercada por quatro outras moléculas de maneira que o grupo possui uma molécula no centro e as outras quatro nos ângulos de um tetraedro. Todas as ligações que ocorrem entre as moléculas e seus grupos são as ligações de

hidrogênio. O gelo funde a 0°C quando aproximadamente 15% das ligações de hidrogênio se rompem. Como resultado da ruptura parcial na direcionalidade da ligação tetraédrica, cada molécula de água pode vir a adquirir mais de quatro vizinhos próximos, aumentando a densidade de 0,917 para 1. O inverso deste processo é responsável pelo fenômeno de que a água líquida, ao solidificar-se, expande-se ao invés de contrair-se. Permitindo que haja vida, nos lagos e rios congelados dos países nórdicos.

2.2.2 Parâmetros de potabilidade da água

De acordo com as normas brasileiras e até mesmo as internacionais, a água utilizada para a fabricação do concreto deve atender os parâmetros mínimos de potabilidade e não devem apresentar nenhum tipo de contaminante, para que não haja alterações nas reações químicas do concreto, quando da sua maturação.

Segundo SPERLING (1996), a água pode ter os seguintes usos principais:

- abastecimento doméstico;
- abastecimento industrial;
- irrigação;
- dessedentação de animais;
- aquicultura;
- preservação da flora e da fauna;
- recreação e lazer;
- harmonia paisagística;
- geração de energia elétrica;
- navegação;
- diluição de despejos.

Destes usos, apenas os dois primeiros (abastecimento doméstico e abastecimento industrial) estão frequentemente associados a um tratamento prévio da água, face aos seus requisitos de qualidade mais exigentes.

2.2.2.1 Impurezas encontradas na água

As impurezas encontradas na água podem ser tratadas pelas suas características físicas, químicas e biológicas, como apresentado:

- características físicas: Estão associadas, geralmente aos sólidos presentes na água. Estes sólidos podem ser em suspensão, coloidais ou dissolvidos, dependendo da sua granulometria.
- características químicas: Podem ser interpretadas por meio de uma das duas classificações: matéria orgânica ou inorgânica
- características biológicas: É avaliado o tipo de formação existente, ou seja, seres vivos do reino animal, vegetal ou protistas.

Para avaliar os sólidos presentes na água, é apresentado como os mesmos são distribuídos em função do seu tamanho (FIG. 2.4).

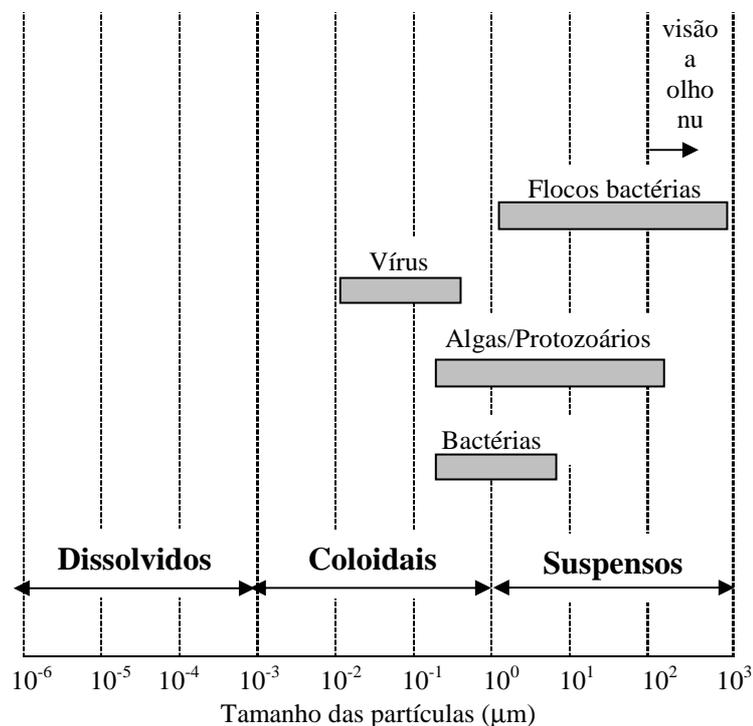


FIGURA 2.4– Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho (SPERLING (1996))

2.2.2.2 Parâmetros de qualidade da água

A qualidade da água pode ser representada por meio de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas. Desse modo, são citados a seguir quais os parâmetros mais importantes relacionando-os com a forma física preponderante e os requisitos de qualidade de acordo com o uso dado à água (TAB. 2.1, TAB. 2.2 e TAB. 2.3).

Parâmetros Físicos

- Cor
- Turbidez
- Sabor e odor
- Temperatura

TABELA 2.1– Forma física preponderante representada pelos parâmetros de qualidade (SPERLIN, 1996)

Característica	Parâmetro	Sólidos em suspensão	Sólidos dissolvidos	Gases dissolvidos	
Parâmetros físicos	Cor		x		
	Turbidez	x			
	Sabor e odor	x	x	x	
Parâmetros químicos	pH		x	x	
	Alcalinidade		x		
	Acidez		x	x	
	Dureza		x		
	Ferro e manganês	x	x		
	Cloretos		x		
	Nitrogênio	x	x		
	Fósforo	x	x		
	Oxigênio dissolvido				x
	Matéria orgânica	x	x		
	Metais pesados	x	x		
	Micropoluentes orgânicos		x		
Parâmetros biológicos	Organismos indicadores	x			
	Algas	x			
	Bactérias	x			

Parâmetros Químicos

- pH
- Alcalinidade
- Acidez
- Dureza
- Ferro e Manganês
- Cloretos
- Nitrogênio
- Fósforo

- Oxigênio Dissolvido
- Micropoluentes inorgânicos
- Matéria Orgânica
- Micropoluentes orgânicos

Parâmetros Biológicos

Os principais microorganismos que desempenham diversas funções de fundamental importância, principalmente as relacionadas com a transformação da matéria dentro dos ciclos biogeoquímicos são:

- Bactérias
- Protozoários
- Algas
- Vírus
- Fungos
- Helmintos

TABELA 2.2– Principais parâmetros a serem investigados numa análise de água (SPERLING 1996)

Característica	Parâmetro	Águas para abastecimento				Águas residuárias		Corpos receptores	
		Água superficial		Água subterrânea		bruta	tratada	Rio	Lago
		bruta	tratada	bruta	tratada				
Parâmetros físicos	Cor	x	x	x	x			x	x
	Turbidez	x	x	x	x			x	x
	Sabor e odor	x	x	x		x		x	x
Parâmetros químicos	pH	x	x	x	x	x		x	x
	Alcalinidade	x		x		x			
	Acidez	x		x					
	Dureza			x	x				
	Ferro e manganês	x	x	x	x				
	Cloretos	x		x					
	Nitrogênio	x	x	x	x	x	x	x	x
	Fósforo	x	x				x	x	x
	Oxigênio dissolvido							x	x
	Matéria orgânica						x	x	x
	Micropoluentes inorgânicos	x	x	x	x	x	x	x	x
Micropoluentes orgânicos	x	x	x	x	x	x	x	x	
Parâmetros biológicos	Organismos indicadores	x	x	x	x		x	x	x
	Algas	x					x		x
	Bactérias						x		

TABELA. 2.3– Associação entre os usos da água e os requisitos de qualidade (SPERLING 1996)

Uso geral	Uso específico	Qualidade Requerida
Abastecimento de água doméstico	-	- Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde - Isenta de organismos prejudiciais à saúde - Adequada para serviços domésticos - Baixa agressividade e dureza - Esteticamente agradável (baixa turbidez, cor, sabor e odor. Ausência de macrorganismos)
Abastecimento industrial	Água é incorporada ao produto (alimento, remédios)	- Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde - Isenta de organismos prejudiciais à saúde - Esteticamente agradável (baixa turbidez, cor, sabor e odor)
	Água entra em contato com o produto	- Variável com o produto
	Água não entra em contato com o produto (refrigeração, caldeiras)	- Baixa dureza - Baixa agressividade
Irrigação	Hortaliças, produtos ingeridos crus ou com casca	- Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde - Isenta de organismos prejudiciais à saúde - Salinidade não excessiva - Isenta de substâncias químicas prejudiciais ao solo e às plantações
	Demais plantações	- Salinidade não excessiva
Dessedentação de animais	-	- Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde dos animais - Isenta de organismos prejudiciais à saúde dos animais
Preservação da flora e da fauna	-	- Variável com os requisitos ambientais da flora e da fauna que se deseja preservar
Recreação e lazer	Contato primário (ex. Natação, surfe)	- Isenta de substâncias químicas prejudiciais à saúde - Isenta de organismos prejudiciais à saúde - Baixos teores de sólidos em suspensão e óleos e graxas
	Contato secundário (ex. navegação de lazer, pesca)	- Aparência agradável
Geração de energia	Usinas hidrelétricas	- Baixa agressividade
	Usinas nucleares ou termelétricas	- Baixa dureza
Transporte	-	- Baixa presença de material grosseiro que possa por em risco as embarcações
Diluição de despejos	-	-

2.2.3 Tratamento magnético da água

O tratamento magnético da água é um assunto ainda pouco analisado e de certo modo contraditório no que tange aos efeitos que o mesmo acarreta na água e como altera a sua estrutura interna.

De acordo com (AMIRI e DADKHAH, 2005) o tratamento magnético da água por campo magnético pode ser classificado por meio dos efeitos a montante e a jusante.

Efeitos a montante

- Mecanismo de ação do campo magnético.
- Efeitos químicos da água e suas impurezas.
- Efeitos de parâmetros hidrodinâmicos (fatores geométricos do sistema de tratamento, velocidade...).
- Efeito de organização do campo magnético.
- Processo *nucleation* (efeitos das impurezas, frequências e grandezas do núcleo).

Efeitos a jusante

- Mudanças das propriedades da água tratada (aumento da condutibilidade, aumento da alcalinidade e alteração do pH de ácido para neutro, redução significativa da tensão superficial (GOMES et al,1999)...).
- Potencial zeta de produção de partículas de carbonato de cálcio.
- Morfologia da precipitação de carbonato de cálcio (tamanho, forma).
- Produção de novas entidades (radicais livres, agentes reativos).
- Supressão da razão de formação de incrustações.

Pela literatura estudada, percebe-se que a maioria dos autores tendem a buscar respostas em função dos efeitos a jusante, tendo desta forma poucos dados a respeito dos parâmetros geométricos do sistema de magnetização da água. Seguindo esta tendência, a análise da água foi feita em função dos efeitos à jusante, mas sendo descritos em alguns pontos os parâmetros (velocidade e vazão do fluxo, intensidade do campo magnético, dentre outros) exigidos para se alcançar tais efeitos.

O sistema de magnetização utilizado neste trabalho foi o aparelho denominado Condicionador Físico, idealizado pelo professor Wellerson Romaniello, colaborador desta dissertação. Este aparelho utiliza o princípio descrito no tópico a seguir e atende a alguns critérios de instalação (item 3.4.1) para que o seu ponto ótimo de utilização seja atingido.

2.2.3.1 Princípio do tratamento magnético da água

Muitos pesquisadores vêm avaliando as características da água, buscando explicar como o campo magnético altera as suas propriedades. Um modelo que encontrou muitos adeptos segundo BELOVA (1972), foi aquele proposto por O. Samoylov's, que consistia em um modelo estrutural homogêneo que fazia analogia entre os estados líquidos e sólidos (cristais) da água.

Por esta análise, ficou comprovado por meio dos Raios-X, que a molécula da água no estado líquido, ao ser submetida ao tratamento magnético, passa a ter uma similaridade estrutural com os cristais do gelo, assumindo uma forma mais organizada e com presença de vazios, alguns sendo inclusive maiores do que o tamanho de uma molécula de água. (FIG. 2.5).



FIGURA 2.5– Parte do modelo da água

As moléculas de água nos vazios e na estrutura do gelo diferem somente se considerada seus níveis de energia, uma vez que os efeitos da magnetização induzem estas moléculas a uma posição instável de equilíbrio, sendo este o motivo que levou KLASSEN (1967) a afirmar que o efeito da magnetização persiste apenas por algumas horas.

Fisicamente a alteração que ocorre na água se deve ao princípio da força de Lorentz, uma vez que existem íons H^+ , OH^- , livres (partículas carregadas) na água, sofrendo influência de um campo magnético sob uma determinada velocidade. A FIG. 2.6 apresenta um esquema de como a Força de Lorentz influi na magnetização da água

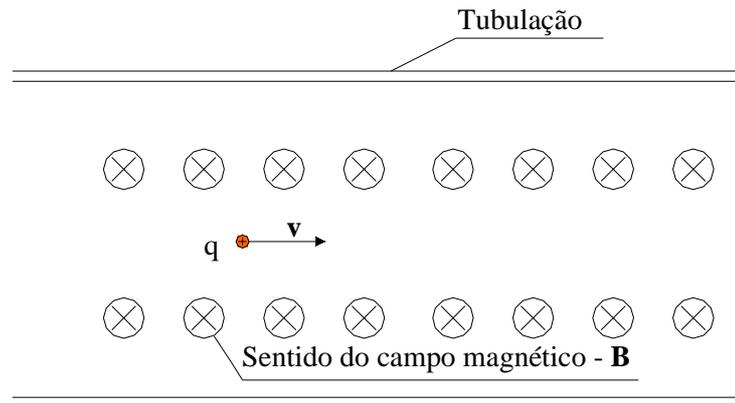


Figura 2.6 (a)

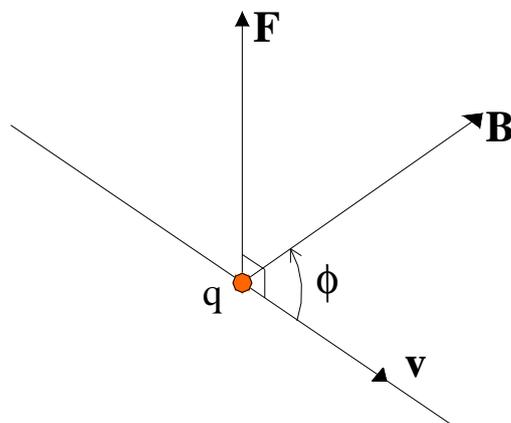


Figura 2.6 (b)

FIGURA 2.6– Esquema da força de Lorentz

Na FIG. 2.6 (a) apresenta-se uma carga q que foi lançada com uma velocidade \mathbf{v} do fluxo, sempre perpendicular ao sentido do campo magnético \mathbf{B} , o que produz uma força \mathbf{F} , com o maior módulo possível ($\sin \phi = \sin 90^\circ = 1$), também perpendicular à velocidade \mathbf{v} (Fig. 2.6 (b)).

Na FIG. 2.6 (b), é mostrado a relação geométrica entre os vetores \mathbf{F} , \mathbf{v} e \mathbf{B} , de forma que é possível perceber que \mathbf{F} é normal ao plano formado por \mathbf{v} e \mathbf{B} . Logo, \mathbf{F} é sempre perpendicular a \mathbf{v} e a força magnética é sempre lateral. É possível reparar ainda que \mathbf{F} se anula quando \mathbf{v} tem sentido igual ou contrário ao de \mathbf{B} (nesse caso $\phi = 0^\circ$ ou 180° , e $\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$), e que o módulo máximo de F é $(q \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ quando \mathbf{v} é ortogonal a \mathbf{B} .

Deste modo, como existe uma força forçando a partícula para cima e existe uma outra força no sentido do fluxo levando a partícula para frente, a partícula passa a ter uma trajetória helicoidal como mostrado pela EQ.(2.1) e pela FIG. 2.7 (HALLIDAY et al, 1996).

$$f = \frac{qB}{2\pi m} \quad (2.1)$$

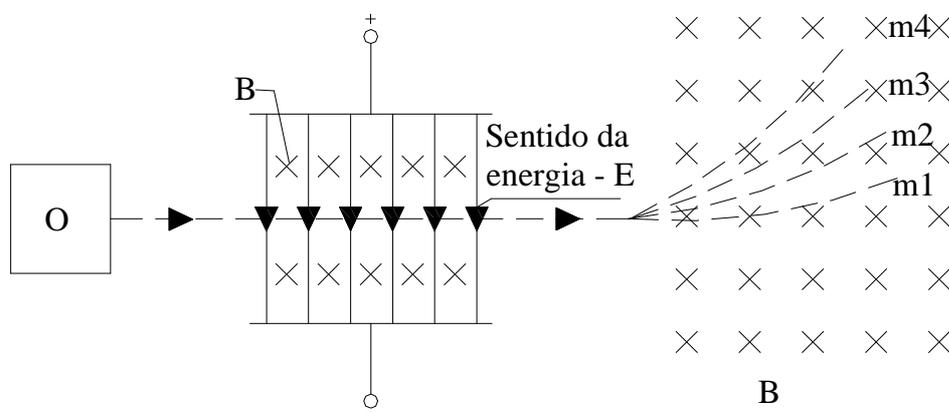


FIGURA 2.7– Trajetória da partícula – (HALLIDAY, 1996)

Onde f = frequência com que a partícula gira (Hz);
 m = massa da partícula.

A partícula ao executar estes giros e ligado ao fato da limitação de movimento das mesmas no campo magnético (as partículas estão confinadas no sistema de magnetização), ocorre um aumento no número de colisões e na formação dos centros de cristalização, gerando deste modo uma estrutura mais organizada.

Deste modo, muitos autores atribuem a esta força F , a responsabilidade pelo aumento do ângulo entre os átomos de hidrogênio e oxigênio da água, ficando os mesmos com valores superiores aos $104,5^\circ$, gerando assim uma estrutura similar à do gelo, para a água no seu estado líquido.

2.2.3.2 Histórico da utilização

Com base no estudo teórico prévio, diversos pesquisadores perceberam que esta alteração na estrutura da água, era a justificativa para explicar porque as paredes das tubulações de caldeiras, não sofriam com incrustações quando a água que circulava por ela tinha passado pelo tratamento magnético. Avançando nas pesquisas, foi constatado que a água ao sofrer o tratamento magnético inibia a formação do CaCO_3 , principal componente das incrustações, impedindo deste modo que os sais dissolvidos da água sedimentassem nas tubulações.

Mesmo tendo este objetivo original, foi comprovado que este conceito poderia ser utilizado em outras áreas. Um exemplo disso foi UENO e IWASAKA⁵ (1994) *apud* PORTO (1998), que analisaram o comportamento hidráulico da água, percebendo a participação física da mesma em campos magnéticos de 8 Tesla (1 Tesla = 10^4 gauss), construídos a partir de ímãs super-condutores horizontais.

HIROTA et al.⁶(1996) *apud* PORTO (1998), investigou os efeitos do campo magnético no comportamento hidrodinâmico da superfície da água e de soluções aquosas de sulfato de cobre que apresentavam uma suscetibilidade magnética reduzida.

Na agronomia, outros estudos também têm sido feitos, analisando as vantagens da utilização dos campos magnéticos na água utilizada na irrigação e na nutrição de animais. Segundo LIN e YOTVAT⁷ (1989) *apud* PORTO(1998), resultados surpreendentes foram observados em algumas fazendas em Israel, com diversos animais e plantas. Em geral, os animais tratados com água magnetizada apresentaram condições gerais melhores, além de uma produtividade específica maior.

⁵ UENO, S.; IWASAKA, M. Effects of magnetic fields on fibrinolysis, **Journal of Applied Physics**, 1994 Vol 75 Issue 10, p7162-7164

⁶ HIROTA, N.; SUGAWARA, H.; HOMMA, T. OHTA, M.; KITAZAWA K, YOKOI H, KAKUDATE Y, FUJIWARA S, KAWAMURA M, UENO S, and IWASAKA M: Magnetic field effect on interface profile between immiscible nonmagnetic liquids-enhanced Moses effect. **Journal of Applied Physics**, 1996, 79(8): 4721-4723.

⁷ LIN, I. J.; YOTVAT, J.: Exposure of irrigation and drinking water to a magnetic field with controlled power and direction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol 83, Issue 1-3, p 525 – 526.

Já na bioeletromagnética, um bom exemplo é o estudo realizado por TAKEUCHI⁸ et al (1995) *apud* PORTO (1998), nas células vermelhas do sangue.

Um dado importante observado por KLASSEN (1967), foi que o efeito da magnetização persiste por algumas horas ou poucos dias, isso caso a temperatura do sistema d'água seja suficientemente baixa, sendo importante salientar que o tratamento somente é efetivo se o líquido é passado entre os pólos do magneto com um campo suficientemente forte e se a temperatura do líquido não é tão alta. (A intensidade do campo necessariamente depende de cada aparelho de tratamento magnético em particular).

2.3 Concreto convencional

Para efeito desse trabalho o termo concreto convencional será utilizado para indicar o concreto produzido com água sem o tratamento magnético, normalmente denominada água de torneira ou comum. Desse modo será feito um breve relato da fabricação do concreto, sendo necessário uma descrição sucinta de cada um dos seus componentes, o aglomerante (cimento), o agregado miúdo (areia), o agregado graúdo (brita), a água e eventualmente algum tipo de aditivo.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), “o concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados”. O agregado é reconhecido como sendo o material utilizado como substrato para o cimento. Ele é granular, tal como a areia, o pedregulho, etc..

⁸ TAKEUCHI, T.; MIZUNO, T.; HIGASHI, T.; YAMAGISHI, A.; DATE, M.: Orientation of red blood cells in high magnetic field. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 1995; 140-144: 1462-1463.

2.3.1 Cimento

O cimento Portland é o produto adquirido pela pulverização do clínquer, de natureza granulosa, originado da calcinação da argila e do calcário. Primeiramente, é feita a extração da rocha calcária, que posteriormente é britada e moída juntamente com a argila, nas devidas proporções. Este composto é submetido a um sistema de pré-aquecedores, que consiste em uma série de ciclones, para então atravessar zonas de queima do forno rotativo. O elevado calor converte o composto em um novo material, denominado clínquer, que apresenta-se na forma de nódulos. A partir deste ponto, ao clínquer moído é adicionado gesso e/ou outras adições, passando esta mistura a ser denominado cimento.

2.3.1.1 Cimento Portland: seus constituintes e suas reações de hidratação

O cimento Portland é constituído por uma série de elementos, sendo alguns fundamentais à sua composição e outros que se encontram em menores proporções.

Abaixo são apresentados os principais componentes do cimento Portland.

- $\text{CaO} \rightarrow \text{Cal}$
- $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Sílica}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Alumina}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Óxido de Ferro}$
- $\text{MgO} \rightarrow \text{Magnésia}$
- $\text{SO}_3 \rightarrow \text{Anidrido Sulfúrico}$

Segundo COSTA (1999), quando se processa a mistura de matérias-primas que contenha os constituintes relacionados anteriormente, em proporções convenientes, a critérios previamente estabelecidos, é produzido o clínquer.

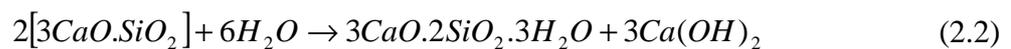
Neste processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos seguintes compostos:

- Silicato Tricálcico ($3CaO.SiO_2 = C_3S$);
- Silicato Bicálcico ($2CaO.SiO_2 = C_2S$);
- Aluminato Tricálcico ($3CaO.Al_2O_3 = C_3A$);
- Ferro Aluminato Tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = C_4AF$).

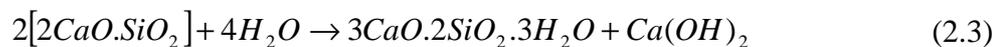
2.3.1.2 Principais reações de hidratação do cimento portland

Os compostos supracitados sofrem reações de hidratação, gerando os seguintes novos compostos:

Reação de hidratação do C_3S



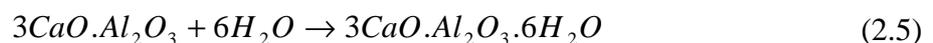
Reação de hidratação do C_2S



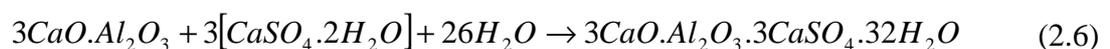
Reação de hidratação do C_3A (temperatura inferior a 20° C)



Reação de hidratação do C_3A (temperatura superior a 50° C)



Reação de hidratação do C_3A em presença de Gesso



Por meio de cálculos estequiométricos foi comprovado que o C_3S quando hidratado produz 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de $Ca(OH)_2$, sendo que sob a mesma condição de hidratação o C_2S é capaz de produzir 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de $Ca(OH)_2$. Tendo em vista que as propriedades adesivas da pasta de cimento Portland são principalmente devidas à formação de silicato de cálcio hidratado, pode-se deduzir que a resistência do cimento portland, terá um acréscimo a medida que se aumenta o teor de C_2S ,

aumentando assim também a sua durabilidade, devido ao menor teor de Ca(OH)_2 , composto químico conhecido como portlandita, COSTA (1999).

Segundo COSTA (1999), os produtos da hidratação do cimento se dividem na seguinte proporção, aproximadamente: 70% de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, 20% de Ca(OH)_2 e 10% de outros produtos.

A formação da portlandita [Ca(OH)_2], principal produto da hidratação do cimento, é regida pela reação do óxido de cálcio (CaO), ou cal virgem com a água de hidratação, como apresentado:



Em concretos contendo somente cimento Portland, a carbonatação do Ca(OH)_2 é a que realmente interessa. A reação do CO_2 com o hidróxido de cálcio (EQ.(2.8)) é a mais simples e a mais importante no que tange a formação do CaCO_3 ; pois as moléculas do carbonato de cálcio são maiores que as da portlandita, provocando assim, uma expansão dos poros do concreto e um conseqüente aumento destes, facilitando ainda mais o ingresso de dióxido de carbono. Esta expansão provocada pelo CaCO_3 poderá ocasionar a formação de fissuras na superfície do concreto.



2.3.1.3 Velocidade da carbonatação

O principal fator que controla a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento hidratada.

Segundo ALMEIDA (1990)⁹ e JOHN e TUDISCO (1993)¹⁰ *apud* COSTA(1999), “a velocidade de carbonatação dos concretos, em termos gerais:

⁹ ALMEIDA, I.R. Betões de alta resistência e durabilidade, composição e características, Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 740p, 1990

- aumenta com o incremento da relação a/c;
- varia com a natureza, finura e dosagem do cimento;
- varia com a duração e as condições de cura, principalmente no que tange à temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂ no ar;
- diminui com a redução da porosidade e da permeabilidade, e com o incremento da compactidade da pasta endurecida;
- diminui com o aumento da resistência à compressão;
- aumenta com a presença de fissuras.

Ainda segundo COSTA (1999) é possível afirmar que quanto maior o fator a/c, maior será o teor de água no concreto, tornando o ambiente propício para haver a reação com o CO₂ da atmosfera e, por conseguinte induzindo a formação do ácido carbônico (H₂CO₃), que é reativo.

A finura e a dosagem do cimento são relevantes em relação à velocidade da carbonatação, uma vez que eles determinam a porosidade do concreto, sua permeabilidade e conseqüentemente sua difusividade.

2.3.2 Propriedades dos principais componentes do cimento Portland.

Utilizando a pesquisa feita por COSTA (1999), a TAB. 2.4, apresenta algumas das mais importantes propriedades dos principais compostos do cimento Portland.

¹⁰ JONH, V. M. e TUDISCO, M. Durabilidade e carbonatação do concreto armado na revisão da NBR 6118, Anais, Seminário Sobre Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, Porto Alegre, RS, Brasil, 118-133 p, 1993

TABELA. 2.4 – Algumas propriedades dos principais componentes do cimento Portland.(COSTA, 1999)

Componente	Nome	Propriedades
C ₃ S	Silicato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forma de pequenos grãos equidimensionais e incolores. 2. Principal responsável pela resistência a curto prazo, principalmente ao fim primeiro mês de cura. 3. Segundo componente mais importante na produção do calor de hidratação. 4. Segundo componente responsável pelo tempo de pega. 5. Sua forma impura é também conhecida como Alita. 6. Sua velocidade de hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons por meio das camadas sobrejacentes do produto hidratado.
C ₂ S	Silicato Dicálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresenta-se sob 3 formas diferentes: <ul style="list-style-type: none"> - Em temperaturas elevadas - α-C₂S - Em temperaturas por volta de 1450oC - β-C₂S - Em temperaturas por volta de 670oC - γ-C₂S * Mas é a forma β-C₂S que está presente nos cimentos comerciais e sua forma predominante é a de grãos arredondados, geralmente geminados. 2. Principal responsável pela resistência a longo prazo, principalmente ao fim de um ano ou mais. 3. Sua forma impura é também conhecida como Belita. 4. Sua hidratação é controlada pela sua baixa velocidade intrínseca de reação. 5. O produto final da hidratação do C₂S em uma relação cal /sílica de 1,65.
C ₃ A	Aluminato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forma partículas cristalinas retangulares. 2. Principal componente na produção do calor de hidratação. 3. Principal componente pela rapidez da pega, quando presente na forma cristalina. 4. Sua forma predominante é a de placas achatadas. 5. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.
C ₄ AF	Ferro Aluminato Tetracálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresenta-se sob a forma de solução sólida. 2. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.

2.3.3 Propriedades Físicas e Químicas do Cimento

As propriedades físicas do cimento Portland podem ser analisadas por meio de três enfoques, sendo:

- o produto em sua condição natural, que no caso seria em pó;
- a mistura de cimento e água produzindo a pasta;
- e a interação da pasta com agregados, formando a argamassa.

Abaixo estão citadas cada uma de suas propriedades físicas.

Densidade: Pode-se considerar a densidade absoluta do cimento Portland como 3,15 , sendo que esse valor pode sofrer algumas variações pequenas. A utilização desse valor é necessária para calcular o consumo de cimento, nas misturas geralmente feitas com base nos volumes específicos dos constituintes. Essa propriedade é variável com o tempo nas pastas de cimento, sendo ampliada à medida que ocorre o processo de hidratação. O nome dado a esse aumento de densidade com o progresso da hidratação é conhecido por retração.

Finura: Essa propriedade está relacionada com o tamanho dos grãos do cimento, e pode ser definida de duas maneiras: pelo tamanho máximo do grão ou pelo valor da superfície específica. A finura ou superfície específica do produto é o fator responsável pelo controle da velocidade de reação de hidratação do cimento, sendo que este fator também influencia nas qualidades das pasta, das argamassas e dos concretos.

Existe uma relação entre o aumento da finura e o aumento da resistência, sendo que este aumento pode ser melhor identificado na resistência da primeira idade. Além disso, o aumento da finura permite uma diminuição da exsudação, e outros tipos de segregação, o aumento da impermeabilidade, da trabalhabilidade e da coesão dos concretos e ainda diminui a expansão em autoclave.

O valor referente à finura se relaciona com a quantidade de área que pode ser encoberta quando se dispõe os grãos paralelamente entre si. Desse modo, um cimento com uma finura de 1 g/cm^2 , significa que um grama de cimento é capaz de cobrir 1 cm^2 .

Tempo de Pega: Esse fenômeno abrange a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, sendo definido como o instante em que a pasta adquire uma certa consistência tornando-a imprópria ao trabalho. O termo pega e

endurecimento são dois aspectos de um mesmo processo de hidratação do cimento, ocorridos em períodos diferentes. A pega ocorre na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e última.

Pasta de Cimento: “A ocorrência da pega do cimento deve ser regulada tendo-se em vista os tipos de aplicação do material, devendo-se processar ordinariamente em períodos superiores a uma hora após o início da mistura. Para acelerar ou retardar o início do processo de pega, usam-se os aditivos chamados de aceleradores e retardadores de pega, respectivamente.”(BAUER,1995)

Resistência: A resistência mecânica dos cimentos é obtida por meio dos ensaios de ruptura de corpos-de-prova submetidos à compressão. Em quase todo o mundo, os corpos-de-prova são cúbicos com as arestas variando de 5cm a 7cm. Somente no Brasil e Uruguai estes são cilíndricos, com as dimensões da altura e diâmetro sendo de 10cm e 5cm, respectivamente.

Exsudação: A água deve ser empregada na quantidade estritamente necessária para envolver os grãos, permitindo a hidratação e posterior cristalização do cimento. Quando existe muita água na mistura, o excesso migra para a superfície pelo processo de exsudação. Desta forma exsudação é o fenômeno que consiste na separação espontânea da água de mistura, uma vez que os grãos de cimento são mais pesados que as moléculas de água, fazendo com que eles tendam a se sedimentar, por gravidade deixando atrás de si vazios chamados de porosidade capilar. Esse fenômeno é um tipo de segregação que ocorre antes do início da pega, e que prejudica a uniformidade, a resistência e a durabilidade dos concretos. A finura do cimento é um fator que afeta a exsudação, reduzindo-a. Isto pode ser entendido, considerando-se que diminuindo os espaços intergranulares aumenta-se a resistência à passagem de água.

Na seqüência serão abordadas as propriedades químicas do cimento Portland. Esses processos estão interligados ao processo de endurecimento por meio da hidratação.

Estabilidade: “A estabilidade do cimento é uma característica ligada à ocorrência eventual de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do

concreto e resulta a hidratação de cal e magnésia livre nele presentes” (BAUER,1995). A cal (CaO) ao ser hidratada após o endurecimento da pasta de cimento, amplia seu volume, provocando o aparecimento de tensões internas que conduzem à microfissuração, podendo acarretar uma completa desagregação do material. Este fenômeno ocorre com maior razão com o óxido de magnésio (MgO). Por isso, as normas limitam não só a proporção deste composto, como a do óxido de cálcio (CaO) também.

Calor de Hidratação: O calor de hidratação ocorre no decorrer do processo de endurecimento do cimento, à medida que as reações de hidratação se processam. A intensidade desse calor de hidratação varia de acordo com as proporções de silicato e aluminato tricálcios. O calor de hidratação do cimento Portland comum oscila entre 85 e 100 cal/g, podendo variar entre 60 e 80 cal/g nos cimentos de baixo calor de hidratação. Segundo BAUER (1995), os valores do calor de hidratação dos constituintes dos cimentos são os apresentados na TAB. 2.5.

TABELA 2.5 – Calor de hidratação dos componentes do cimento.

Componentes	Calor de hidratação (cal/g)
C ₃ S	120
C ₂ S	62
C ₃ A	207
C ₄ AF	100
Magnésia	203
Cal	279

Resistência aos Agentes Agressivos: Dentre os constituintes do cimento, aqueles que sofrem os ataques químicos são os silicatos de cálcio mais ou menos hidratados e principalmente a cal hidratada, que se encontra presente no cimento hidratado. Os agregados, por serem de natureza predominantemente inertes, não são tão susceptível aos ataques. O hidróxido de cálcio que apresenta entre 15% a 20% do peso do cimento original constitui o ponto mais vulnerável.

As águas ácidas, oriundas da chuva, com uma certa quantidade de gás carbônico dissolvido, agem sobre a cal do cimento hidratado. O decorrer deste processo varia com a concentração do anidrido carbônico, caso o teor de CO_2 seja pequeno, então ocorrerá a formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que é um composto pouco solúvel. Devido ao fato de suas moléculas serem maiores que as do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) elas obstruirão os poros, constituindo proteção a futuros ataques. No entanto, se a concentração é relativamente alta, o carbonato formado irá se dissolver como o bicarbonato, prosseguindo o ataque até completa exaustão da cal presente. Em seguida é desencadeado o ataque aos sais de cálcio.

2.3.4 Hidrólise dos componentes da pasta de cimento

Os cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio estão presentes em rios, lagos e também em lençóis freáticos, constituindo a chamada água dura e como se sabe essa água não agride os constituintes da pasta de cimento Portland. Já a água pura proveniente da condensação de neblina ou vapor e água mole originária da chuva ou da fusão de neve e gelo, pode possuir poucos ou nenhum íon de cálcio (Ca^{++}). O encontro dessas águas com a pasta de cimento Portland tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio. Segundo METHA & MONTEIRO (1994), “uma vez que a solução de contato atingisse o equilíbrio químico, a hidrólise adicional da pasta de cimento iria parar. Entretanto, no caso de água corrente ou infiltração sob pressão, irá ocorrer a diluição da solução de contato, proporcionando, portanto, a condição para a continuação da hidrólise. Em pastas hidratadas de cimento Portland, o hidróxido de cálcio é o constituinte que, devido à sua solubilidade relativamente alta em água pura ($1230\text{mg}/\lambda$), é mais suscetível à hidrólise. Teoricamente, a hidrólise da pasta de cimento continua até que a maior parte do hidróxido de cálcio tenha sido retirada por lixiviação; isto expõe os outros constituintes cimentícios à decomposição química.”

Mesmo com a perda de resistência, a lixiviação do Ca(OH)_2 do concreto deve ser considerada indesejável por razões estéticas, já que o produto lixiviado interage com o gás carbônico presente no ar e resulta na precipitação de crostas brancas de CaCO_3 na superfície. Tal fenômeno recebe o nome de eflorescência.

2.3.5 Água como um agente deteriorador

Para COSTA (1999), à priori, a água é o agente primário necessário tanto na criação quanto na destruição de muitos materiais na natureza. É o pivô para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto. No caso dos materiais porosos, sabe-se que a água é o agente de vários tipos de processos físicos de degradação agindo como veículo para o transporte de íons agressivos, a água também pode ser uma fonte de processos químicos deletérios. Em segundo lugar os fenômenos físico-químicos relacionados com movimentos da água em sólidos porosos são regulados pela permeabilidade do sólido. Por último, a taxa de deterioração é afetada pelo tipo de concentração de íons na água e pela composição química do sólido.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a água é o líquido de maior fartura na natureza, podendo ser encontrada no mar, lençóis freáticos, rios, lagos, chuva, neve e vapor. Sendo composta por pequenas moléculas, estas são capazes de infiltrar-se em cavidades e poros consideravelmente finos. Como solvente, a água é notável por sua habilidade de dissolver mais substâncias do que qualquer outro líquido conhecido. Esta propriedade responde pela presença de muitos íons e gases em algumas áreas, as quais, por sua vez, tornam-se capazes de causar decomposição química de materiais sólidos. Outra propriedade da água é sua temperatura de evaporação, a qual é a maior entre os líquidos comuns. Assim, sob temperaturas usuais, ela tende a permanecer no material no estado líquido, ao invés de evaporar e deixar o material seco.

2.4 Trabalhos Utilizando a água tratada magneticamente no concreto

Como é sabido, o cimento ao sofrer reações para se constituir no concreto, processa várias reações sendo umas delas a formação do CaCO_3 , que como foi apresentado sofre grande influência da água tratada magneticamente e acarreta grandes inconvenientes para a durabilidade e estabilidade do concreto, juntamente a isso, freqüentes pesquisas tem sido realizadas com o intuito de melhorar a qualidade do concreto e reduzir o consumo de cimento em sua preparação.

LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), constataram que se a água tratada com campo magnético, fosse utilizada na preparação do concreto, haveria uma melhora na qualidade do mesmo, aumentando a resistência à compressão, a densidade e a resistência ao impacto. Além disso, foi comprovado que a porosidade do concreto e a absorção de água são menores, levando a uma maior dureza do material.

A combinação das melhorias advindas de cada um destes parâmetros pode conduzir a uma economia de até 30% de cimento e no caso específico da resistência à compressão, existe na literatura um consenso de que se pode ter ganhos de até 22%, LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), BOICHENKO & SAPOGIN (1977).

Uma variação do tratamento magnético da água, destinada à fabricação do concreto, é a adição de Fe_3O_4 em pó na água a ser tratada magneticamente, numa porcentagem que varia de 0,5 a 2% em peso da quantidade de cimento utilizada.

Segundo LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), a introdução deste aditivo ferromagnético fornece um aumento adicional de 6-8 %, comparado com a resistência à compressão do concreto preparado com a água tratada magneticamente sem aditivos.

Segundo SU (2000), o concreto produzido com a água tratada magneticamente induz a redução da adsorção para a superfície de contato das substâncias na interface entre a água e cimento. Este aspecto influi no processo de hidratação e cura do cimento, pois quando se faz a mistura de água e cimento a reação de hidratação irá primeiramente reagir nas superfícies das partículas de cimento. Com isso a fina camada dos produtos de hidratação é formada por partículas de cimento, que impedem uma longa hidratação dessas partículas, deste modo quando a água tratada magneticamente é usada, as moléculas de água, podem facilmente penetrar pelas partículas de cimento, permitindo uma melhor hidratação do processo e um aumento na resistência mecânica do concreto.

Outros pesquisadores, em cidades industriais da Rússia e China, têm mostrado que utilizando a água tratada magneticamente na produção do concreto pode-se ter um

ganho, de trabalhabilidade, de aceleração da reação de hidratação, aumento da resistência à compressão e melhora na impermeabilidade e resistência ao resfriamento-aquecimento.

Segundo SU (2003), a razão pela qual a água tratada magneticamente pode melhorar as características do concreto se deve à sua estrutura molecular. A água é uma substância polar, que tende a ser atraída por ligações de hidrogênio e formam conjuntos como ilustrado na FIG. 2.8.

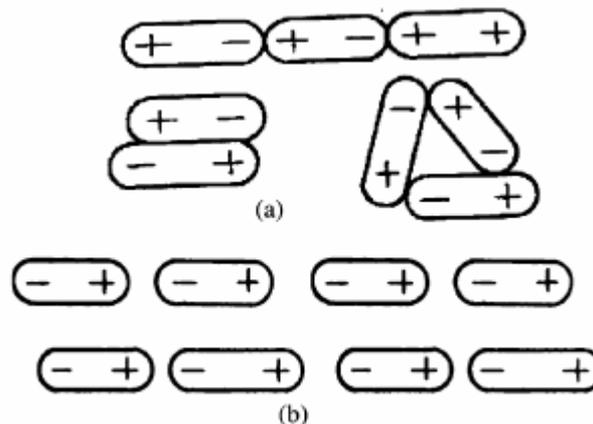


FIGURA 2.8– Efeito do campo magnético na moléculas de água: (a) Conjunto de moléculas de água termodinamicamente estável; (b) Moléculas de água após a passagem pelo campo magnético.

Quando as partículas de cimento são envolvidas pela água tratada magneticamente de mesma carga elétrica, estas partículas serão repelidas entre si dispersando-se com maior facilidade pela mistura da água. Além disso, quando a hidratação ocorre, esta se dá formando camadas de hidratação do cimento exterior, o que previne a penetração das moléculas de água. Como as moléculas de água magnetizada estão em pequenos conjuntos, eles podem penetrar por meio das camadas de hidratação mais facilmente, o que permite que uma hidratação mais completa.

De acordo com o estudo feito por SU (2003), a água magnetizada altera a microestrutura da pasta de cimento, como mostrado na FIG. 2.9 e FIG. 2.10.

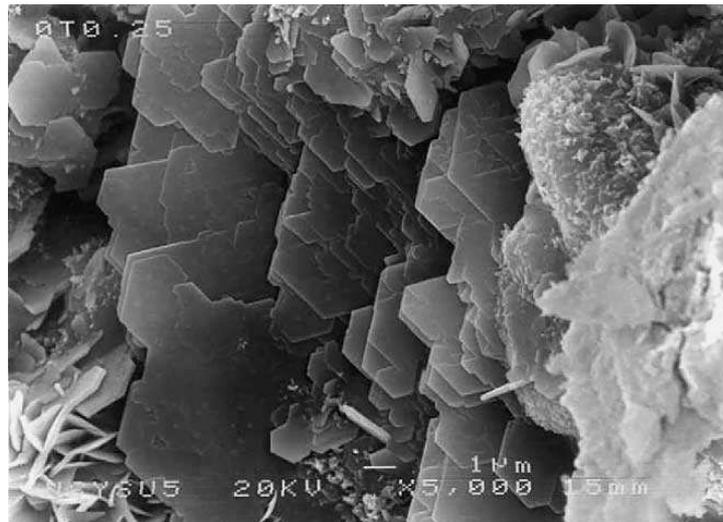


FIGURA 2.9– Cristais de hidróxido de cálcio na pasta de cimento, preparada com água de torneira. (SU, 2003)



FIGURA 2.10– Cristais de hidróxido de cálcio na pasta de cimento, preparada com água tratada magneticamente. (SU, 2003)

Para SU (2003) a morfologia dos produtos da hidratação tais como $C_3S_2H_3$ em gel, etringita (sulfoaluminato de cálcio) e pasta hidratada de monossulfato produzido com água tratada magneticamente é similar ao produzido com água de torneira. Entretanto, largos cristais de $Ca(OH)_2$ com placas hexagonais são observadas na FIG. 2.9 que foi produzida com água de torneira. As moléculas da água de torneira tendem a se aglomerar entre si formando conjuntos. As largas placas de $Ca(OH)_2$, na qual se encontra na zona de transição, podem ser produzidas depois do cimento ter reagido com estes conjuntos de moléculas de água. Na FIG. 2.10 mostra-se que os cristais de

Ca(OH)_2 na pasta de hidratação tende a ser menores e formados separadamente, porque as pequenas moléculas da água tratada magneticamente reagem com o cimento. Esta diferença explica porque a resistência à compressão de materiais cimentícios com água magnetizada são maiores que os com água de torneira.

3

ENSAIOS E METODOLOGIA

3.1 Introdução

Com o intuito de avaliar o comportamento do concreto produzido com água tratada magneticamente, optou-se por executar ensaios destrutivos e não destrutivos, visando com os primeiros a obtenção dos valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade estático e com os segundos qualificar os ganhos de trabalhabilidade e compacidade interna do concreto com a medição da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.

Neste capítulo serão apresentados os motivos da escolha desses ensaios e quais são as suas principais características. Apresenta-se assim, os já consolidados no meio científico, além de relatar um breve histórico da utilização do ensaio não destrutivo da ultra-sonografia, uma vez que cada vez mais este método vem ganhado espaço entre os pesquisadores.

3.2 Ensaaios Não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos (END) são aqueles que não geram nenhum tipo de dano à estrutura que se está ensaiando, uma vez que não provocam perda na capacidade resistiva da mesma.

Estes podem ser realizados em qualquer idade, sendo que na maioria das vezes, utilizam-se para estruturas novas, buscando ter um controle da evolução de sua resistência e de outras propriedades relevantes em estruturas de concreto como: corrosão, índice de vazios e permeabilidade. Quando aplicado a estruturas já existentes visam avaliar a sua integridade e capacidade resistiva a novas cargas.

De maneira geral, é permitido dizer que os ensaios não destrutivos são convenientes para:

- controle tecnológico;
- monitoramento do desenvolvimento da resistência;
- localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- verificação de danos provocados por incêndios;
- acompanhamento dos efeitos de aditivos e adições;

3.2.1 Ultra-som

Os primeiros relatos sobre estudos com ondas ultra-sônicas são datados de 1945, nos Estados Unidos. No início dos anos 70, surgiu o aparelho *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT), que por se tratar de aparelho portátil, de pouco peso e bateria própria viabilizou a utilização do ultra-som em estruturas já executadas.

Segundo COSTA(2004), o equipamento de ultra-sonografia foi desenvolvido inicialmente, para avaliar a uniformidade no interior das estruturas e a espessura do revestimento, monitorando as alterações internas da estrutura, detectando defeitos e anisotropia do material.

Mediante o fato do concreto ser um material muito heterogêneo, o tempo de propagação da onda ultra-sônica no seu interior, varia com uma série de fatores que podem ser divididos em dois grupos sendo:

Grupo 1 – Fatores Internos à Estrutura do Concreto

- Natureza do agregado miúdo.
- Natureza do agregado graúdo.
- Tipo de cimento.
- Relação a/c do concreto.
- Aditivos.
- Relação agregados/cimento.
- Densidade do material.
- Propriedades elásticas.
- Presença de armadura interna.

Grupo 2 – Fatores Externos à Estrutura do Concreto

- Umidade superficial da estrutura.
- Vibração do meio.
- Idade dos corpos-de-prova ensaiados.
- Meio a que a estrutura está submetida.
- Temperatura ambiente.
- Largura da peça a ser ensaiada.
- Modo de colocação dos transdutores sobre a superfície.
- Condições da superfície a ser ensaiada.

O método é baseado no fato de que a velocidade de propagação da onda ultra-sônica está ligada à qualidade do concreto, por exemplo, quanto maior a quantidade de vazios

no concreto, menor a velocidade do pulso ultra-sônico (UPV). Conhecendo-se a distância entre os transdutores emissor e receptor da onda ultra-sônica e medindo-se o tempo decorrido para este percurso calcula-se a velocidade de propagação da onda no concreto, podendo-se a partir da comparação com valores pré-definidos qualificar se o concreto é mais ou menos compacto, homogêneo, etc..

A propagação das ondas sonoras se dá da seguinte forma: Quando uma partícula é impulsionada, ela começa a vibrar e passa sua energia para as partículas adjacentes. Desse modo, a energia se propaga de uma partícula para as outras do meio. O ensaio se dá por meio da leitura das ondas longitudinais, que são aquelas nas quais as partículas do meio vibram na mesma direção da propagação da onda. A velocidade de propagação do som de uma onda longitudinal pode ser calculada pela EQ.(3.1)

$$V_L = \sqrt{\frac{E_{ci}(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.1)$$

Onde: E_{ci} = módulo de elasticidade de Young na origem (N/m²)
 μ = constante de poisson
 ρ = densidade do material (kg/m³)

As espessuras mínimas e máximas das peças dependerão da frequência das ondas ultra-sônicas geradas, de modo que quanto menor a frequência, maior a espessura/distância que poderá se utilizada.

De acordo com a NBR 8802:1994, é possível acoplar os transdutores à superfície de concreto de três maneiras distintas, sendo necessário uma perfeita lubrificação dos mesmos com graxas ou vaselina em pasta. A FIG. 3.1 indica quais são as três maneiras possíveis de se acoplar os transdutores.

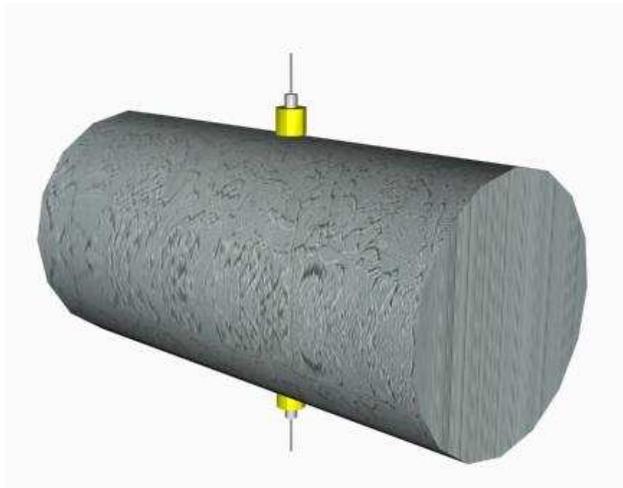
A NBR 8802:1994, ainda relata que os resultados devem ser apresentados referentes à velocidade, que é calculada utilizando-se a EQ.(3.2)

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.2)$$

Onde: V = velocidade de propagação (m/s)

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

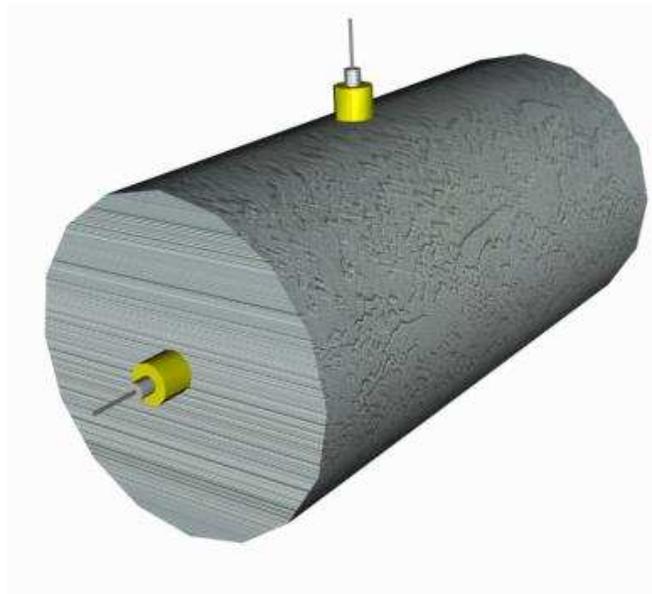
t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s)



(a) Transmissão direta



(b) Transmissão indireta



(c) Transmissão semi-direta

FIGURA 3.1– Posicionamento dos transdutores, segundo NBR 8802:1994

Segundo a NBR 8802:1994, é possível dizer que vários fatores influem nos valores da velocidade de propagação das ondas, sendo necessário um grande cuidado no sentido de evitar equívocos de leitura e interpretação de dados. A seguir são expostas algumas variáveis que apresentam influência nos resultados e que, por isto, devem ser consideradas:

- **Tipo de Concreto:** nos chamados concretos leves a velocidade de propagação da onda é menor do que nos concretos normais, para uma resistência à compressão especificada;
- **Umidade do Concreto:** a velocidade de propagação aumenta com umidade do concreto e esta influência acaba sendo de maior intensidade em concretos com níveis de resistência menores.
- **Nível de resistência do concreto:** segundo o ACI 228.IR-89 os resultados de velocidade são pouco sensíveis às variações da resistência, principalmente quando o concreto tem resistência acima de 30 MPa. À medida que a resistência é aumentada, ocorre um decréscimo de sensibilidade do ensaio, levando a crer que é questionável o uso desta técnica para estimativa de resistência do concreto.
- **Acabamento superficial do concreto:** a regularidade da superfície e o acoplamento perfeito dos transdutores são fatores de extrema importância na qualidade dos resultados a serem obtidos, utilizando-se com esta finalidade um gel de acoplamento dos transdutores.
- **Temperatura:** pequenas variações de temperatura não têm grande influência nos resultados de velocidade de propagação, contudo fora da faixa de 5°C a 30°C os valores começam a serem afetados por esta variável.
- **Barras de Aço embutidas no Concreto:** conforme o ACI 228.IR-89, a velocidade do pulso é aproximadamente 40% maior no aço do que no concreto, desse modo, é permitido concluir que as armaduras podem afetar consideravelmente os resultados. A influência das armaduras é função do diâmetro das barras e da sua posição em relação à direção da trajetória das ondas emitidas pelo aparelho de ultra-som.

3.2.1.1 Determinação da Homogeneidade do Concreto

Segundo COSTA (2004), o método de velocidade do pulso ultra-sônico auxilia na determinação da homogeneidade do concreto, e posteriormente para garantir a qualidade do mesmo. As heterogeneidades das peças de concreto, causam variações na velocidade do pulso, deste modo a resistência do concreto, varia em uma estrutura por causa das variações no material, fornecimento, mistura e por uma variada ou inadequada compactação. O método de velocidade de propagação da onda ultra-sônica é efetivo no estabelecimento de dados comparativos e para a avaliação qualitativa do concreto.

Para a análise dos dados qualitativos, deve ser feito um sistema de distribuição de pontos em forma de malha, de modo que toda a estrutura seja contemplada. Para isso, dependendo da quantidade de concreto a ser analisado, o tamanho da estrutura, a variabilidade esperada e a precisão requerida, o espaçamento entre os pontos da malha deve ser de aproximadamente 30 cm. Outras aplicações desta comparação qualitativa são a verificação da densidade do concreto e a localização de áreas de concreto poroso.

3.2.1.2 Aparelho para Ultra-sonografia

Para este ensaio utilizou-se o aparelho V Meter Mark II produzido pela James Instruments Inc. Non Destructive Testing Systems (FIG. 3.2).

De acordo com a literatura para corpos rígidos de concreto é possível utilizar pelo menos três tipos de transdutores com frequências distintas, sendo estas de 20 kHz, 54 kHz e 150 kHz (FIG. 3.3). A primeira é indicada na maioria das vezes para corpos de provas oriundo de estruturas já consolidadas, sendo possível à utilização das duas últimas para corpos de provas moldados em laboratórios, que se enquadra neste trabalho. Contudo, ficou comprovado por meio do estudo feito por COSTA (2004), que não existe diferença significativa de leitura do tempo de propagação da onda ultra-sônica, quando se utiliza transdutores de 54 kHz e 150 kHz para CP's de dimensão 10 x 20 cm, optando-se por utilizar neste trabalho os transdutores de 150 kHz.



FIGURA 3.2– Ultra-som V Meter Mark II – James Instruments Inc. Non Destructive Testing Systems



FIGURA 3.3– Transdutores de 150 kHz

O modo como os corpos-de-prova foram preparados para este ensaio será descrito mais adiante neste capítulo.

3.3 Ensaio Destrutivo

Os ensaios destrutivos são aqueles, como o próprio nome diz, que acarretam a estrutura ou aos corpos de provas danos irreversíveis. Estes ensaios estão atualmente bem

disseminados no meio científico, possuindo grande importância. Eles são descritos por meio das NBR 5739:1994 e da NBR 8522:2003, como exposto a seguir.

3.3.1 Resistência à Compressão

Para ensaiar os corpos-de-prova foi utilizado como base a norma NBR 5739:1994, que discorre sobre como proceder o ensaio e qual equipamento utilizar para o mesmo.

Seguindo essa referência utilizou-se a máquina servo-controlada PC 200 – EMIC (FIG. 3.4), que se enquadra nas características pré-estabelecidas pela norma. Este equipamento possui um sistema de aquisição de forças digital, cuja a carga máxima atingida é emitida em um relatório final (VER ANEXO A).



FIGURA. 3.4– Máquina Servo Controlada – PC 200 - EMIC

Este equipamento é totalmente controlado por um computador, possibilitando que a carga de ensaio seja aplicada continuamente e sem choques.

Para o cálculo da resistência à compressão deve-se dividir a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, devendo-se o resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa.

Segundo a NBR 5739:1994, é necessário que os corpos-de-prova sejam rompidos em idades especificadas com tolerâncias máximas conforme a TAB. 3.1, sendo importante frisar que a idade deve ser contada a partir do momento em que o cimento é posto em contato com a água de mistura.

TABELA 3.1– Tolerância de tempos para o ensaio de compressão em função da idade de ruptura (NBR5739:1994)

Idade do Ensaio	Tolerância Permitida
24 h	± 30 min ou 2,1%
3 d	± 2 h ou 2,8%
7 d	± 6 h ou 3,6%
28 d	± 20 h ou 3,0%
60 d	± 36 h ou 2,5%
90 d	± 2 d ou 2,2%

3.3.2 Módulo de Elasticidade

O ensaio de Módulo de Elasticidade é feito de acordo com a NBR 8522:2003.

Esta norma visa estabelecer métodos para a determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação, à compressão, do concreto endurecido, em corpos-de-prova cilíndricos, objetivando traçar o diagrama tensão-deformação. Para tanto é necessário que exista um equipamento que seja capaz de aplicar a carga indicada na razão especificada e mantê-la ao nível requerido, durante todo o procedimento de ensaio. A máquina utilizada para o ensaio do módulo de elasticidade foi a DL 3000 (FIG. 3.5), produzida pela EMIC e de propriedade do Laboratório de Análise

Experimental de Estruturas (LAEES), pertencente ao Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES), da Escola de Engenharia da UFMG.

Esta máquina aplica o carregamento e aumenta a deformação específica à velocidade de $((10 \pm 2) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1})$, de acordo com a NBR 8522:2003, tendo sido para isso desenvolvido um *script* (software), que foi instalado no computador de controle da máquina DL 3000 e disponibilizado para a utilização no LAEES.

Para medir a deformação foram utilizados instrumentos conhecidos como *Strain-Gage* (extensômetro eletrônico para medição de pequenas deformações em corpos de prova rígidos), que foram afixados de maneira que os pontos de medição ficassem equidistantes dos extremos do corpo-de-prova, com tolerância de $\pm 5 \text{ mm}$.



FIGURA 3.5– Máquina DL 3000 – EMIC

Nas FIG. 3.6 e FIG. 3.7, apresentam-se respectivamente, o *Strain-Gage* e a maneira como o mesmo foi afixado no corpo-de-prova, a ser ensaiado.

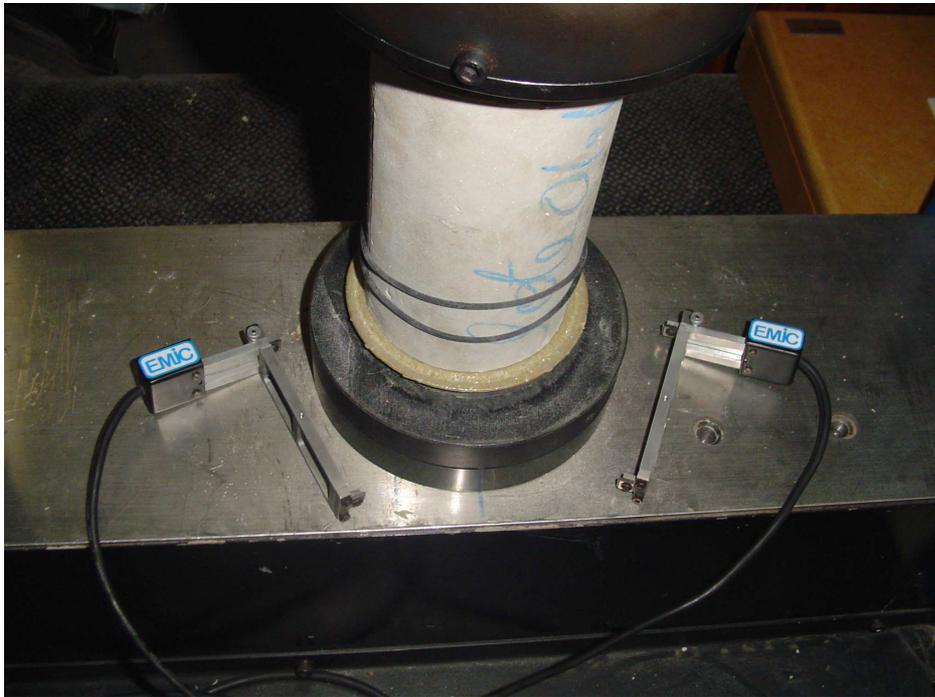


FIGURA 3.6– Strain Gage



FIGURA 3.7– Strain Gage afixado ao corpo de prova.

Ainda segundo a NBR 8522:2003, para o cálculo do módulo de elasticidade, E_{ci} , em GPa, é necessário que se aplique uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (σ_b), sendo mantido este nível de tensão por aproximadamente 60 s. Posteriormente deve ser utilizada a EQ. (3.3), para o cálculo da mesma.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} 10^{-3} \quad (3.3)$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, em MPa ($\sigma_b = 0,3 f_c$);

σ_a é a tensão básica, em MPa ($\sigma_a = 0,5$ MPa);

ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

Lembrando que o resultado deve sempre ser arredondado para a primeira casa decimal e expressos em GPa.

A modelagem, preparação e armazenamentos dos corpos-de-prova serão feitos de acordo com a NBR 5738:1994 e será apresentada nos itens a seguir.

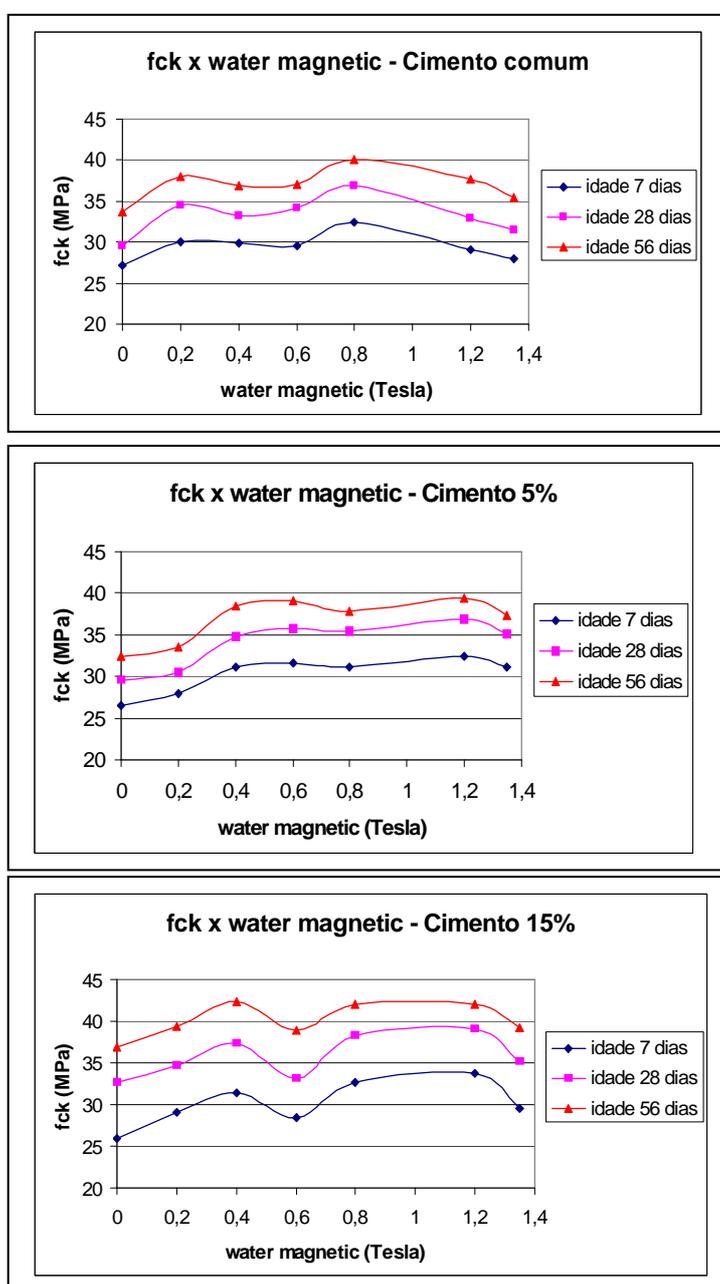
3.4 Procedimento Experimental

Para o desenvolvimento do projeto experimental, a metodologia dos trabalhos é uma etapa importante abrangendo tanto o sistema de magnetização a ser utilizado como os procedimentos de moldagem, cura e preparação dos corpos-de-prova, para a realização dos ensaios.

Assim, as etapas de produção e ensaios dos corpos-de-prova de concreto tiveram seus procedimentos planejados para promover um estudo comparativo entre o concreto

fabricado convencionalmente e aquele produzido utilizando-se água tratada magneticamente.

Por meio do estudo feito por SU (2000), sobre as amostras de concreto produzido com água tratada magneticamente, observou-se que o tratamento magnético influi na resistência do concreto para diferentes traços em dois pontos distintos (cristas), sendo estes na faixa de 0,2 a 0,4 Tesla(T) e outro nas proximidades de 0,8 T, respectivamente. (FIG. 3.8).



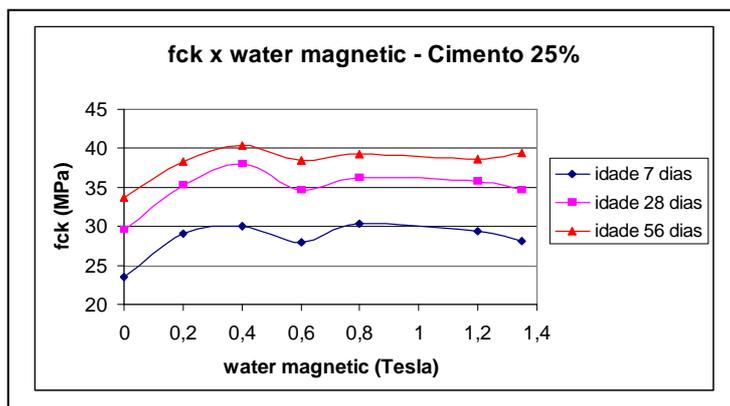


FIGURA 3.8– Gráficos analisando os dados obtidos por SU (2000)

Em função deste estudo desenvolvido por SU (2000) e o trabalho de LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), discutiu-se a possibilidade de atingir um campo magnético de intensidade aproximada de 0,8 T (crista global), tendo sido esta hipótese, descartada uma vez que para alcançá-lo seria necessário a criação de um eletroímã que levaria a um aumento da temperatura externa, necessitando de um aparelho para troca do calor elevando sobremaneira os custos de operação deste trabalho.

3.4.1 Condicionador físico

O aparelho utilizado para magnetização da água foi o condicionador físico (FIG. 3.9) produzido pelo professor Wellerson Romaniello. Este equipamento possui o princípio apresentado no item 2.2.3.1 e possui duas placas de ímãs distanciadas, de modo a permitir um fluxo de água “optimal” e perpendicular ao campo magnético produzido.



FIGURA 3.9– Condicionador físico

Na FIG. 3.10 é apresentado um esquema de como estas placas estão instaladas no condicionador físico.



FIGURA 3.10– Esquema do condicionador físico

3.4.2 Esquema Experimental Para Magnetização da Água

Levando-se em consideração as necessidades impostas pelo campo magnético a ser atingido (entre 0,2 T e 0,4 T) e da disponibilidade do condicionador físico e dos equipamentos do LAEES, chegou-se à conclusão que este esquema experimental (FIG. 3.11) deve atender aos seguintes critérios:

- 1) altura de bombeamento do reservatório até o Condicionador Físico, aproximadamente 1 (um) metro;
- 2) velocidade ideal do fluxo, entre 900m/h a 1200m/h ou 0,25 m/seg a 0,33 m/seg;
- 3) registro de gaveta acoplado ao Condicionador Físico, para controle desta velocidade;
- 4) bomba com capacidade mínima de 2000 L/h.
- 5) tubulação de aproximadamente 2,0 metros para que o fluxo passe pelo Condicionador Físico, com um escoamento contínuo e sem alterações bruscas ou turbulentas.

Por meio destas definições preliminares, foi desenvolvido o esquema experimental conforme a FIG. 3.11 e depois instalado no LAEES, conforme as FIG. 3.12 e FIG. 3.13. O esquema sofreu algumas alterações devido ao espaço disponível no LAEES, para a execução do esquema.

Na FIG. 3.11, os índices indicam:

- (I) – reservatório de armazenagem;
- (II) – bomba centrífuga com capacidade de 2000 L/h;
- (III) – registro de vazão;
- (IV) – condicionador Físico;
- (V) – reservatório de captação.

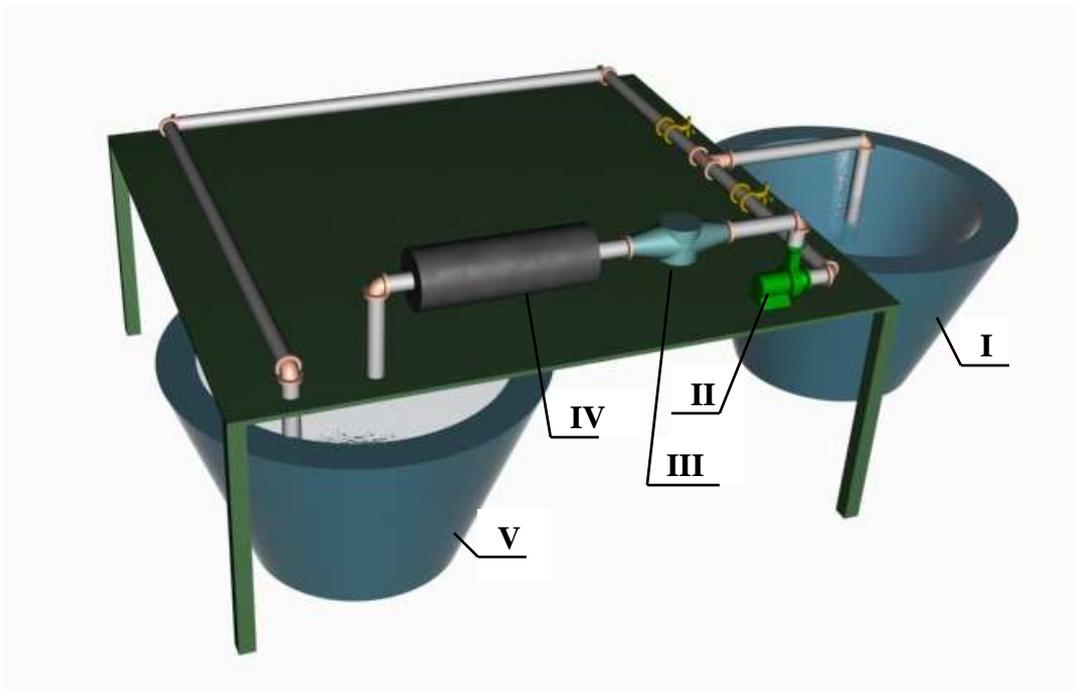


FIGURA 3.11– Croqui do esquema experimental



FIGURA 3.12– Foto da instalação do esquema experimental



FIGURA 3.13– Foto da instalação do esquema experimental

Neste sistema de magnetização, a água foi retirada do reservatório de armazenamento por meio de uma bomba centrífuga, instalada dentro do mesmo (FIG. 3.14) e bombeada até o condicionador físico, onde sofria todo o tratamento magnético. Ao final da tubulação foi acoplado um registro de gaveta, regulado por meio de testes para alcançar uma velocidade de 0,30 m/seg, dentro do intervalo de velocidades acima determinado.

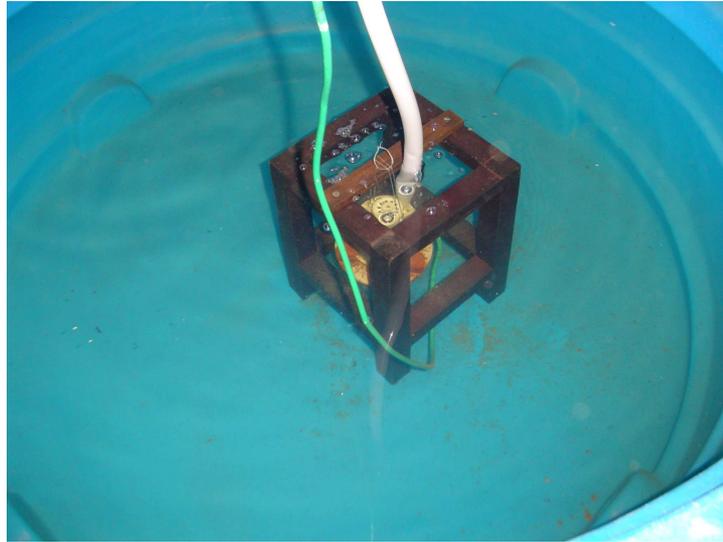


FIGURA 3.14– Bomba centrífuga

A água magnetizada foi armazenada no reservatório de captação, sendo posteriormente utilizada na moldagem dos corpos-de-prova. É importante salientar que a magnetização da água ocorria momentos antes da fabricação dos mesmos, uma vez que a bibliografia diverge em relação ao tempo que esta se mantém magnetizada, uma vez que vários fatores influenciam este processo, como: a temperatura ambiente, o grau de agitação do líquido, dentre outros. Alguns autores afirmam que água pode apresentar os efeitos da magnetização até 6 (seis) horas após início do processo.

3.4.3 Comprovação da magnetização da água

Devido ao fato que as alterações ocorridas na água são micro-estruturais ou internas, ou seja, não perceptível a olho nu, foram propostos para a comprovação da magnetização dois ensaios:

- 1) análise do campo magnético gerado pelos ímãs internos ao Condicionador Físico;
- 2) análise do valor da tensão superficial da água.

Estes ensaios são apresentados a seguir.

3.4.3.1 Ensaio Para Medição do Campo Magnético Gerado Pelo Condicionador Físico

Para a comprovação que os ímãs internos ao Condicionador Físico se encontrava em perfeito estado e atingia um campo na faixa de 0,2 T a 0,4 T, utilizou-se o aparelho medidor de campo magnético, GaussMeter MG-2000, produzido pela Magnetos Gerais (FIG. 3.15).

Este aparelho possui uma sonda (FIG. 3.16), que passa entre os ímãs, informando o campo magnético existente. Neste ensaio o GaussMeter acusou valores entre 1500 Gauss a 2100 Gauss ou seja 0,15 Tesla a 0,21 Tesla



FIGURA 3.15– Medidor de campo magnético – GaussMeter MG-2000



FIGURA. 3.16– Sonda instalada no GaussMeter MG-2000

3.4.3.2 Ensaio da Tensão Superficial da Água Magnetizada.

Como foi apresentado no capítulo 2, a tensão superficial da água é um parâmetro relativamente simples de ser obtido e permite quantificar a eficiência do sistema de magnetização utilizado. O procedimento consiste na comparação de amostras da água antes e depois da sua passagem pelo campo magnético, sendo esperado que os resultados acusem uma redução da tensão superficial.

Deste modo, para avaliar as alterações ocorridas na tensão superficial e comprovar a eficiência do sistema de magnetização da água, foi utilizado o tensiômetro digital K10st fabricado pela KRUSS (FIG. 3.17), onde foram examinados três amostras distintas de água, além de uma amostra de água destilada para a calibração do aparelho.

Os valores obtidos nas amostras estão apresentados na TAB. 3.2. Por meio desta tabela foi comprovado que o condicionador físico se encontra em perfeito estado e que a teoria apresentada em relação à formação da indução magnética somente ocorre mediante a existência de velocidade nos íons livres. Como ilustração uma das amostras ensaiadas foi retirada da “Jarra Azul”, um produto comercializado e amplamente divulgado em

Belo Horizonte, que promete uma série de benefícios à saúde daqueles que a consomem.

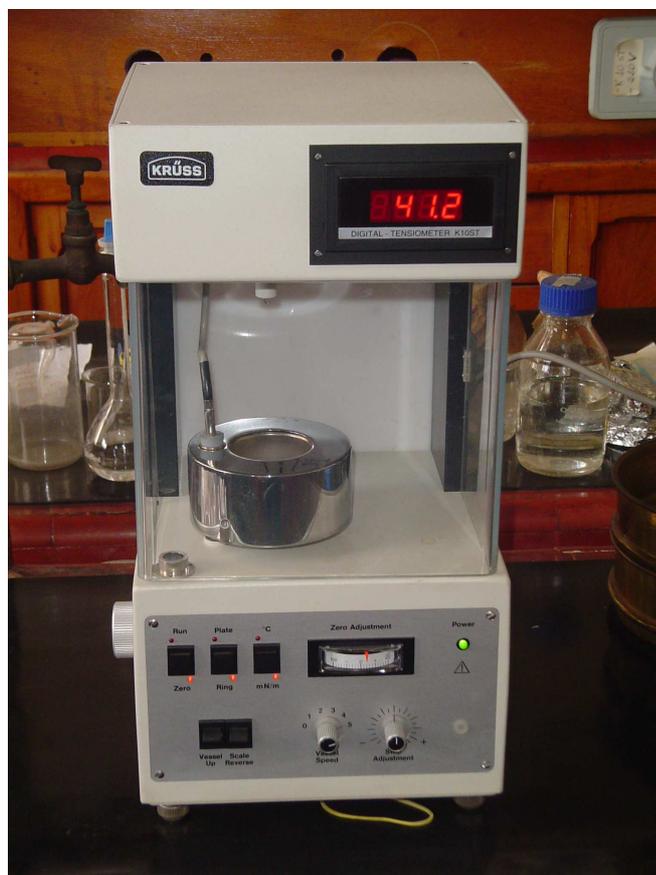


FIGURA 3.17– Tensiômetro Digital k10st - KRUSS

TABELA 3.2– Valores referentes à tensão superficial de amostras de água

Amostras	Tensão Superficial (mN/metro)	Média
Água Comum	71,5	71,43
	71,2	
	71,6	
Água Magnetizada (Condicionador Físico)	65,7	66,4
	67,3	
	66,2	
Água “Jarra Azul”	72,5	72,47
	72,3	
	72,4	
Água Destilada	72,2	72,2

Os resultados obtidos para esta amostra são praticamente os mesmos obtidos para a água destilada, comprovando mais uma vez que a velocidade do fluxo é fundamental na obtenção do tratamento magnético.

Por meio da literatura, constatou-se que o valor da tensão superficial pode ser alterado de acordo com a pureza e temperatura do líquido, sendo que o segundo item pode ser descartado para este experimento uma vez que a análise foi feita em um mesmo ambiente. Em relação a este fato é possível alegar que a redução ocorrida entre a água comum e água destilada se deve à presença de impurezas na mesma.

Segundo AMIRI (2005), a tensão superficial da água magnetizada deve ter uma redução de aproximadamente 8 mN/m, passando de 72,4 mN/m para 64 mN/m, após a primeira passagem desta sobre o campo magnético, reduzindo ainda mais a partir de uma segunda passagem pelo mesmo campo magnético.

De acordo com os resultados obtidos, constatou-se que a água magnetizada produzida com a utilização do Condicionador Físico, obteve uma queda na tensão superficial de aproximadamente 6 mN/m. Este resultado foi considerado satisfatório uma vez que o campo magnético utilizado neste experimento foi de aproximadamente 0,2 T.

3.4.4 Definição dos traços

Tendo conseguido resultados satisfatórios em relação ao esquema experimental, passou-se à fase de definição dos traços utilizados na comparação do concreto utilizando água tratada magneticamente e água comum. Para tanto, foi seguido como referência COSTA(2004).

Para a elaboração desta dissertação foi executado um projeto piloto, para adaptação dos traços apresentados por COSTA(2004), uma vez que alterou-se as resistências apresentadas por este de 20 MPa para 25 MPa e de 50 MPa para 35 MPa, tendo em vista

que 25 MPa é o valor mínimo exigido pela NBR 6118:2003 para obras urbanas, e que a resistência à compressão de 50 MPa não poderia ser atingida sem o uso de aditivo.

Com a retirada dos aditivos e a correção dos traços, os mesmos ficaram definidos utilizando um fator água/cimento de 0,49 e 0,69, para concretos com resistências estimadas de 35 MPa e 25 MPa, respectivamente.(TAB. 3.3)

TABELA. 3.3– Traços em pesos e caracterização dos concretos

Nome	Código	Traço Unitário							
		Cimento			Areia	Brita		Fator Água / cimento	
		CP II	CPV-plus	CPV-RS		Gnaisse	Calcária	Água Comum	Água Magnetizada
Traço 01	CII-BC-AC	1	x	x	2,95	x	2,7	0,69	x
Traço 02	CII-BC-AM	1	x	x	2,95	x	2,7	x	0,69
Traço 03	CV-BC-AC	x	1	x	1,74	x	1,85	0,49	x
Traço 04	CV-BC-AM	x	1	x	1,74	x	1,85	x	0,49
Traço 05	CII-BG-AC	1	x	x	2,95	2,7	x	0,69	x
Traço 06	CII-BG-AM	1	x	x	2,95	2,7	x	x	0,69
Traço 07	CV-BG-AC	x	1	x	1,74	1,85	x	0,49	x
Traço 08	CV-BG-AM	x	1	x	1,74	1,85	x	x	0,49
Traço 09	CVR-BC-AC	x	x	1	1,74	x	1,85	0,49	x
Traço 10	CVR-BC-AM	x	x	1	1,74	x	1,85	x	0,49
Traço 11	CVR-BG-AC	x	x	1	1,74	1,85	x	0,49	x
Traço 12	CVR-BG-AM	x	x	1	1,74	1,85	x	x	0,49

3.4.5 Determinação do Número de Corpos-de-Prova

A definição da quantidade de corpos-de-prova utilizados dependia do número de fatores variantes, tendo estes sido definidos em quatro: o tipo de água, o tipo de agregado graúdo, o tipo de cimento (classe de resistência à compressão) e a idade do ensaio.

Desta forma foram utilizados dois tipos de água (água comum e água tratada magneticamente), dois tipos de agregado graúdo (Brita Gnaisse - BG e Brita Calcária - BC), três tipos de cimento (CPII-E-32, CPV-PLUS, CPV-RS) e 6 idades de ensaio (3d, 7d, 14d, 28d, 56d e 90d)

Os tipos de água (2), os tipos de agregados graúdos (2) e os tipos de cimento (3) definiram doze traços distintos. O cimento CII-E-32 foi utilizado para produzir concreto com resistência à compressão estimada de 25 MPa e os cimentos CPV- PLUS e CPV-RS para concreto com resistência de 35 MPa. (TAB. 3.3).

Para determinar a quantidade de corpos-de-prova, foi utilizado como recomenda a NBR 5739:1994, três CP's para cada ensaio de compressão e módulo de elasticidade, uma vez que dois seriam para o ensaio efetivamente e o terceiro para contra-prova. Como foram ensaiados três corpos-de-prova para cada uma das seis idades, para cada traço foram moldados 18 CP's, perfazendo um total de 216 CP's (18CP's x 12 Traços).

3.4.6 Propriedades dos Materiais

3.4.6.1 Agregados Graúdos / Miúdos

Os agregados graúdos e miúdos, utilizados neste trabalho, foram adquiridos em depósitos de materiais de construção da região de Belo Horizonte, sendo denominados BG – brita gnaisse, BC – brita calcária dolomítica, e a areia bruta natural da cidade de Esmeraldas.

Uma vez que o agregado miúdo possuía uma concentração muito elevada de detritos, este foi peneirado e posteriormente analisado.

Foram feitos ensaios para caracterizar estes agregados, baseando-se nas NBR 7211:2005 e NBR NM 248:2003 e NBR NM 53:2003 como é apresentado a TAB. 3.4.

TABELA 3.4– Caracterização dos agregados

Características	Areia natural	Brita 1 (Gnaisse)	Brita 1 (Calcária)	Método de Ensaio
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	19	19	NBR NM248
Módulo de Finura	2,08	1,81	2,09	NBR NM248
Massa específica (g/cm ³)	2,59	2,70	2,72	NBR 9937
Teor de Impurezas Orgânicas	+ clara	---	---	NBR 7220
Massa unitária (g/cm ³)	1,52	1,54	1,58	NBR 9937

3.4.6.2 Cimentos

Seguindo como referência SU(2000), optou-se por utilizar três tipos distintos de cimento, sendo eles: CP II-E-32 (Cimento portland composto), CP V – ARI – PLUS (Cimento de alta resistência inicial) e CP V – RS (Duracem AD 300 (BD)).

Estes cimentos foram doados pela fábrica de cimento Ciminas, do grupo Holcim, sendo os mesmos escolhidos, como segue:

CP II -E-32 → Cimento altamente comercializado em Belo Horizonte;

CP V -ARI-PLUS → Cimento com alta resistência inicial, apresentando pequena quantidade de escória.

CP V – RS → Produto novo no mercado, com alta resistência inicial além de ser resistente a sulfatos.

3.4.7 Moldagem dos corpos-de-prova

Seguindo como referência a NBR 5738:1994, foram moldados 216 corpos-de-prova cilíndricos para os 12 traços distintos, como citado no item 3.4.3, com as dimensões de 10x20 cm.

Os materiais foram pesados e armazenados em sacos plásticos até o dia dos ensaios, para evitar perda de umidade. No dia programado, os materiais foram lançados na betoneira de 80 litros e submetidos aos procedimentos recomendados na NBR 5738:1994, conforme mostrado nas FIG. 3.18 e FIG. 3.20.

Para a realização dos traços que possuíam água tratada magneticamente na sua especificação, recolhia-se a mesma, minutos antes do ensaio para que não houvesse perda de magnetização. Essa água era recolhida por meio de pipetas conforme a FIG. 3.19.

O processo de adensamento utilizado foi o manual, medindo-se o abatimento do tronco de cone (“Slump”), para todos os traços conforme NBR NM 67:1998, utilizando o equipamento apresentado à FIG. 3.21. Nas FIG. 3.22 e FIG. 3.23, é apresentado a realização do ensaio.



FIGURA 3.18– Betoneira de 80 Litros



FIGURA 3.19– Captação da água magnetizada



FIGURA 3.20– Moldagem dos corpos-de-prova



FIGURA 3.21– Tronco de cone



FIGURA 3.22– Desforma do tronco de cone



FIGURA 3.23– Medição do “Slump”

3.4.8 Cura e preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram submetidos ao processo de cura de acordo com a NBR 5738:1994, e logo após a moldagem, foram cobertos por material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto e protegê-lo da ação das intempéries. Estes CP's foram armazenados no laboratório até o próximo dia útil, para que depois fossem desformados e submersos no reservatório de água comum, conforme FIG. 3.24.



FIGURA 3.24– Cura final dos CP's imersos em água comum

Para a análise dos traços, os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão nas idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias, sendo que nesta última data realizou-se também o ensaio do módulo de elasticidade estático.

Até o dia dos ensaios, os CP's foram mantidos neste reservatório, sendo retirados apenas momentos antes para que fossem capeados, obtendo assim um acabamento final para os ensaios de resistência e módulo de elasticidade.

4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Nesse capítulo, os resultados dos ensaios são apresentados e analisados estatisticamente, tendo sido feito algumas filtrações nos dados para retirar possíveis influências externas e reduzir ao máximo a quantidade de variáveis aleatórias embutidas no sistema.

É importante salientar que foi feito também, além da análise quantitativa dos resultados encontrados nos corpos-de-prova, uma análise qualitativa daqueles fabricados com água tratada magneticamente, relacionando aspectos como trabalhabilidade, homogeneidade e porosidade.

A variável principal dos ensaios realizados é o tipo de água utilizada no amassamento do concreto, ou seja, água comum ou de torneira e água tratada magneticamente, formando dois grupos distintos de traços. Em cada um dos grupos as demais variáveis são:

- Tipo de cimento (CPII-E-32, CPV Plus, CPV RS).
- Tipo de agregado graúdo (brita gnaisse – BG, - Brita Calcária Dolomítica - BC).
- Idade do ensaio (3d, 7d, 14d, 28d, 56d, 90d).

Para efeito deste trabalho denominou-se por resistência real o valor obtido na prensa universal servo-controlada, após o rompimento dos corpos-de-prova no ensaio de resistência à compressão.

De maneira geral, procurou-se utilizar o mesmo funcionário do LAEES, para realização de um mesmo ensaio, visando com isto reduzir a influência externa nos resultados, principalmente naqueles referentes à análise qualitativa. Para a avaliação da compacidade e homogeneidade a partir do ensaio do ultra-som, os corpos-de-prova eram retirados da caixa d'água de armazenamento e ensaiados cinco horas após, de forma que todos os CP's tivessem o mesmo percentual de umidade no momento de realização desse ensaio.

4.2 Análise Estatística

A análise estatística é uma importante ferramenta para validação de uma metodologia de medição. Assim, por meio dos programas “Statistica” e “Excel”, foram ajustados modelos para os dados analisados, sendo visualizada a influência das diversas variáveis.

4.2.1 Resistência à compressão – Análise Geral

Para a análise da resistência à compressão foram ensaiados três corpos-de-prova para cada uma das seis idades pré-estabelecidas. Estes três resultados foram avaliados de modo a suprimir, quando necessário, valores fora do padrão, traçando-se posteriormente gráficos comparando os valores da evolução dessas resistências com a idade para os dois grupos analisados, com água de torneira e tratada magneticamente.

Para uma melhor exposição dos dados, estes serão apresentados primeiramente em tabelas e posteriormente em gráficos respectivos, com as devidas observações.

Na TAB. 4.1, são apresentados os resultados obtidos para a resistência real dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).

TABELA 4.1– Resistência real (MPa) dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 01 CII-BC-AC	3 dias	9,73	9,85	0,21	9,49	9,86
	7 dias	15,80	15,59	0,87	15,05	16,76
	14 dias	19,66	19,99	0,66	18,90	20,10
	28 dias	21,07	21,29	0,71	20,29	21,65
	56 dias	24,55	24,36	0,92	23,74	25,55
	90 dias	25,81	25,36	1,20	24,89	27,16
Traço 02 CII-BC-AM	3 dias	14,18	14,62	1,22	12,79	15,11
	7 dias	20,23	20,65	0,80	19,30	20,74
	14 dias	21,75	22,77	2,69	18,70	23,78
	28 dias	25,75	26,17	0,75	24,88	26,20
	56 dias	28,12	27,78	0,70	27,65	28,92
	90 dias	28,84	29,06	0,67	28,09	29,36

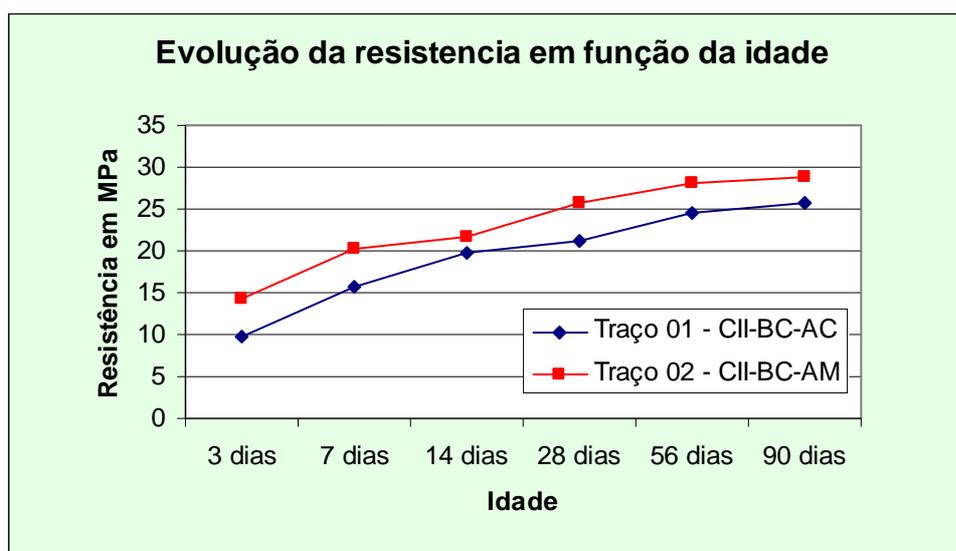


FIGURA 4.1– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM)

Considerando a FIG. 4.1, observa-se que o tratamento magnético influenciou de maneira positiva o ganho de resistência à compressão, tendo um aumento percentual em todas as idades, sendo possível perceber também, que esse aumento diminui com a evolução da idade ensaiada, conforme apresentado na TAB. 4.2.

TABELA 4.2– Variação percentual da resistência real dos traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	45,69%
7 dias	28,02%
14 dias	10,61%
28 dias	22,19%
56 dias	14,51%
90 dias	11,74%

Na seqüência são apresentados na TAB. 4.3, os resultados obtidos para a resistência real dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM). Posteriormente na FIG. 4.2, é mostrado o gráfico comparativo da evolução das resistências com a idade.

TABELA 4.3– Resistência real (MPa) dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 03 CV-BC-AC	3 dias	27,14	27,75	2,51	24,38	29,28
	7 dias	34,22	34,08	0,79	33,51	35,06
	14 dias	37,85	38,03	1,61	36,16	39,36
	28 dias	39,39	38,32	2,47	37,64	42,21
	56 dias	37,73	38,62	2,83	34,57	40,01
	90 dias	40,89	40,91	2,09	38,79	42,96
Traço 04 CV-BC-AM	3 dias	35,35	35,83	0,97	34,24	35,99
	7 dias	37,00	37,47	2,01	34,80	38,74
	14 dias	38,00	39,25	2,95	34,63	40,11
	28 dias	39,50	37,29	4,04	37,05	44,16
	59 dias	41,27	42,36	2,01	38,95	42,50
	90 dias	41,68	42,84	3,60	37,64	44,55

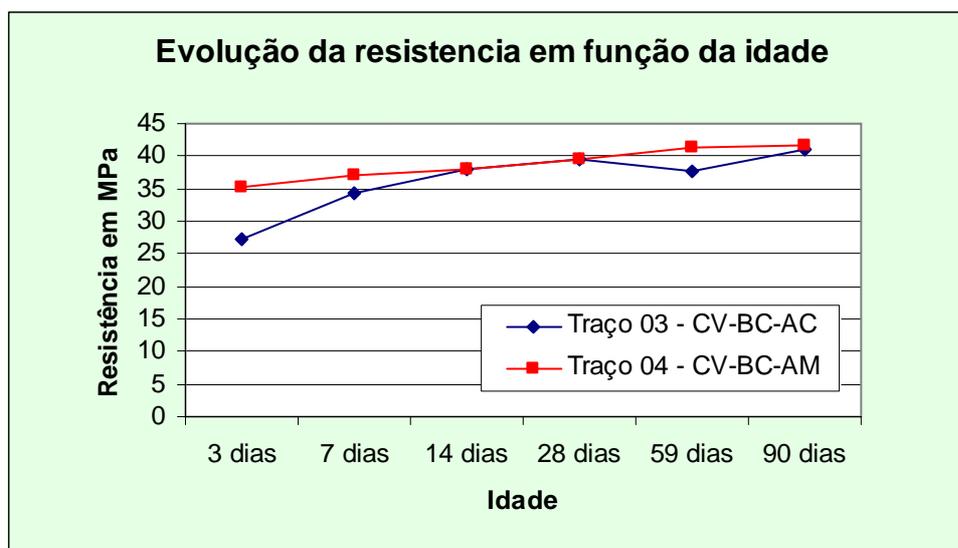


FIGURA 4.2– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)

Pelos dados apresentados na FIG. 4.2 e pelo estudo comparativo mostrado na TAB. 4.4, percebe-se que o tratamento magnético, para este traço específico, apresentou acréscimo na resistência apenas nas primeiras idades ensaiadas.

TABELA 4.4– Variação percentual da resistência real dos traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	30,27%
7 dias	8,14%
14 dias	0,39%
28 dias	0,27%
56 dias	9,37%
90 dias	1,94%

Na TAB. 4.5, são apresentados os resultados obtidos para a resistência real dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM). Posteriormente na FIG. 4.3, é mostrado o gráfico comparativo da evolução das resistências com a idade.

TABELA 4.5– Resistência real (MPa) dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 05 CII-BG-AC	3 dias	13,30	13,33	0,23	13,06	13,51
	7 dias	20,04	20,40	0,65	19,29	20,44
	18 dias	25,38	25,35	0,61	24,78	25,99
	28 dias	25,89	25,48	1,25	24,89	27,29
	56 dias	27,63	28,59	2,32	24,98	29,32
	90 dias	29,52	29,27	1,69	27,96	31,32
Traço 06 CII-BG-AM	3 dias	12,52	12,50	0,24	12,29	12,78
	7 dias	20,08	20,29	0,56	19,44	20,50
	14 dias	24,42	24,45	1,05	23,36	25,45
	28 dias	25,77	25,95	0,62	25,07	26,27
	56 dias	26,89	26,39	0,98	26,27	28,02
	90 dias	27,26	28,32	2,27	24,66	28,81

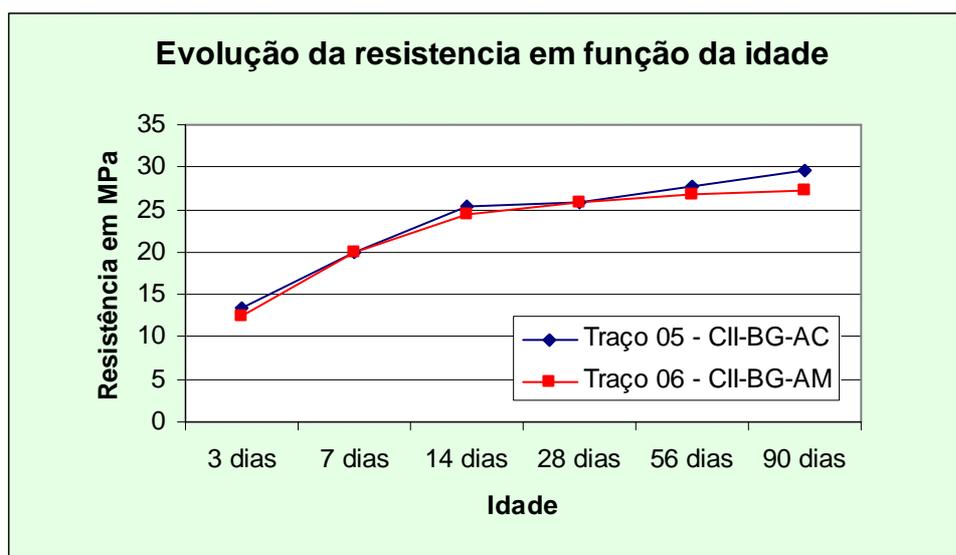


FIGURA 4.3– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM)

Pelos dados apresentados na FIG. 4.3 e pelo estudo comparativo mostrado na TAB. 4.6, percebe-se que o tratamento magnético, para este traço específico, não apresentou influência sobre o concreto produzido.

TABELA 4.6– Variação percentual da resistência real dos traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	-5,84%
7 dias	0,18%
14 dias	-3,76%
28 dias	-0,48%
56 dias	-2,67%
90 dias	-7,64%

Na seqüência, são apresentados na TAB. 4.7, os resultados obtidos para a resistência real dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM). Posteriormente na FIG. 4.4, é mostrado o gráfico comparativo da evolução das resistências com a idade.

Para o traço 08 analisado, as idades não foram as especificadas uma vez que, na época dos ensaios de 7, 14 e 28 dias, o laboratório se encontrava fechado devido a feriados. Contudo foi feita uma interpolação numérica, para correção desta diferença.

TABELA 4.7– Resistência real (MPa) dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 07 CV-BG-AC	3 dias	37,85	37,50	0,75	37,35	38,71
	7 dias	42,06	42,61	1,66	40,20	43,38
	14 dias	45,12	45,38	1,15	43,86	46,12
	28 dias	49,81	49,69	1,24	48,64	51,10
	56 dias	50,01	49,40	2,70	47,66	52,95
	90 dias	50,16	49,98	0,91	49,34	51,14
Traço 08 CV-BG-AM	3 dias	37,78	40,60	7,03	29,77	42,97
	11 dias	45,43	45,16	3,14	42,44	48,70
	13 dias	48,47	48,89	2,15	46,15	50,37
	31 dias	58,00	58,21	1,12	56,80	59,00
	56 dias	55,80	56,10	1,72	53,95	57,34
	90 dias	55,86	54,40	3,77	53,04	60,15

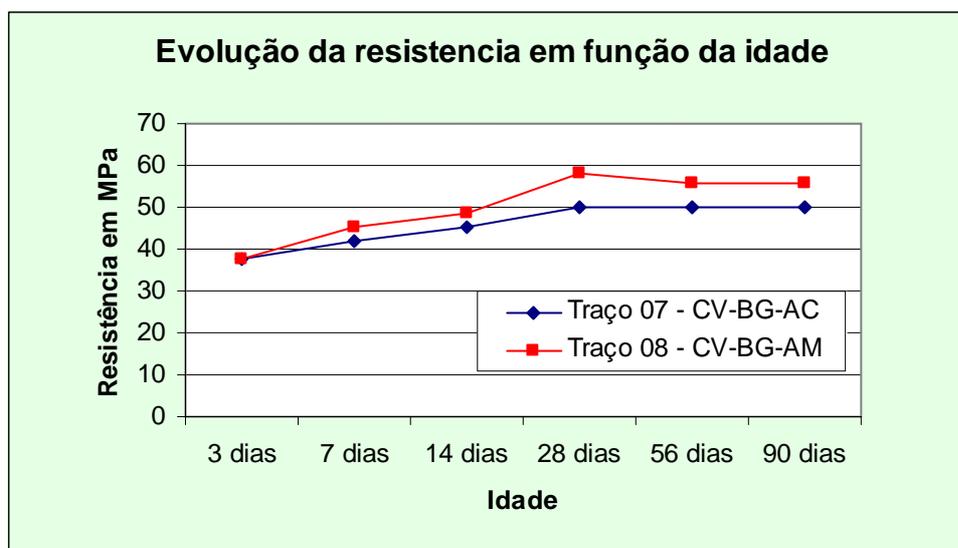


FIGURA 4.4– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)

De acordo com os resultados apresentados na FIG. 4.4 e pelo estudo comparativo mostrado na TAB. 4.8, percebe-se que o tratamento magnético, para este traço especificado, representou uma evolução na resistência à compressão do concreto, com o acréscimo da idade, ficando praticamente constante para as idades de 56 e 90 dias.

TABELA 4.8– Variação percentual da resistência real dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	-0,19%
7 dias	8,02%
14 dias	7,43%
28 dias	16,45%
56 dias	11,58%
90 dias	11,38%

Na TAB. 4.9, são apresentados os resultados obtidos para a resistência real, dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM).

TABELA 4.9– Resistência real (MPa) dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 09 CVR-BC-AC	7 dias	31,49	31,35	1,83	29,73	33,39
	14 dias	34,64	34,77	2,09	32,48	36,65
	28 dias	36,26	34,78	3,18	34,10	39,91
	59 dias	37,09	36,83	0,54	36,73	37,72
	90 dias	36,47	36,21	0,53	36,11	37,08
Traço 10 CVR-BC-AM	8 dias	31,74	31,87	1,78	29,90	33,46
	14 dias	35,21	35,26	0,88	34,31	36,06
	28 dias	37,57	37,71	0,76	36,75	38,26
	56 dias	38,46	38,61	0,89	37,50	39,26
	90 dias	37,93	37,80	1,01	36,98	38,99

Na seqüência, é apresentado na FIG. 4.5, o gráfico comparativo da evolução das resistências com a idade dos ensaios. Nestes dois traços a idade de três dias não pode ser medida, uma vez que os ensaios coincidiram com feriados, inviabilizando a realização. A interpolação numérica, também não pode ser realizada, pelo fato de não termos valores anteriores a três dias.

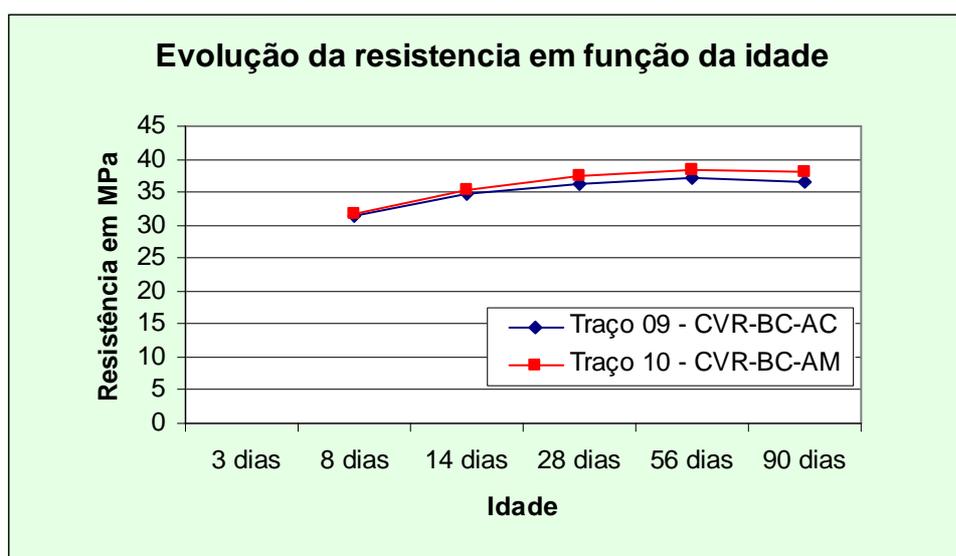


FIGURA 4.5– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)

De acordo com os resultados apresentados na FIG. 4.5 e pelo estudo comparativo mostrado na TAB. 4.10, percebe-se que o tratamento magnético, para este traço específico, apresentou um pequeno acréscimo para a resistência à compressão do concreto, tendendo a ficar constante para as últimas idades.

TABELA 4.10– Variação percentual da resistência real dos traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	---
7 dias	0,81%
14 dias	1,65%
28 dias	3,62%
56 dias	3,68%
90 dias	4,00%

Na TAB. 4.11, são apresentados os resultados obtidos para a resistência real dos traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM). Posteriormente na FIG. 4.6, é mostrado o gráfico comparativo da evolução das resistências com a idade dos ensaios.

TABELA 4.11– Resistência real (MPa) dos traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)

Traço	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 11 CVR-BG-AC	3 dias	16,12	16,19	0,30	15,80	16,38
	7 dias	31,13	30,74	0,82	30,59	32,07
	15 dias	37,62	38,09	0,96	36,52	38,25
	28 dias	38,32	39,46	2,73	35,21	40,29
	56 dias	37,64	35,28	4,14	35,22	42,42
	90 dias	38,10	38,12	1,58	36,52	39,67
Traço 12 CVR-BG-AM	3 dias	13,69	13,77	0,34	13,32	13,98
	7 dias	32,17	32,52	2,45	29,56	34,42
	14 dias	40,28	40,11	0,40	39,99	40,73
	28 dias	40,16	44,94	8,32	30,55	45,00
	56 dias	41,20	42,03	1,87	39,06	42,52
	90 dias	42,16	41,50	1,76	40,83	44,15

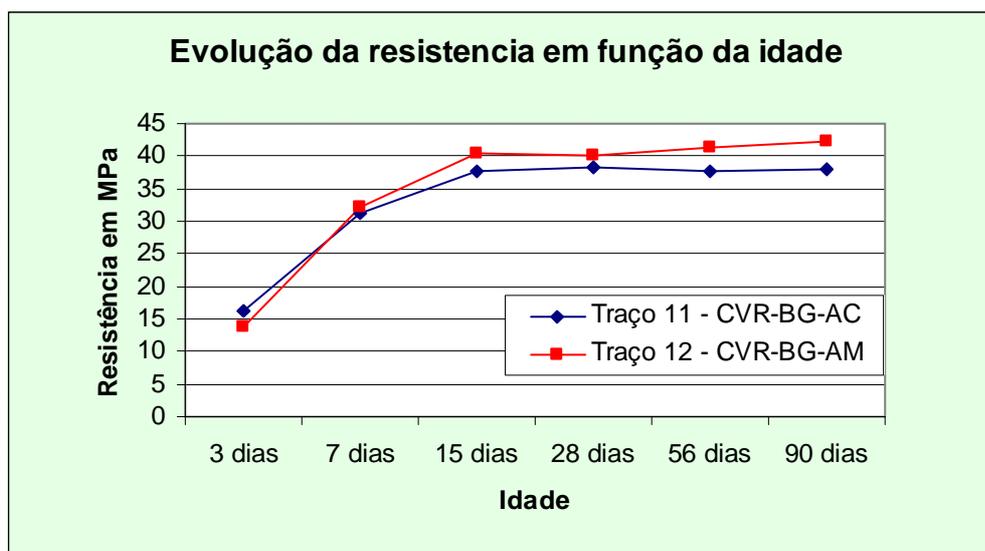


FIGURA 4.6– Gráfico comparativo da resistência real dos traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)

TABELA 4.12– Variação percentual da resistência real dos traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	-15,10%
7 dias	3,31%
14 dias	7,07%
28 dias	4,81%
56 dias	9,47%
90 dias	10,65%

De acordo com os resultados apresentados na FIG. 4.6 e na TAB. 4.12, percebe-se que o tratamento magnético, para este traço específico representou um acréscimo na resistência à compressão do concreto, tendo ocorrido uma variação aos 28 dias que pode ser atribuída a algum tipo de falha no ensaio, uma vez que a resistência apresenta uma tendência de crescimento.

De acordo com os resultados supracitados, nota-se que a resistência à compressão sofreu influência do tratamento magnético de maneira distinta para os traços ensaiados, tendo sido observado ganhos de resistência à compressão, na maioria dos resultados.

Os resultados mais expressivos ocorreram nos traços 01-02, 07-08 e 11-12, onde aconteceu uma tendência de variação constante de ganhos para as últimas idades.

4.2.1.1 Resistência à compressão em função dos componentes do concreto.

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que o tratamento magnético influi de maneira diversificada, ao combinar-se os componentes do concreto.

Analisando separadamente os agregados graúdos, constata-se que os traços que utilizaram brita gnaisse ao invés da brita calcária dolomítica, tiveram um melhor comportamento, apresentando maiores ganhos.

Outro fato observado foi que a brita gnaisse teve um bom desempenho, quando se objetivou resistência à compressão maiores (35 MPa), no entanto para resistências menores o resultado foi pouco significativo.

Em relação aos cimentos utilizados, constatou-se que o CP V – RS, é o que apresenta melhor desempenho, tanto com a brita calcária quanto com a brita gnaisse.

4.2.1.2 Resistência à compressão – Idade

Para analisar o desempenho do tratamento magnético da água na fabricação de concreto, apenas em função da idade, independentemente do tipo de agregado e do tipo de cimento (classes de resistência), foram lançados todos os 216 resultados de resistência à compressão no gráfico da FIG. 4.7. Verifica-se neste gráfico ganhos para todas as idades e conforme mostrado nas curvas logarítmicas de ajuste para os dois tipos de água de amassamento.

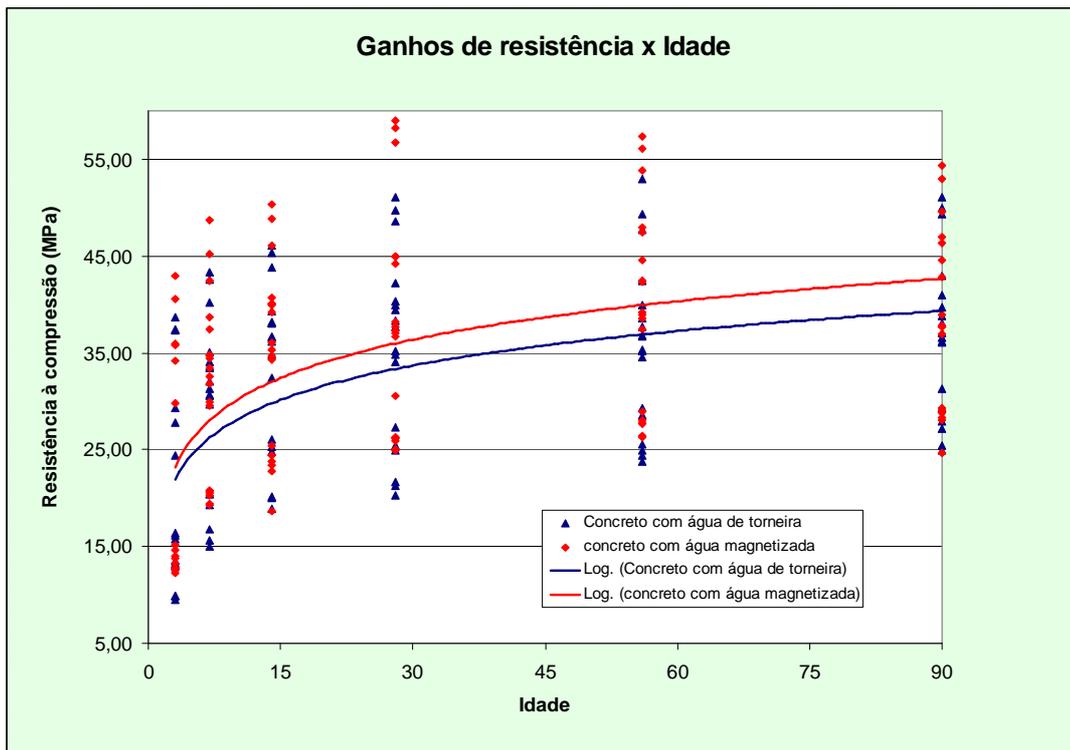


FIGURA 4.7– Gráfico comparativo da resistência à compressão em função da idade dos corpos-de-prova

As diferenças percentuais entre os grupos com água magnetizada e água de torneira ou comum foram detalhadas para cada idade como apresentado na TAB. 4.13.

TABELA 4.13– Ganhos percentuais médios de resistência à compressão para os traços utilizando água tratada magneticamente.

Idade	Aumento / redução percentual
3 dias	9,00 %
7 dias	6,81 %
14 dias	7,14 %
28 dias	7,60 %
56 dias	10,51 %
90 dias	7,37 %

Com intuito, de verificar se as diferenças entre as médias dos dois grupos são significativas, utilizou-se a análise de variância, tendo como variável resposta o tipo de água de amassamento.

Esta ferramenta estatística permite concluir, com um grau de confiança pré-determinado se existe ou não diferenças entre as médias de pelo menos dois grupos de amostras.

Esta comparação é feita por meio de um teste de hipóteses, onde as hipóteses testadas são:

Hipótese Nula (H_0): não existe diferença entre as médias.

Hipótese Alternativa (H_1): existe diferença entre as médias.

Como descrito em COSTA (2004), uma das maneiras de concluir este teste é por meio da probabilidade de significância (p-valor). Esta avalia a força da evidência contra H_0 em uma escala numérica. Um p-valor pequeno indica uma forte evidência para se rejeitar H_0 . O valor de referência utilizado neste trabalho foi de 5%, representando a probabilidade de se rejeitar H_0 quando ela é verdadeira. Deste modo a regra de decisão adotada foi:

Rejeitar H_0 se p-valor $< 0,05$.

Não rejeitar H_0 se p-valor $\geq 0,05$.

Assim o nível de confiança associado ao teste é de 95%.

TABELA 4.14– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias da resistência à compressão em função da idade.

Idade	Água utilizada		p-valor
	Comum	Magnetizada	
3 dias	17,35790	18,91996	0,1802
7 dias	29,12444	31,10889	0,0040
14 dias	32,37667	34,68722	0,0028
28 dias	35,12444	37,79222	0,0318
56 dias	35,77504	39,53608	0,0009
90 dias	36,82177	39,87056	0,0114

A TAB. 4.14, apresenta os resultados para a probabilidade de significância, sendo constatado que apenas para a idade de três dias, o p-valor foi superior à 0,05 , significando que para esta idade as diferenças das médias não podem ser atribuídas ao efeito do tratamento magnético.

Para as demais idades, o efeito do tratamento magnético atuou interferindo na resistência à compressão, sendo considerado efetivos os ganhos apresentados nas médias da resistência.

4.2.2 Módulo de Elasticidade

Para a análise do módulo de elasticidade ensaiou-se os corpos-de-prova somente na última idade (90 dias), uma vez que o equipamento utilizado (FIG. 3.6), encontrava-se em manutenção, sendo disponibilizado para uso somente nas proximidades dos ensaios de 90 dias.

Neste ensaio foram analisados três corpos-de-prova para cada traço. No intuito de evitar danos ao aparelho quando o ensaio é levado até a carga de ruptura e que o valor do módulo de elasticidade de interesse é o próximo a origem do carregamento, optou-se por levar o ensaio até uma tensão de 9 MPa.

Os relatórios dos ensaios de módulo de elasticidade (VER ANEXO B), são apresentados de modo sucinto na TAB. 4.15.

Os valores obtidos para os concretos confeccionados com água magnetizada foram superiores aqueles que utilizaram água de torneira, com exceção dos traços (03-04) e (05-06). Tal fato permite afirmar que existe uma tendência de aumento da rigidez do concreto, com a utilização da água magnetizada corroborando com os resultados obtidos para a resistência à compressão.

TABELA 4.15– Módulo de elasticidade, tensão e deformação para os traços ensaiados

Traço/ Código	Média		Módulo de elasticidade MPa	Mediana MPa	Desvio Padrão MPa	Mínimo MPa	Máximo MPa
	Tensão MPa	Deformação					
01-CII-BC-AC	8,99	0,00028222	31881	31526	727	31399	32717
02-CII-BC-AM	8,99	0,00024876	36228	36874	2308	33666	38145
03-CV-BC-AC	9,01	0,00025002	36171	36452	2501	33541	38519
04-CV-BC-AM	9,02	0,00025886	34879	34584	1116	33940	36113
05-CII-BG-AC	8,98	0,00027205	33050	32615	1233	32093	34441
06-CII-BG-AM	8,87	0,00028298	31332	31383	417	30892	31722
07-CV-BG-AC	9,01	0,00030566	29499	29185	1115	28575	30737
08-CV-BG-AM	8,99	0,00024724	36360	36339	142	36230	36511
09-CVR-BC-AC	8,99	0,00022648	39825	38494	3022	37697	43284
10-CVR-BC-AM	9,02	0,00023039	39145	39680	962	38034	39720
11-CVR-BG-AC	9,01	0,00026290	34281	34707	971	33170	34966
12-CVR-BG-AM	9,01	0,00024874	36215	36336	499	35666	36643

Do mesmo modo, como realizado para a resistência à compressão, analisou-se o efeito do tratamento magnético da água na fabricação de concreto, para a propriedade mecânica módulo de elasticidade, independentemente do tipo de agregado e do tipo de cimento (classes de resistência), comparando-se apenas os dois tipos de água de amassamento.

Ao calcular as médias dos dois grupos, para a idade de 90 dias, constatou-se uma diferença de 5,55% favorável à água tratada magneticamente. Com intuito, de verificar se essa diferença entre as médias dos dois grupos são significativas, utilizou-se a análise de variância, tendo como variável resposta o tipo de água de amassamento.

Utilizando as mesmas hipóteses apresentadas para a resistência à compressão e o mesmo valor de referência, manteve-se o nível de confiança associado ao teste de 95% e constatou-se, conforme apresentado na TAB. 4.16, que o p-valor encontrado foi inferior à 0,05, significando que para a idade de 90 dias, o efeito do tratamento magnético atuou interferindo no módulo de elasticidade, sendo considerados efetivos os ganhos apresentados nas médias.

TABELA 4.16– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias do módulo de elasticidade para a idade de 90 dias.

Idade	Água utilizada		Aumento / redução percentual	p-valor
	Comum	Magnetizada		
90 dias	33817,67	35693,22	5,55 %	0,0406

Ao relacionar os resultados obtidos com os valores recomendados por norma, constatou-se um acréscimo, sendo considerado satisfatório, uma vez que os valores normalizados são conservadores e não levam em consideração características peculiares de cada traço.

No ANEXO B, são apresentadas as curvas tensão-deformação dos ensaios e o prolongamento estimado destas. Essas curvas foram aproximadas por equações do 2º grau, sendo constatado os dados supracitados.

4.2.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma noção subjetiva, do estado das argamassas e concretos frescos, no que tange à facilidade das operações de manuseio. Segundo BAUER (1995), o comportamento físico mais importante da trabalhabilidade é a consistência, sendo que esse termo expressa propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionada com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, levando em consideração a uniformidade e a compacidade do concreto.

Desta forma este parâmetro é de difícil quantificação, uma vez que existem variáveis aleatórias que não podem ser mensuradas, tais como: umidade relativa do ar, energia empregada para vibrar os corpos-de-prova, betoneira utilizada, dentre outros.

Para a obtenção deste parâmetro, em todos os traços foi medido o valor do abatimento do cone (“Slump”), cujos resultados estão apresentados na TAB. 4.17.

Percebe-se claramente pela terceira coluna que houve uma maior plasticidade (trabalhabilidade) dos traços constituídos com água magnetizada. Este ganho de trabalhabilidade, em condições normais, poderia significar perda de resistência à compressão, mas tal fato não foi constatado.

TABELA 4.17– Abatimento do cone para os traços ensaiados

Traço	Abatimento do cone (mm)	Diferença absoluta do abatimento do cone (mm)
01 – (CII-BC-AC)	53	16
02 – (CII-BC-AM)	69	
03 – (CV-BC-AC)	49	17
04 – (CV-BC-AM)	66	
05 – (CII-BG-AC)	57	15
06 – (CII-BG-AM)	72	
07 – (CV-BG-AC)	47	21
08 – (CV-BG-AM)	68	
09 – (CVR-BC-AC)	46	18
10 – (CVR-BC-AM)	64	
11 – (CVR-BG-AC)	48	22
12 – (CVR-BG-AM)	70	

Este resultado permitiu ainda, comprovar os estudos apresentados por outros pesquisadores, uma vez que com a redução da tensão superficial, a água agiu como um “plastificante”, permitindo uma melhor interface pasta cimento – agregado.

4.2.4 Velocidade do pulso ultra-sônico

Para a medição da velocidade do pulso ultra-sônico, optou-se por executar o método direto descrito no capítulo anterior, uma vez que os corpos-de-prova possuíam dimensões passíveis de utilização do mesmo.

Este ensaio foi realizado em pelo menos dois CP’s a partir da idade de 14 dias. Isso ocorreu devido à grande quantidade de corpos-de-prova e a necessidade de intercalar outros ensaios durante o ensaio do ultra-som, não tendo sido possível realizar o ensaio em todos os CP’s.

Nas datas previstas para os ensaios, os corpos-de-prova eram retirados das caixas d'água e devidamente preparados para o ensaio, com capeamento das faces e secagem dos mesmos por um período de cinco horas. Esse cuidado era tomado no sentido de evitar interferência de umidades diferentes na determinação da velocidade do pulso ultra-sônico (UPV). Sabe-se que o UPV aumenta com o teor de umidade.

Para conseguir uma maior confiabilidade nos resultados, o tempo de transmissão da onda ultra-sônica foi medido em três pontos dos corpos-de-prova (topo, meio e base), como mostrado na FIG. 4.8.

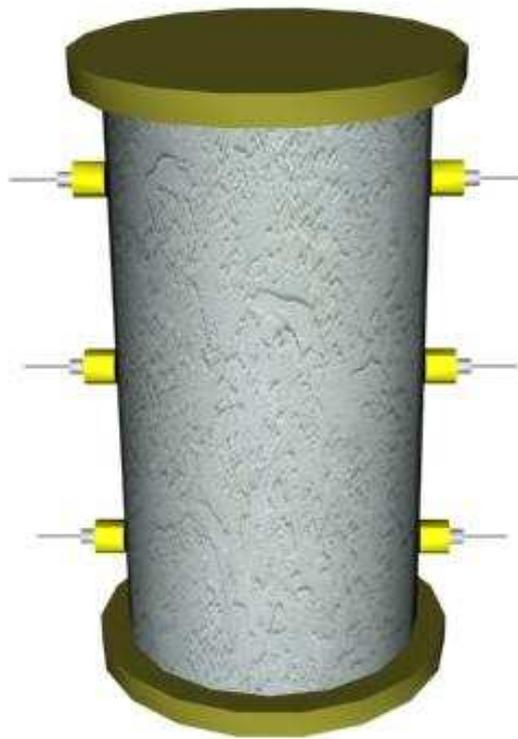


FIGURA 4.8– Posicionamento das leituras da onda ultra-sônica nos corpos-de-prova

O ensaio foi realizado em ambiente isento de vibrações, com as superfícies dos corpos-de-prova limpas e os transdutores diametralmente acoplados por meio de um gel, cuja função é evitar as imperfeições das superfícies de acoplamento dos transdutores. No decorrer do ensaio, caso houvesse a necessidade de se repetir alguns pontos, a área era limpa novamente, objetivando deixá-la o mais seca possível de forma que a umidade deixada pelo gel acoplante interferisse o mínimo na leitura seguinte.

Na TAB. 4.18 são apresentados os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark II, para os traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).

TABELA 4.18– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 01 CII-BC-AC	14 dias	3863,63	3883,51	75,98	3731,34	3952,57
	28 dias	4237,12	4219,41	141,12	4016,06	4464,29
	56 dias	4269,63	4273,50	101,71	4132,23	4444,44
	90 dias	4260,33	4264,41	46,97	4166,67	4329,00
Traço 02 CII-BC-AM	14 dias	4204,94	4228,35	89,89	4048,58	4310,34
	28 dias	4651,47	4629,63	170,02	4385,96	4926,11
	56 dias	4690,43	4694,84	122,82	4524,89	4901,96
	90 dias	4678,99	4683,87	56,63	4566,21	4761,90

Na FIG. 4.9, os gráficos “boxplots” mostram a comparação da velocidade do pulso ultra-sônico para os traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM).

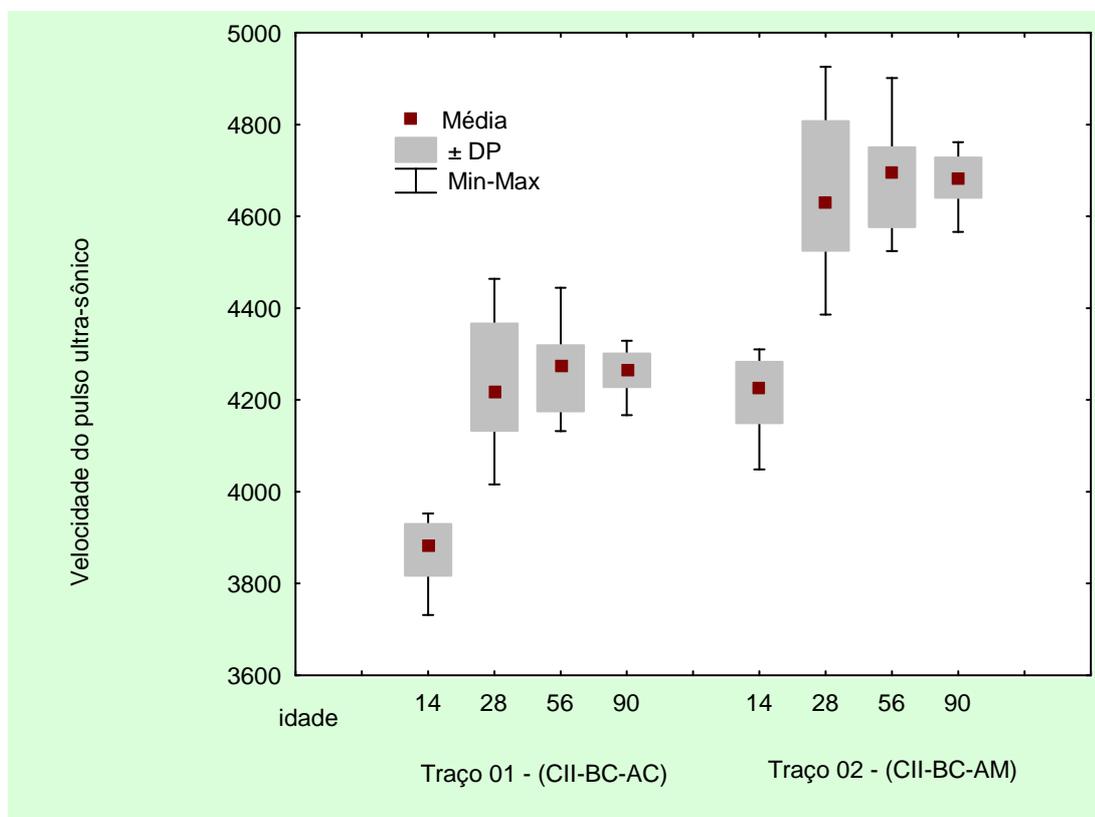


FIGURA 4.9– Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 01 (CII-BC-AC) e 02 (CII-BC-AM)

Na TAB. 4.18 e na FIG. 4.9, observa-se que para todas as idades, o traço 01 apresentou velocidade do pulso ultra-sônico, inferior às obtidas para o traço 02. Este fato equivale ao resultado apresentado anteriormente (TAB. 4.1) para a resistência à compressão, uma vez que quanto menor a resistência, maior o tempo de propagação da onda neste meio.

Na seqüência, são apresentados na TAB. 4.19 os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark II, para os traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM). Posteriormente na FIG. 4.10 são mostrados os gráficos “boxplots” comparando estes resultados.

TABELA 4.19– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 03 CV-BC-AC	14 dias	4011,47	3976,16	127,88	3921,57	4405,29
	28 dias	4506,01	4464,29	159,67	4347,83	4950,50
	56 dias	4468,43	4474,30	142,23	4255,32	4694,84
	90 dias	4663,76	4629,73	168,29	4484,30	5000,00
Traço 04 CV-BC-AM	14 dias	3972,51	3976,16	36,96	3921,57	4032,26
	28 dias	4346,82	4329,00	52,18	4273,50	4444,44
	56 dias	4785,98	4717,40	299,16	4424,78	5405,41
	90 dias	4565,26	4566,21	62,46	4484,30	4651,16

Na TAB. 4.19 e na FIG. 4.10, percebe-se que não houve uma diferença significativa na velocidade de propagação da onda para os traços em questão, resultados coerentes com os apresentados anteriormente (TAB. 4.3), referente a resistência à compressão.

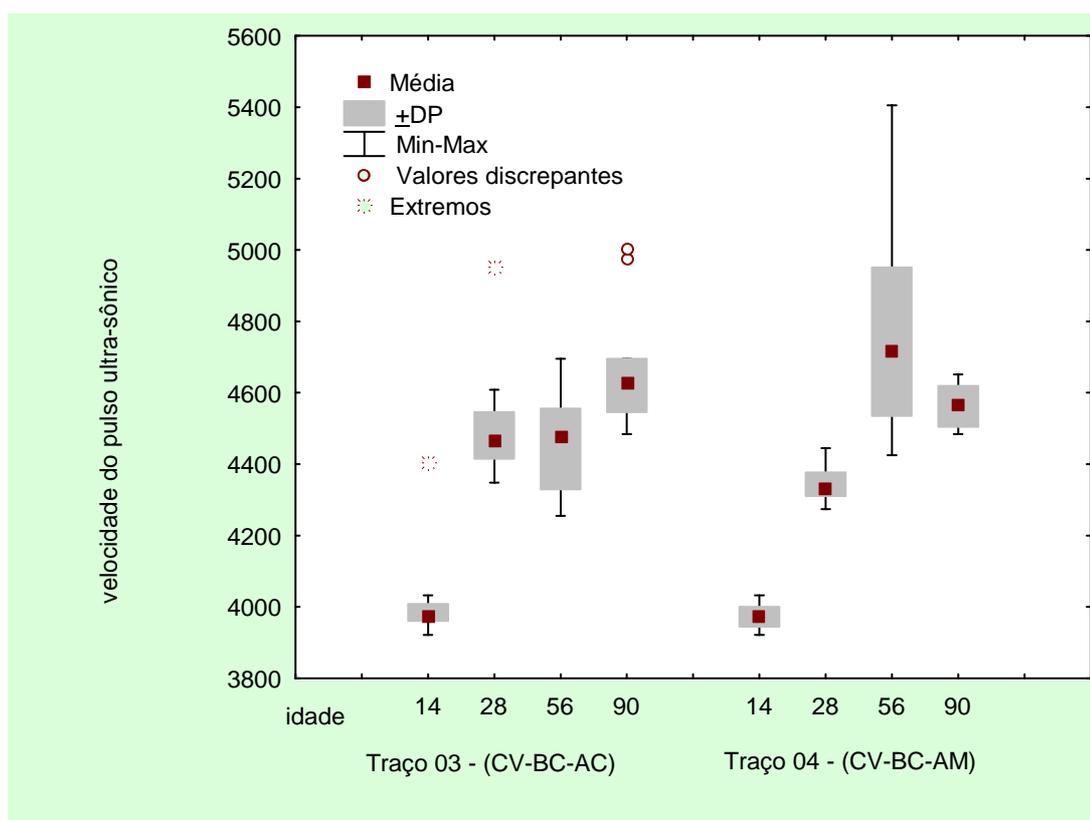


FIGURA 4.10-Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 03 (CV-BC-AC) e 04 (CV-BC-AM)

Na TAB. 4.20 são apresentados os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark II, para os traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM). Posteriormente na FIG. 4.11 são mostrados os gráficos “boxplots” comparando estes resultados. Para o traço 05 não foi possível medir o valor da velocidade aos 14 dias.

TABELA 4.20- Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 05 (CII-BG-AC) e 06 (CII-BG-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 05 CII-BG-AC	28 dias	4028,73	4040,42	48,38	3952,57	4098,36
	56 dias	4347,01	4338,42	59,91	4237,29	4444,44
	90 dias	4605,31	4608,29	52,86	4524,89	4716,98
Traço 06 CII-BG-AM	14 dias	4053,80	4040,55	70,54	3952,57	4184,10
	28 dias	4206,74	4210,54	54,28	4115,23	4273,50
	56 dias	4445,94	4385,96	153,08	4255,32	4651,16
	90 dias	4480,35	4504,60	116,21	4329,00	4716,98

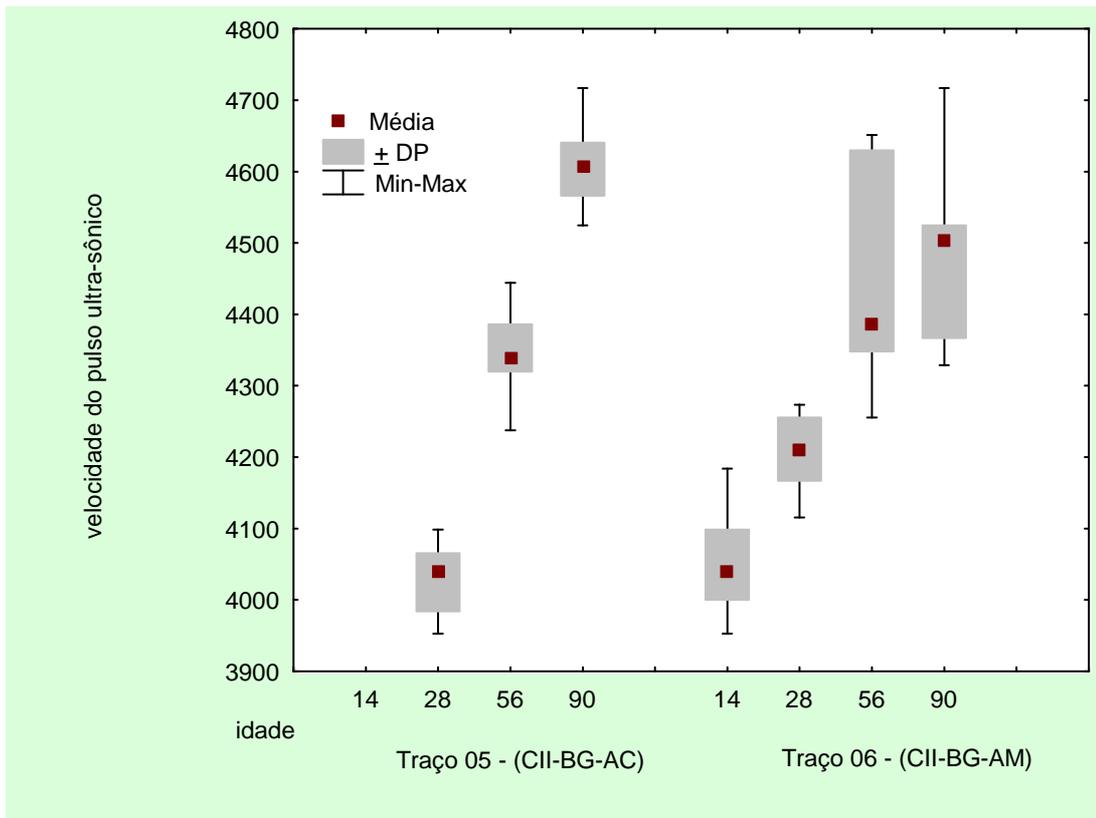


FIGURA 4.11- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 05 (CV-BC-AC) e 06(CV-BC-AM)

Na TAB. 4.20 e na FIG. 4.11, percebe-se que não houve uma diferença significativa na velocidade do pulso ultra-sônico para os traços em questão, sendo que existiu uma tendência de aumento da velocidade com o incremento da idade, comprovando-se novamente os resultados obtidos na resistência à compressão(TAB. 4.5).

Na TAB. 4.21 são apresentados os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark, para os traços 07 (CV-BG-AC) e 08(CV-BG-AM).

TABELA 4.21– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 07 (CV-BG-AC) e 08 (CV-BG-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 07 CV-BG-AC	14 dias	4048,07	4056,81	61,50	3952,57	4149,38
	28 dias	4275,63	4264,41	53,35	4184,10	4385,96
	56 dias	4386,06	4347,83	90,52	4273,50	4545,45
	90 dias	4295,56	4301,25	131,89	4098,36	4484,30
Traço 08 CV-BG-AM	14 dias	3990,33	3976,16	65,30	3906,25	4115,23
	28 dias	4272,94	4273,58	66,67	4166,67	4385,96
	56 dias	4439,27	4405,29	122,24	4273,50	4651,16
	90 dias	4540,79	4535,17	49,66	4444,44	4608,29

Complementarmente, são apresentados na FIG. 4.12, os gráficos “boxplots” comparando os resultados obtidos para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico dos traços 07 (CV-BG-AC) e 08(CV-BG-AM).

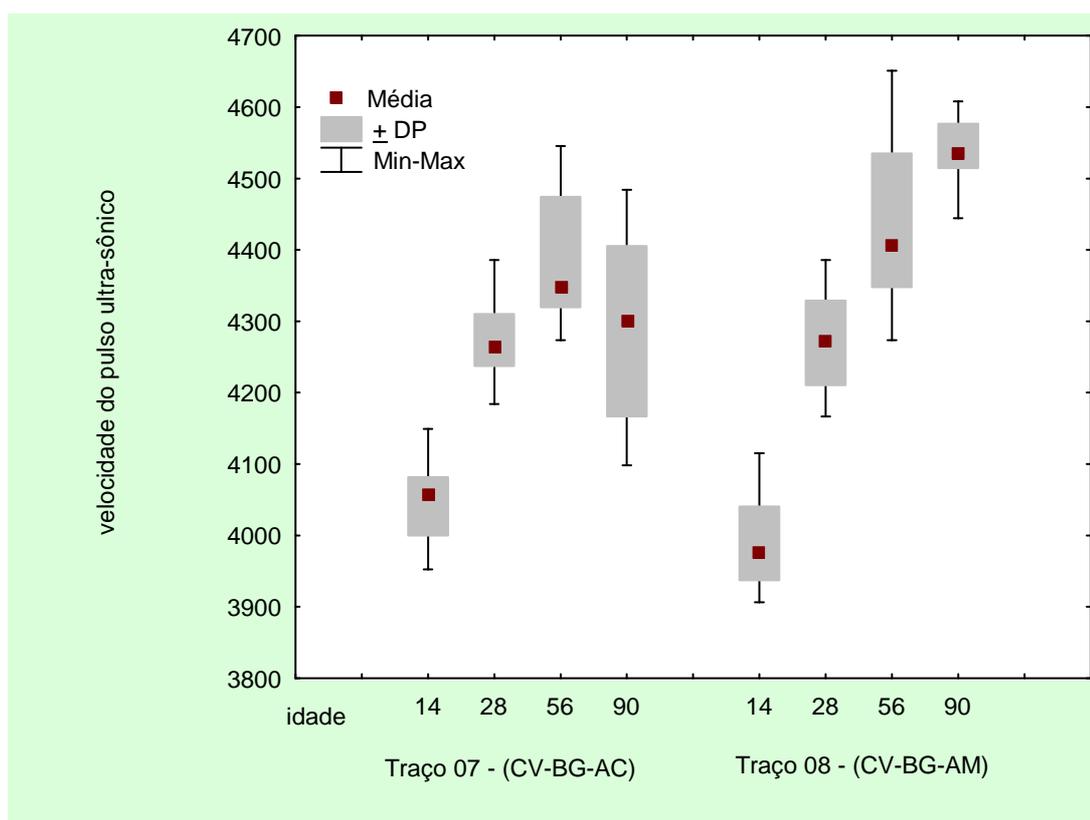


FIGURA 4.12- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 07(CV-BG-AC) e 08(CV-BG-AM)

Da TAB. 4.21 e na FIG. 4.12, percebe-se que houve um pequeno acréscimo na velocidade do pulso ultra-sônico para o traço usando água magnetizada, a partir da

idade de 56 dias. A partir dessa idade nota-se também um maior acréscimo percentual de resistência à compressão, conforme mostrado anteriormente na TAB. 4.8.

Na TAB. 4.22 são apresentados os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark II, para os traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM). Posteriormente na FIG. 4.13 são mostrados os gráficos “boxplots” comparando estes resultados.

TABELA 4.22– Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 09 (CVR-BC-AC) e 10 (CVR-BC-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 09 CVR-BC-AC	14 dias	4309,51	4310,34	57,70	4219,41	4385,96
	28 dias	4847,40	4854,37	67,55	4716,98	4926,11
	56 dias	4800,71	4796,41	117,39	4651,16	4950,50
	90 dias	4689,26	4683,87	134,87	4484,30	4854,37
Traço 10 CVR-BC-AM	14 dias	4270,21	4237,29	165,79	4048,58	4545,45
	28 dias	4859,13	4866,21	216,03	4545,45	5235,60
	56 dias	4800,12	4796,19	203,33	4504,50	5154,64
	90 dias	4680,16	4705,91	135,32	4484,30	4854,37

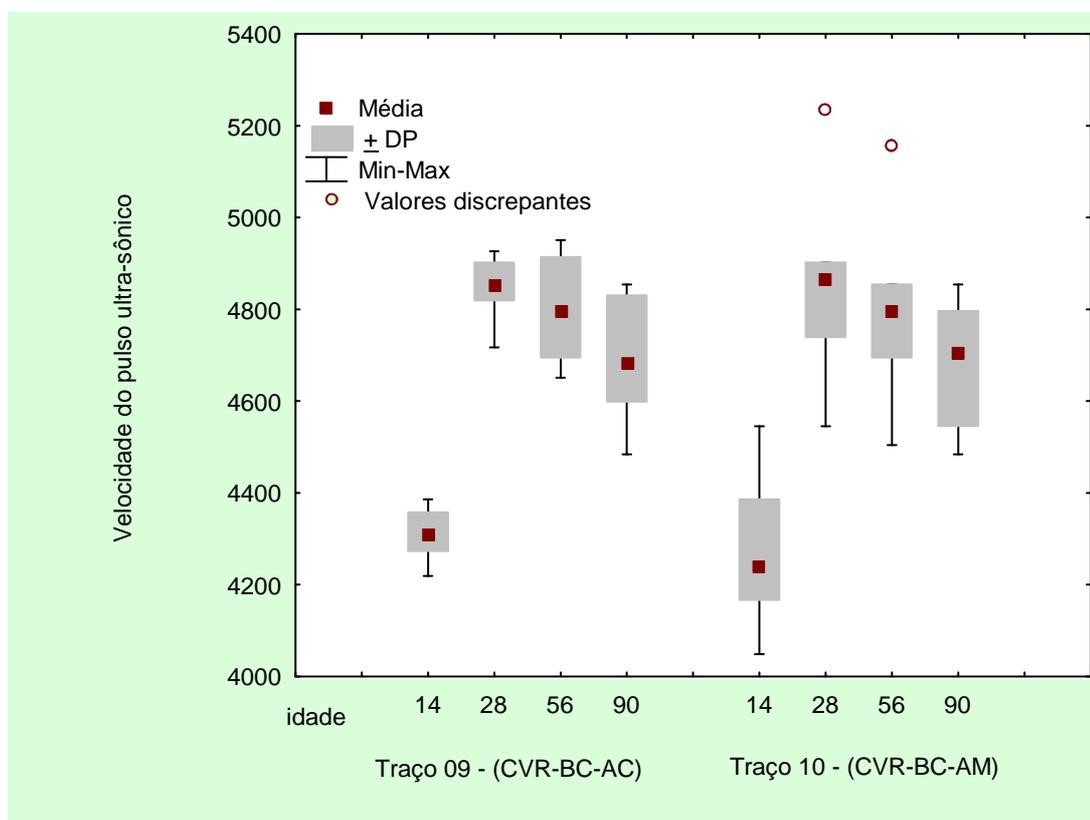


FIGURA 4.13- Boxplots da velocidade do pulso ultra-sônico - Traços 09(CVR-BC-AC) e 10(CVR-BC-AM)

Percebe-se por meio da TAB. 4.22 e da FIG. 4.13, que não houve uma diferença significativa na velocidade propagação da onda para os traços em questão, fato já apresentado anteriormente quando analisada a resistência à compressão (TAB. 4.9).

Na TAB. 4.23 são apresentados os resultados para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (m/s), obtidos por meio do aparelho V Meter Mark II, para os traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM).

TABELA 4.23- Velocidade do pulso ultra-sônico (m/s) para os traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)

Traço/ Código	Idade do ensaio	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Traço 11 CVR-BG-AC	14 dias	4113,93	4115,23	22,21	4081,63	4149,38
	28 dias	4141,65	4132,23	63,01	4065,04	4273,50
	56 dias	4192,40	4192,89	67,29	4098,36	4291,85
	90 dias	4268,85	4273,58	81,47	4149,38	4385,96
Traço 12 CVR-BG-AM	14 dias	4131,20	4132,23	41,91	4048,58	4184,10
	28 dias	4552,95	4498,22	67,55	4237,29	5000,00
	56 dias	4614,23	4576,68	110,36	4484,30	4807,69
	90 dias	4712,27	4716,98	117,63	4545,45	4901,96

Complementarmente, são apresentados na FIG. 4.14, os gráficos “boxplots” comparando os resultados obtidos para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico dos traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM).

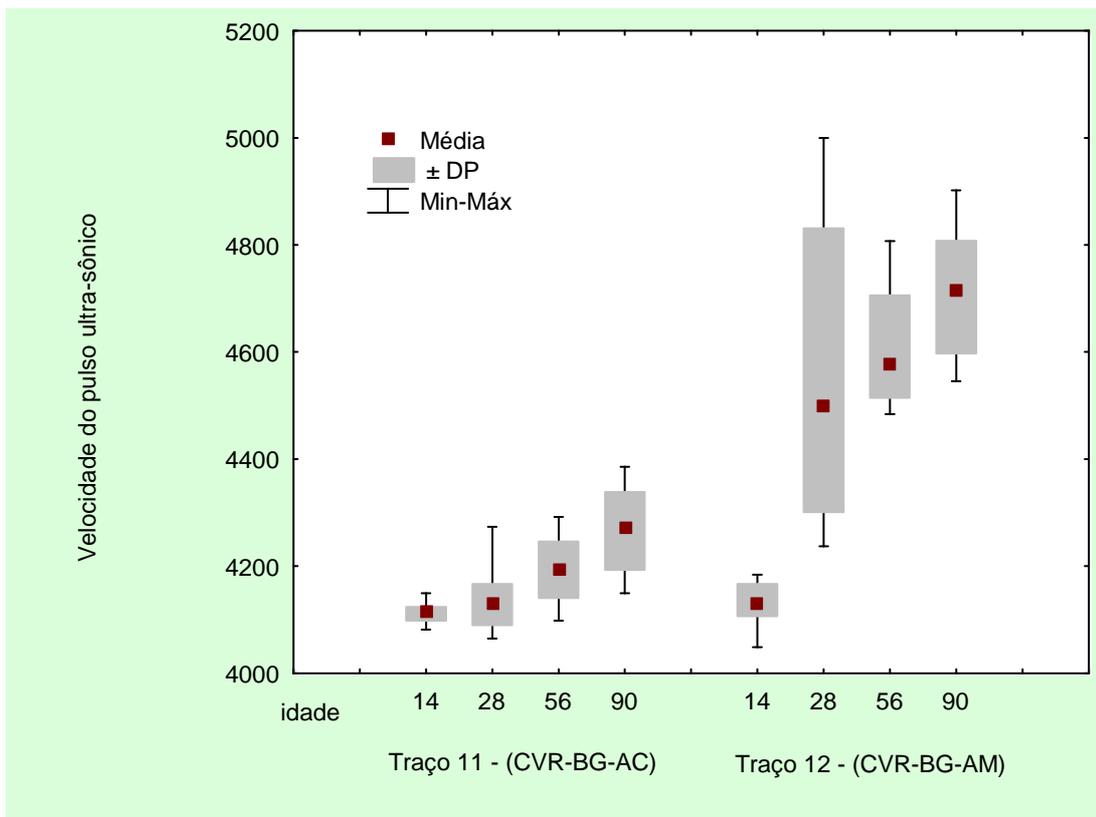


FIGURA 4.14– *Boxplots* da velocidade do pulso ultra-sônico - traços 11 (CVR-BG-AC) e 12 (CVR-BG-AM)

Na TAB. 4.23 e na FIG. 4.14, observa-se que o tratamento magnético surtiu efeito significativo na velocidade do pulso ultra-sônico a partir da idade de 28 dias, mesma tendência mostrada anteriormente para resistência à compressão (TAB. 4.11) já a partir dos 14 dias.

Comparando a evolução da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico em função da idade, independentemente do tipo de agregado e do tipo de cimento (classes de resistência), construiu-se o gráfico da FIG. 4.15. Verifica-se neste gráfico ganhos para todas as idades e conforme mostrado nas curvas logarítmicas de ajuste para os dois tipos de água de amassamento.

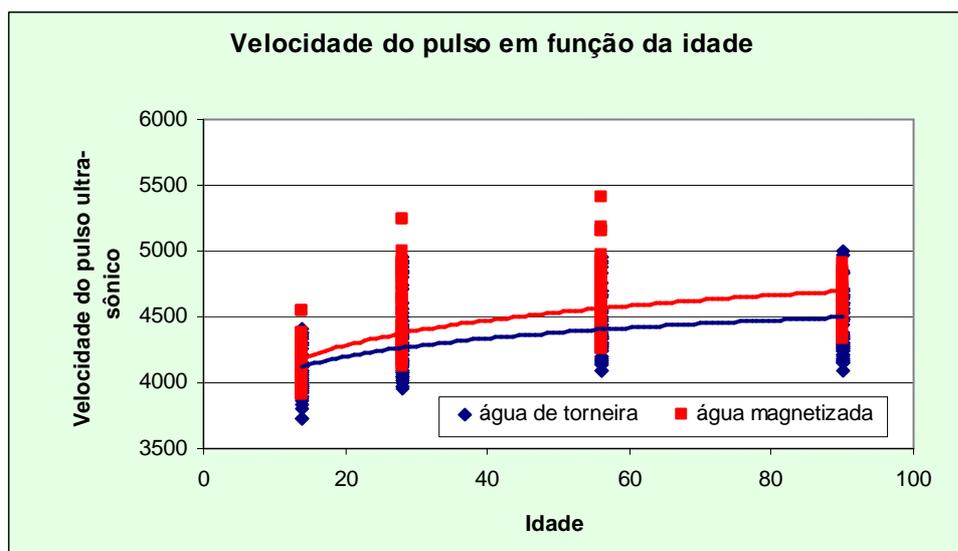


FIGURA 4.15– Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica em função da idade

As diferenças percentuais entre os grupos com água magnetizada e água de torneira ou comum foram detalhadas para cada idade como apresentado na TAB. 4.24.

TABELA 4.24– Variação percentual da velocidade do pulso ultra-sônico em função da idade.

Idade	Aumento / redução percentual
14 dias	1,85 %
28 dias	4,82 %
56 dias	4,01 %
90 dias	3,53 %

Com intuito, de verificar se as diferenças entre as médias dos dois grupos são significativas, utilizou-se a análise de variância, tendo como variável resposta, o tipo de água de amassamento.

A comparação foi feita por meio de um teste de hipóteses, onde as hipóteses testadas e o valor de referência utilizado foram citados anteriormente.

A TAB. 4.25, apresenta os resultados para a probabilidade de significância, sendo constatado que o p-valor foi inferior à 0,05 . Deste modo, comprovou-se que o efeito do

tratamento magnético atuou interferindo na velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, sendo considerado efetivos os ganhos apresentados nas médias.

TABELA 4.25– Probabilidade de significância (p-valor) para as médias da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico em função da idade.

Idade	Água utilizada		p-valor
	Comum	Magnetizada	
14 dias	4069,322	4113,838	0,047142
28 dias	4339,425	4481,675	0,000033
56 dias	4410,706	4629,329	0,000210
90 dias	4466,008	4609,655	0,000018

Por meio da TAB. 4.24 constatou-se que os ganhos percentuais na velocidade do pulso ultra-sônico tendem a se estabilizar para as últimas idades, corroborando com os resultados da resistência à compressão apresentados na TAB. 4.13.

4.2.4.1 Compacidade/ Homogeneidade

Ao utilizar o método do ultra-som, foi possível avaliar qualitativamente o grau de compacidade e homogeneidade dos traços ensaiados uma vez que, quanto mais compacto estiver um concreto, menor o número de vazios existente dentro deste e conseqüentemente maior será a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.

Desta forma, utilizando a FIG. 4.15 e os gráficos “boxplots”, percebeu-se que ocorreu um aumento da compacidade para os traços que utilizaram a água magnetizada na sua fabricação. Esse aumento não foi linear para todos os traços, mas sempre ocorreu, sendo mais significativo para o traço que utilizou brita calcária e cimento CP II - E 32 (traço 02 – CII-BC-AM).

Em relação à homogeneidade do concreto, percebeu-se que quando o mesmo foi produzido com água magnetizada apresentava uma pasta cimento-agregado mais

uniforme, o que leva a acreditar que o aumento desta homogeneidade contribuiu para o incremento da compacidade.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 Introdução

Diante dos resultados obtidos, apresentados e discutidos, será feito neste capítulo uma consideração geral, abordando as influências da utilização do tratamento magnético na água de amassamento do concreto.

Os resultados obtidos nesta pesquisa inicial mostram a influência positiva desse tratamento magnético devendo, portanto incentivar trabalhos futuros que darão além de continuidade, o respaldo necessário a essa linha de pesquisa.

5.2 Considerações finais

O objetivo principal desse trabalho foi alcançado quando, para os traços analisados, confirmou-se estatisticamente que a variável tratamento magnético da água de

amassamento influenciou significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto.

Foram ensaiados 216 CP's divididos em dois grupos de 108 CP's diferenciados pela água de amassamento, com ou sem tratamento magnético. Para cada grupo foram confeccionados 6 traços variando o tipo de cimento e o tipo de agregado graúdo. Para cada traço ensaiaram-se três corpos-de-prova, em seis idades distintas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios e analisados estatisticamente são apresentadas algumas considerações, que deverão ser aplicadas, no contexto dos traços analisados:

- Analisando o comportamento da resistência à compressão, para as idades ensaiadas, em função do tipo de água, independentemente do tipo de agregado e do tipo de cimento, constatou-se que ocorreram ganhos percentuais, para os concretos produzidos com água tratada magneticamente, comprovando por meio da análise estatística que este ganho foi significativo. Este resultado de ganhos na faixa de 8% em média confere com o obtido por LAZARENKO & ZHURAVLEV (1985), como citado no início deste trabalho.
- Analisando o módulo de elasticidade estático, constatou-se que os valores foram superiores para os concretos produzidos com água tratada magneticamente. Do mesmo modo que aconteceu na análise da resistência à compressão, constatou-se que ocorreram pelo menos dois traços que os resultados não foram satisfatórios.
- Ao analisar separadamente cada um dos traços ensaiados, constatou-se que a água magnetizada atua de maneira diversificada quando se combinam os componentes do concreto. Para concretos produzidos com o cimento CII-E-32 (resistência estimada de 25 MPa) o comportamento com brita calcária obteve ganhos muito mais expressivos do que com a brita gnaisse, acreditando-se que isto se deva à composição química dos agregados graúdos. A confirmação desse resultado pode ser avaliada por meio de mais ensaios com os dois tipos de britas e também com

uma análise química do concreto, utilizando ensaios específicos como difração de raios-X e observação em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Essa diferença expressiva de ganho para a brita calcária não foi sentida nos concretos produzidos com os cimentos CPV- PLUS e CPV- RS (resistência estimada de 35 MPa), embora tenha sido observado uma influência maior da água tratada magneticamente nos resultados obtidos com o cimento CPV-RS.

Foi observado, também que a resistência à compressão para as primeiras idades (três dias) sofreu influência do traço utilizado, comprovando a necessidade de um estudo mais detalhado para confirmar tal fato.

- Os resultados obtidos para a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico foram coerentes com os resultados para a resistência à compressão e módulo de elasticidade, apresentando ganhos percentuais para os traços produzidos com água tratada magneticamente.
- Em relação ao aspecto trabalhabilidade, ficou comprovado que para todos os traços houve um aumento no abatimento do cone, significando um aumento da plasticidade do concreto. Esse aumento da trabalhabilidade poderia significar perda de resistência, mas tal fato não ocorreu, uma vez que este aumento se deve à alteração da estrutura molecular da água e não devido ao aumento do fator água/cimento. Esse parâmetro mesmo sendo semiquantitativo, é importante para a comprovação dos benefícios do tratamento magnético.
- Utilizando ainda a análise qualitativa, percebeu-se que os traços ensaiados com água magnetizada apresentaram um maior grau de compacidade e homogeneidade, sendo comprovado pelos resultados obtidos para a velocidade do pulso ultra-sônico.

Diante dos resultados pode-se concluir que, embora tenha sido percentualmente pequeno (próximo a 10%) o ganho de resistência e também de módulo de elasticidade, o tratamento magnético influencia favoravelmente a produção do concreto.

Fatores adicionais como o aumento da trabalhabilidade com a mesma relação água/cimento indica que poder-se-ia reduzir o consumo de cimento obtendo concretos com mesma resistência e maior trabalhabilidade. Além disso o tratamento magnético influenciou uma maior compacidade do concreto, demonstrado no ensaio do UPV.

Por tudo isso e ligado ao fato de que o único custo envolvido estaria na fabricação do Condicionador Físico, conclui-se que a produção de concreto com água tratada magneticamente é uma área de pesquisa promissora e que merece mais estudos experimentais no intuito de se produzir concretos de melhor qualidade sem custo adicionais.

5.3 Recomendações para trabalhos futuros

A metodologia se mostrou favorável, para a comprovação dos benefícios do tratamento magnético na água de amassamento do concreto, no entanto, para um melhor aprofundamento desta pesquisa são sugeridos estudos mais aprofundados no que tange a um aumento das variáveis envolvidas, no número de corpos-de-prova, utilizando outros tipos de cimentos e de agregados.

A seguir são apresentadas sugestões de trabalhos futuros para este tema.

- Desenvolver uma metodologia para a incorporação do condicionador físico para a produção de concreto em usinas.
- Estudar o efeito do tratamento magnético no concreto quando se aplica um campo magnético de aproximadamente 0,8 Tesla.
- Analisar as reações químicas ocorridas no concreto, devido à utilização da água magnetizada.

-
- Estudar o efeito do tratamento magnético no concreto quando o mesmo é produzido com aditivos plastificantes ou super-plastificantes.
 - Realizar procedimento similar ao deste trabalho estudando o comportamento do concreto em idades mais avançadas.
 - Analisar os ganhos de resistência à compressão, quando se utiliza Fe_3O_5 , conjuntamente com o tratamento magnético.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 228, Nondestructive teste Methods for Evaluation of Concrete in Sctrctures, ACI 228.2R-98, American Concrete Institute, EUA, 1998, p.62

AMIRI, M. C., DADKHAH, Ali A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. **Colloids and Surfaces**, 2005 p.1-4

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 45:1995: agregados – determinação da massa unitária e dos espaços vazios. ABNT: Belo Horizonte, mar. 1996, 7p.

_____,NBR 5739:1994: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1994, 4p

_____,NBR 5738:1994: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, abr. 1994, 9p

____, NBR 8802:1994: concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. ABNT: Rio de Janeiro, fev, 1994, 8p.

NBR 12655:2006: concreto – preparo, controle e recebimento. ABNT: Rio de Janeiro, mai, 2006, 7p.

NBR 12654:1992: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto ABNT: Rio de Janeiro, jun, 1992, 7p.

NBR NM 67:1998: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT: Rio de Janeiro, fev, 1998, 8p.

____, NBR 8522:2003: concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação ABNT: Rio de Janeiro, jan. 1994, 9p

____, NBR NM 248:2003: agregados – determinação da composição granulométrica ABNT: Rio de Janeiro, jul. 2003, 6p

____, NBR NM 53:2003: agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 2003, 8p

____, NBR 7211:2005: agregado para concreto – especificação. ABNT: Rio de Janeiro, mar. 2005, 11p

BAUER, F. A. L. **Materiais de construção**, 5ª. Edição Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

BELOVA, Vera. Magnetic Treatment of Water. **Soviet Science Review**, 1972, p150-156.

BOICHENKO, V. A. and SAPOGIN, L. G. Theory of Magnetic Treatment. **Journal of Engineering Physics**, 1977, nº 33, p. 981-985

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: **Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo, PINI, 1998.

COSTA, R. M. Estudo da Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Belo Horizonte, 1999.

COSTA, R. M. Análise de Propriedades Mecânicas do Concreto Deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Belo Horizonte, 2004.

GOMES, A. M.; SANT'ANA, R. DE; TRIFILIO, B. **The use of water induced magnetically in the physical and mechanical properties of ready mixed concrete**. Ermco, Lisboa, 1999. 7p.

GOMES, A. M.; SANT'ANA, R.; SANT'ANA, L. M.; GUIMARÃES, C.O.; COSTA, J.O. **Avaliação do uso da água imantada através da indução magnética nas propriedades dos concretos**. ANAIS 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002. v. 1, p. 185-196.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física**, 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. Vol 3. 303p.

KLASSEN, V. I. Physical activation of aqueous systems and possibilities of application in the mining industry. Thesis, Moscow, p.5-24,

LAZARENKO, L. N. and ZHURAVLEV, P. D. Influence of Magnetic Water Treatment Conditions on the Quality Concrete Based Thereon. **Eletronaya Obrabotka Materialov**, 1985, nº 1, p. 87-89.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. DE, **Noções de probabilidade e estatística**, 3.ed. Instituto de Matemática e Estatística- Universidade de São Paulo, 2001, 392 p.

METHA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, PINI, 1994, 573p

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, São Paulo, Pini, 2ª. Edição, 1997.

PORTO, M. E. G. Alterações de propriedades biológicas e físico-químicas da água induzidas por campos magnéticos, Dissertação de Mestrado, Departamento de Físico-Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998

SPERLING, Marcos von. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, 1996. 243p. (**Principios do tratamento biologico de aguas residuarias;v.1**).

SU, N.; WU, Y. MAR, C. Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, 2000, nº 30 , p 599-605.

SU, N.; WU, C. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash **Cement and Concrete Composites**, 2003, nº.25, p. 681-688.

VAN VLACK, Lawrence H.. **Principios de ciencia e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Campus, 1985. 567p.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Ferramentas estatística básicas para o gerenciamento de processos**. 1. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995. Vol. 2. 384 p.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Como estabelecer conclusões com confiança: entendendo inferência estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. Vol. 4. 309 p.

ANEXO A

RELATÓRIOS DE ENSAIOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

ANEXO B

RELATÓRIOS DE ENSAIOS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE

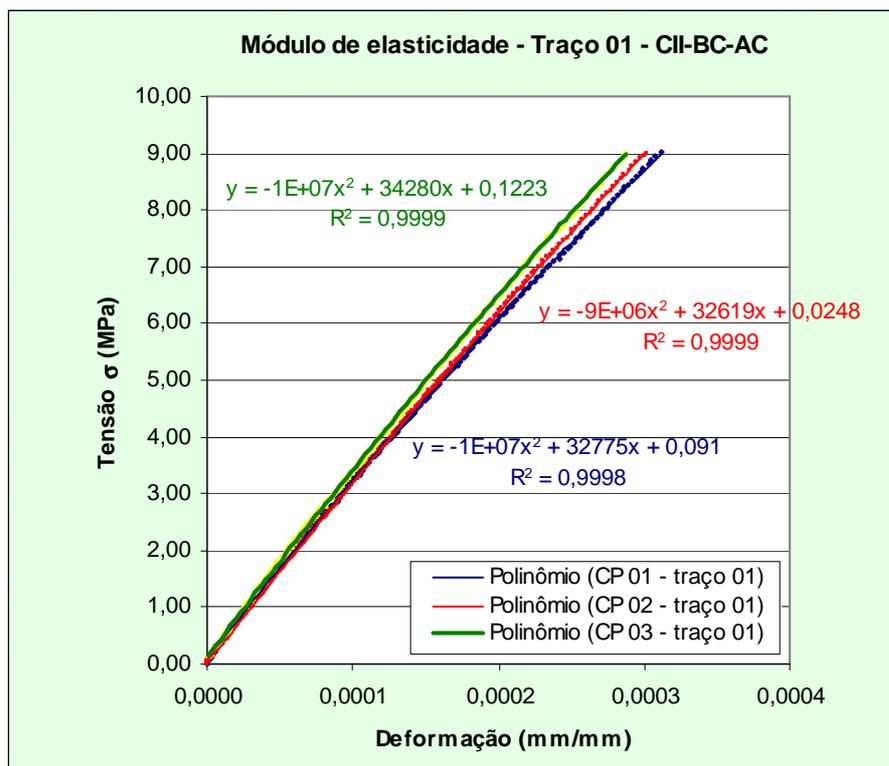


FIGURA B.13- Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 01 – CII-BC-AC

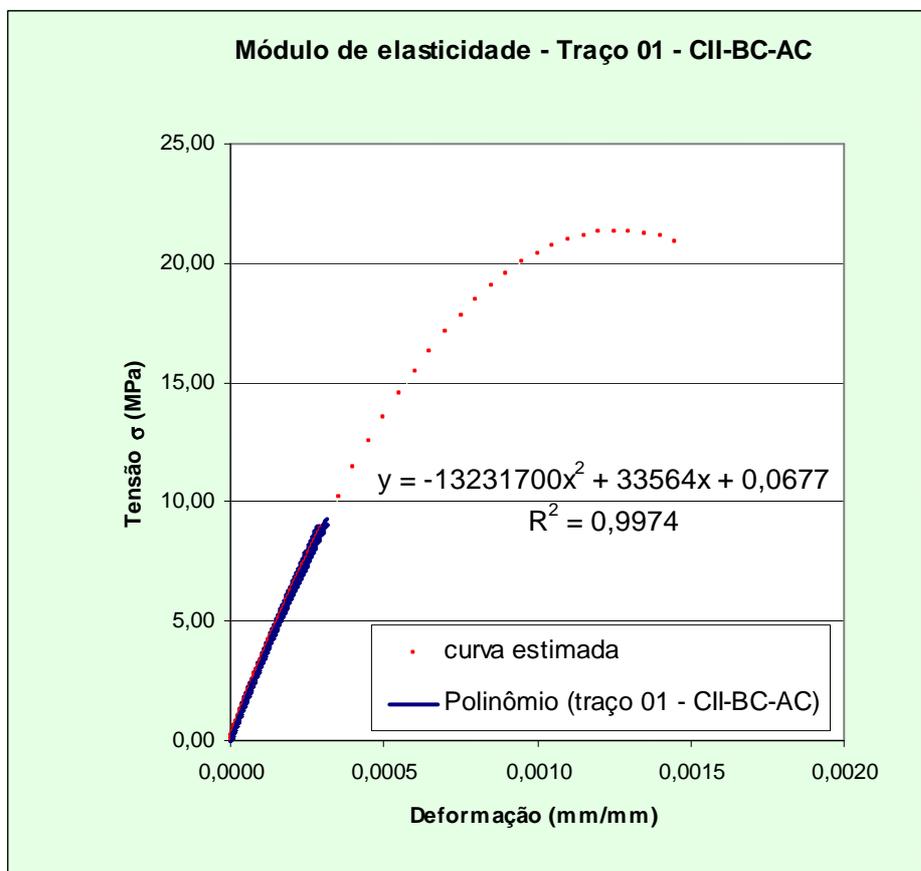


FIGURA B.14- Curva tensão-deformação estimada para o Traço 01 – CII-BC-AC

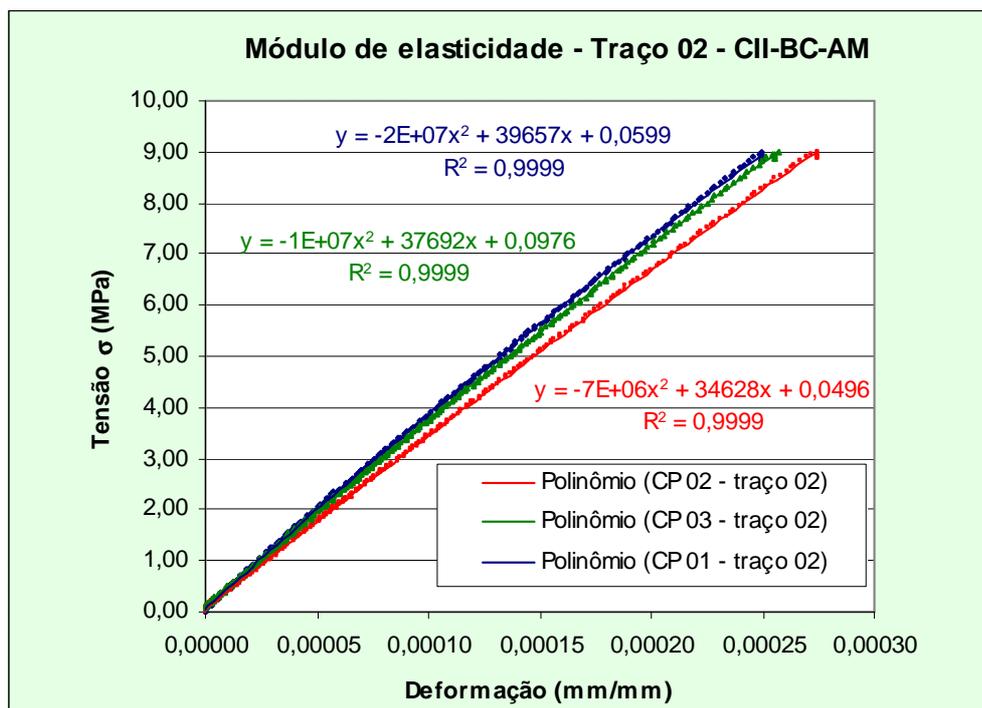


FIGURA B.15- Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 02 – CII-BC-AM

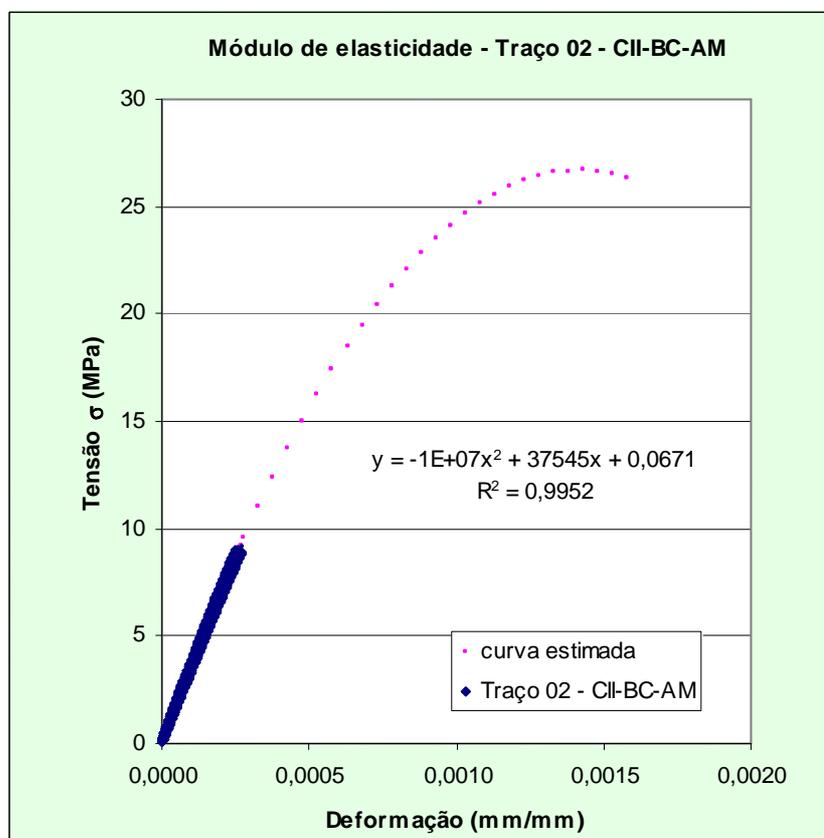


FIGURA B.16- Curva tensão-deformação estimada para o Traço 02 – CII-BC-AM

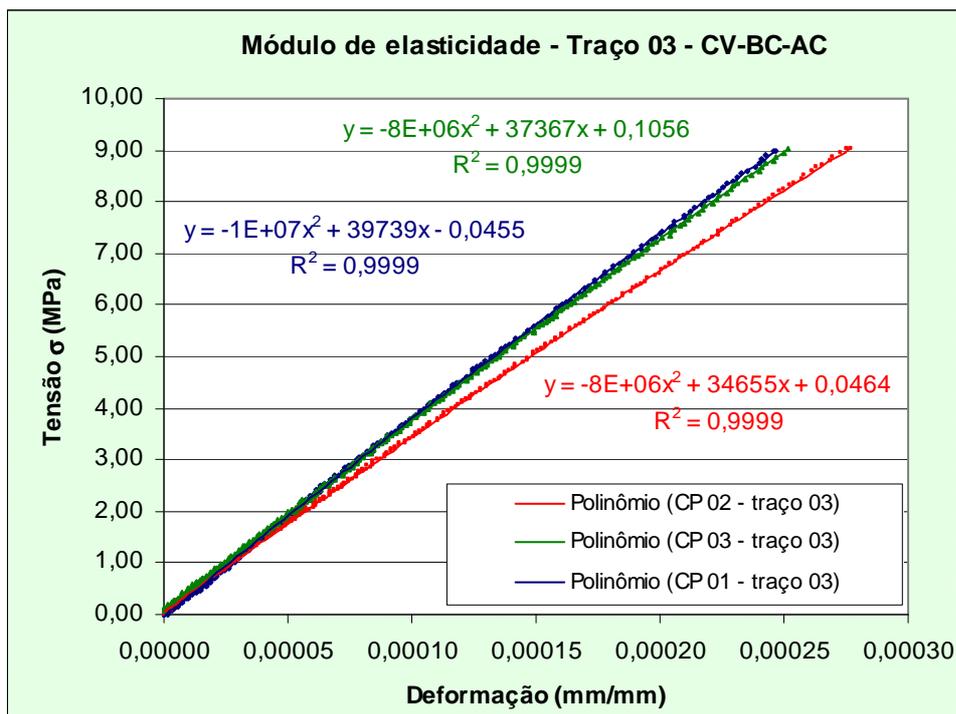


FIGURA B.17- Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 03 – CV-BC-AC

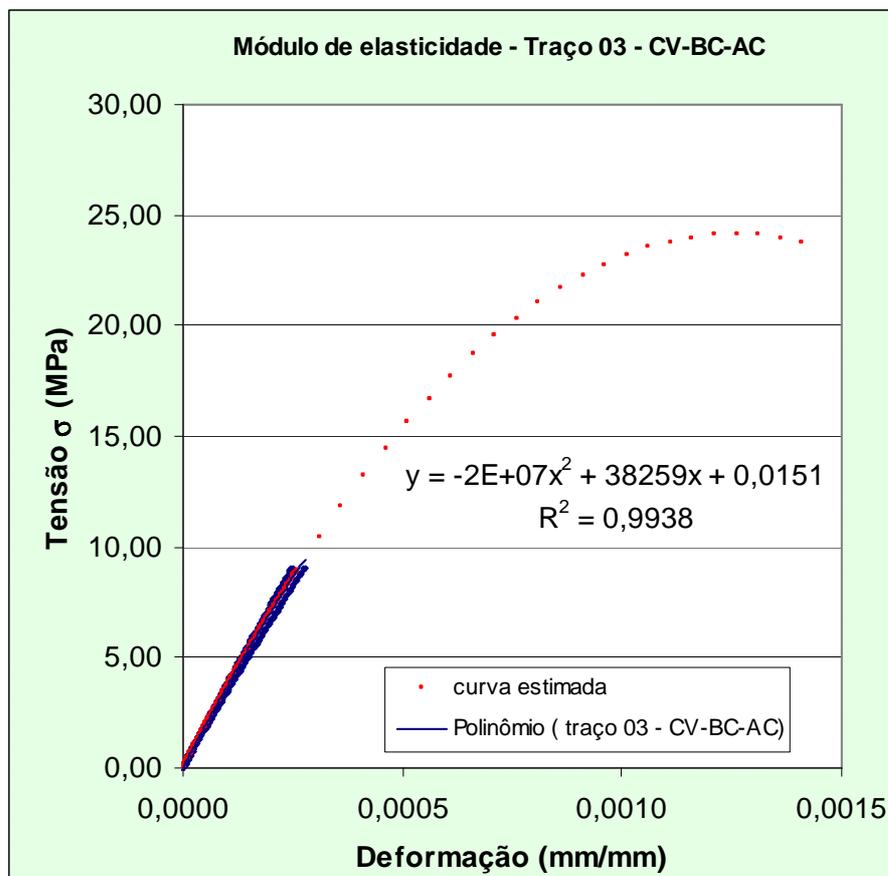


FIGURA B.18- Curva tensão-deformação estimada para o Traço 03 – CV-BC-AC

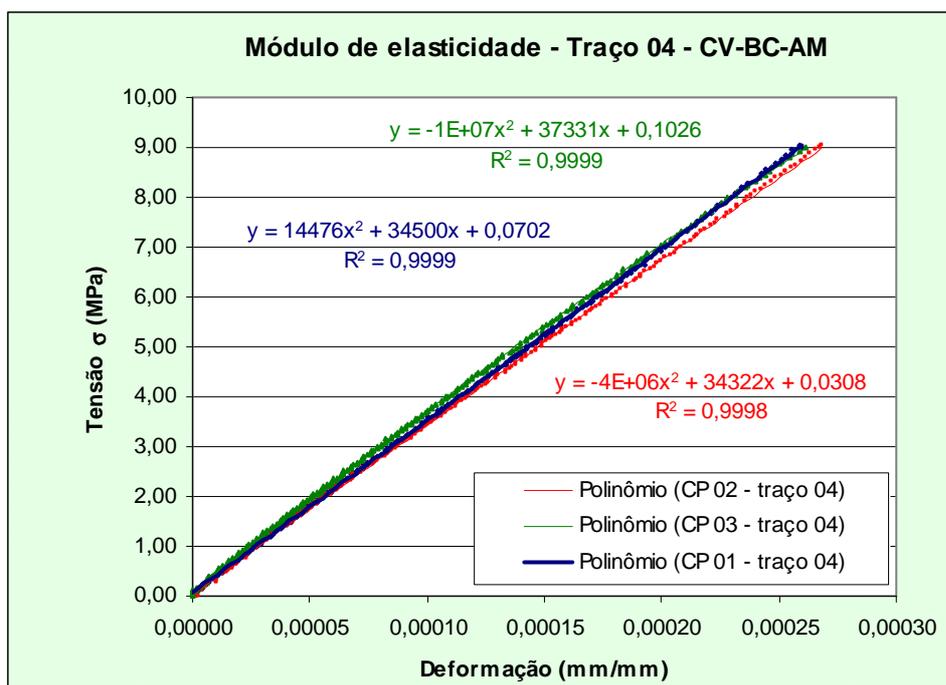


FIGURA B.19- Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 04 – CV-BC-AM

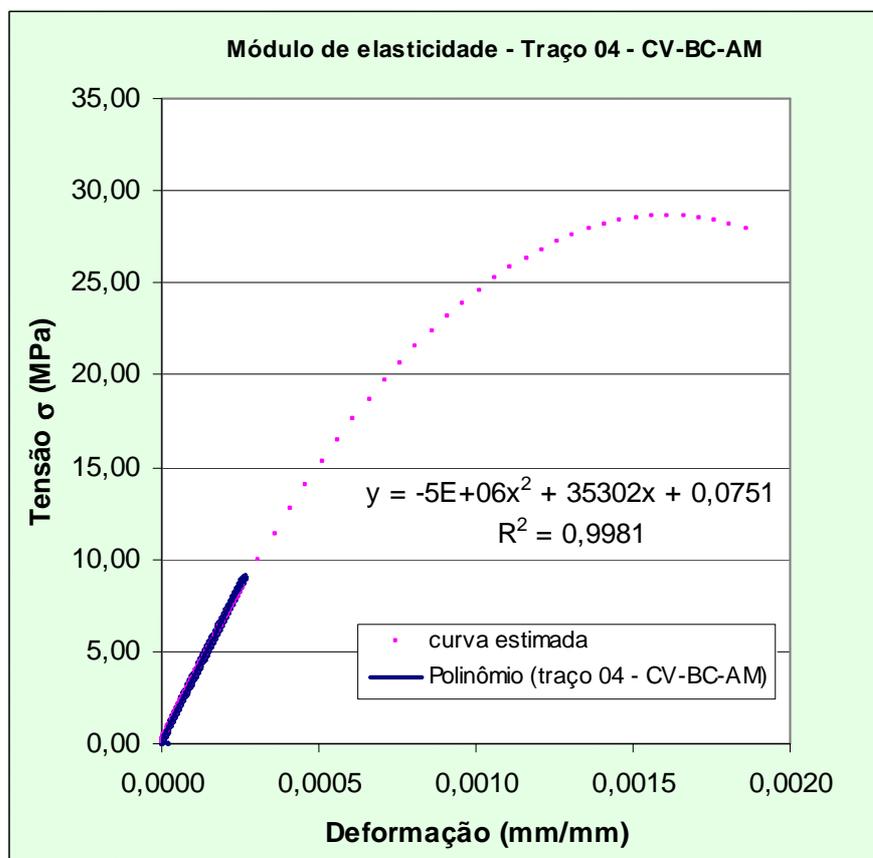


FIGURA B.20- Curva tensão-deformação estimada para o Traço 04 – CV-BC-AM

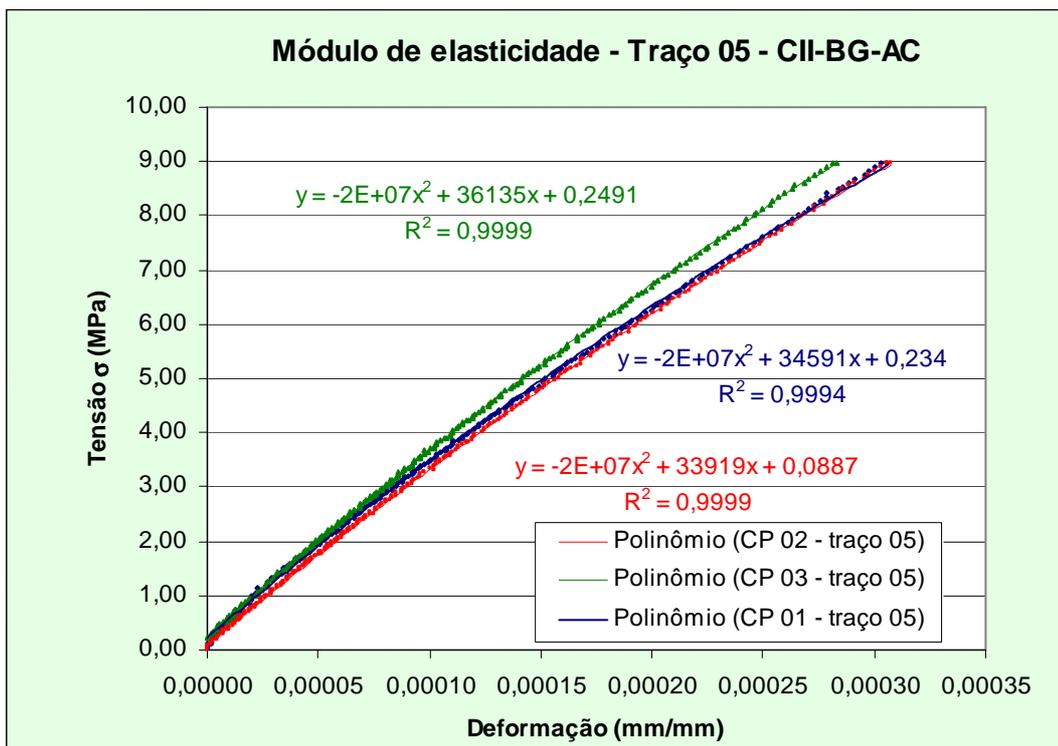


FIGURA B.21- Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 05 – CII-BG-AC

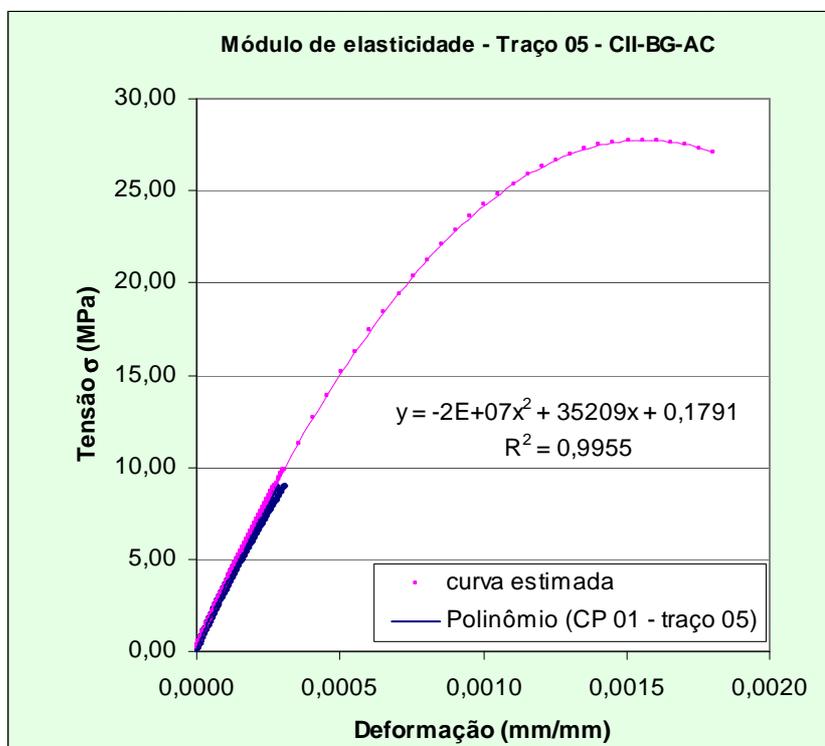


FIGURA B.22- Curva tensão-deformação estimada para o Traço 05 – CII-BG-AC

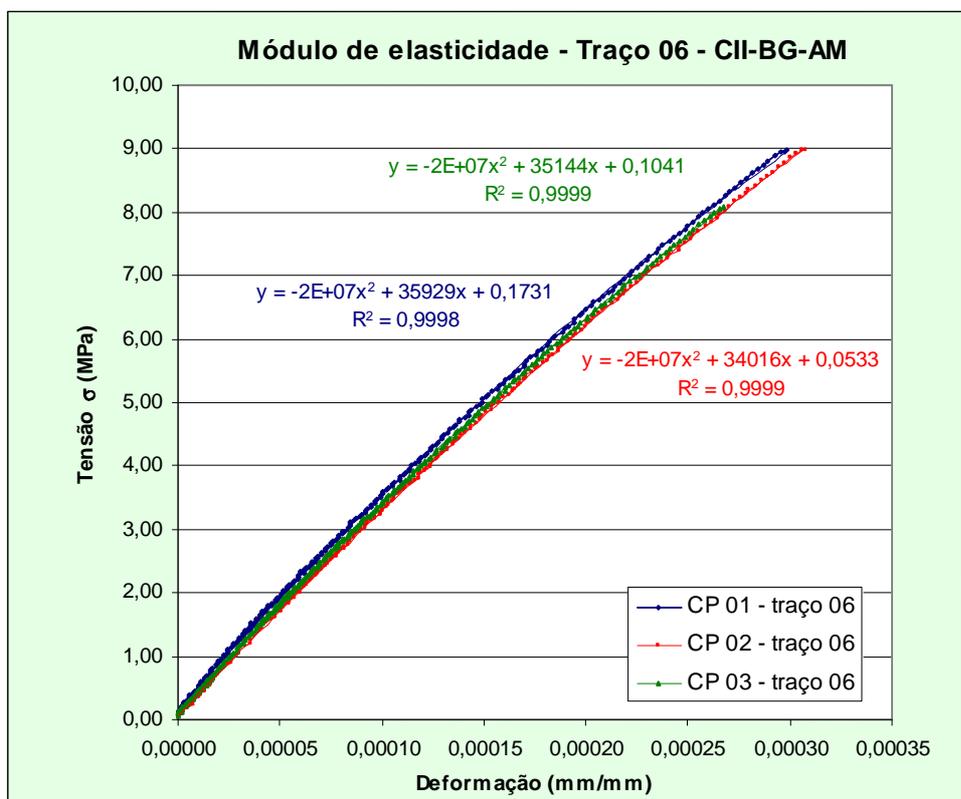


FIGURA B.23 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 06– CII-BG-AM

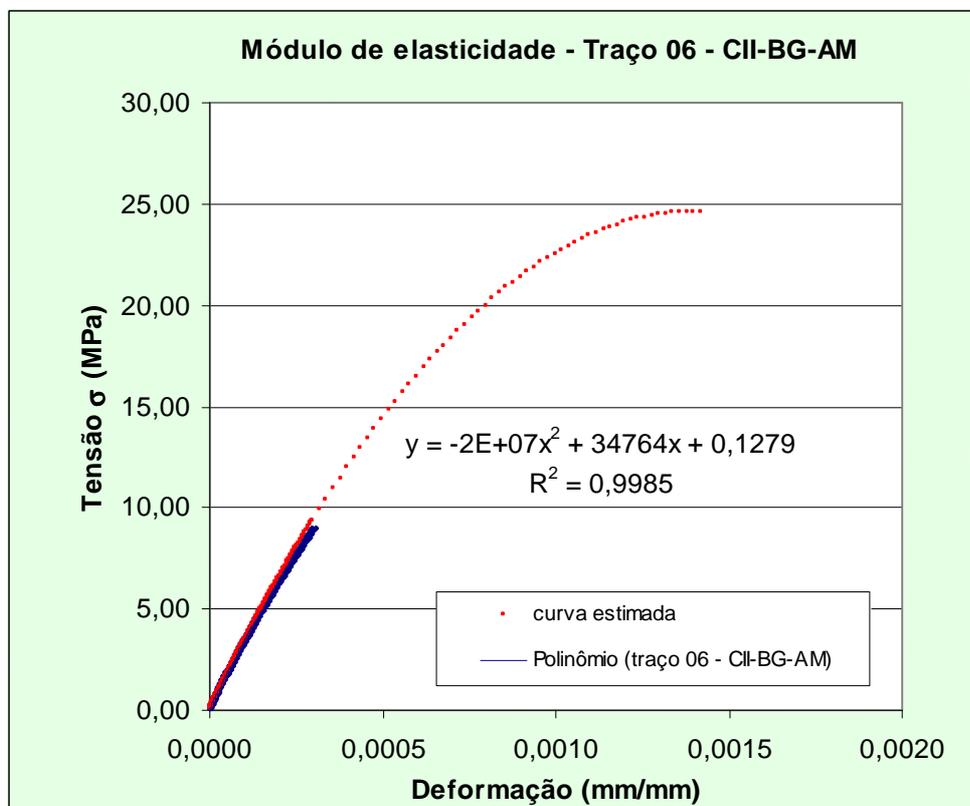


FIGURA B.24 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 06– CII-BG-AM

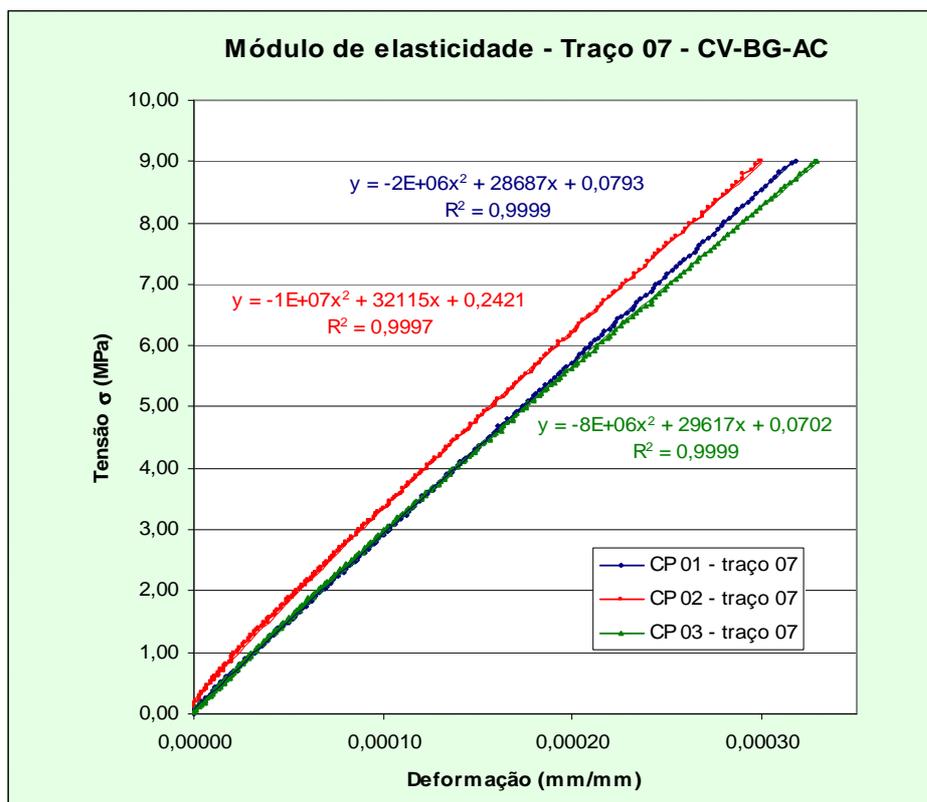


FIGURA B.25 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 07– CV-BG-AC

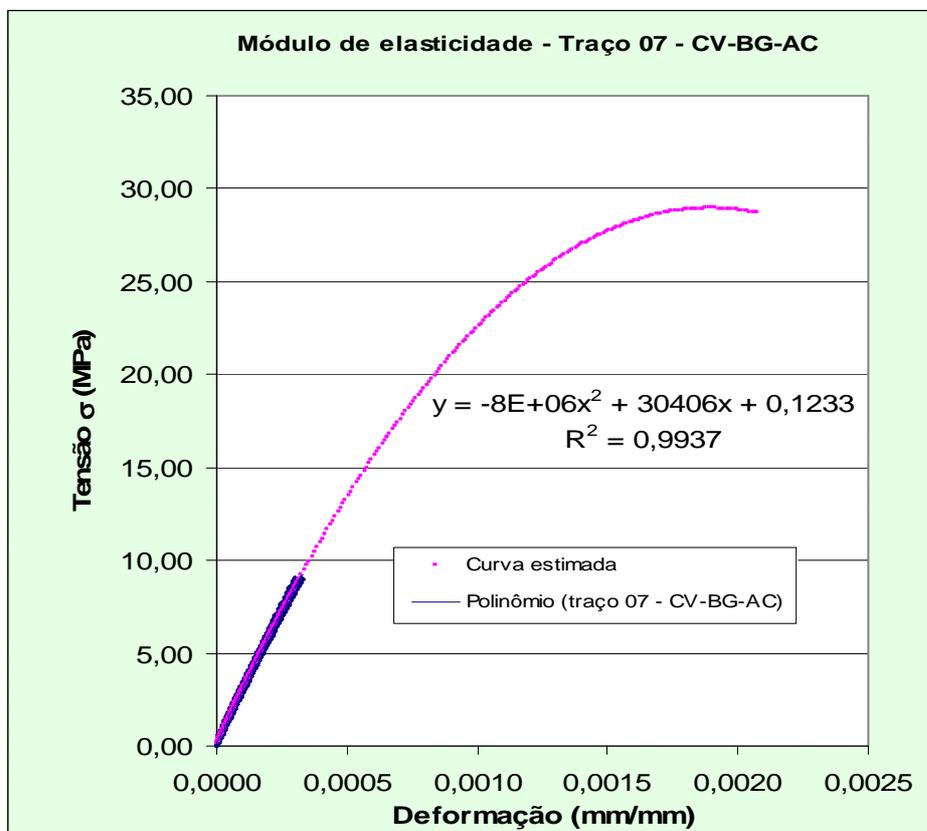


FIGURA B.26 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 07– CV-BG-AC

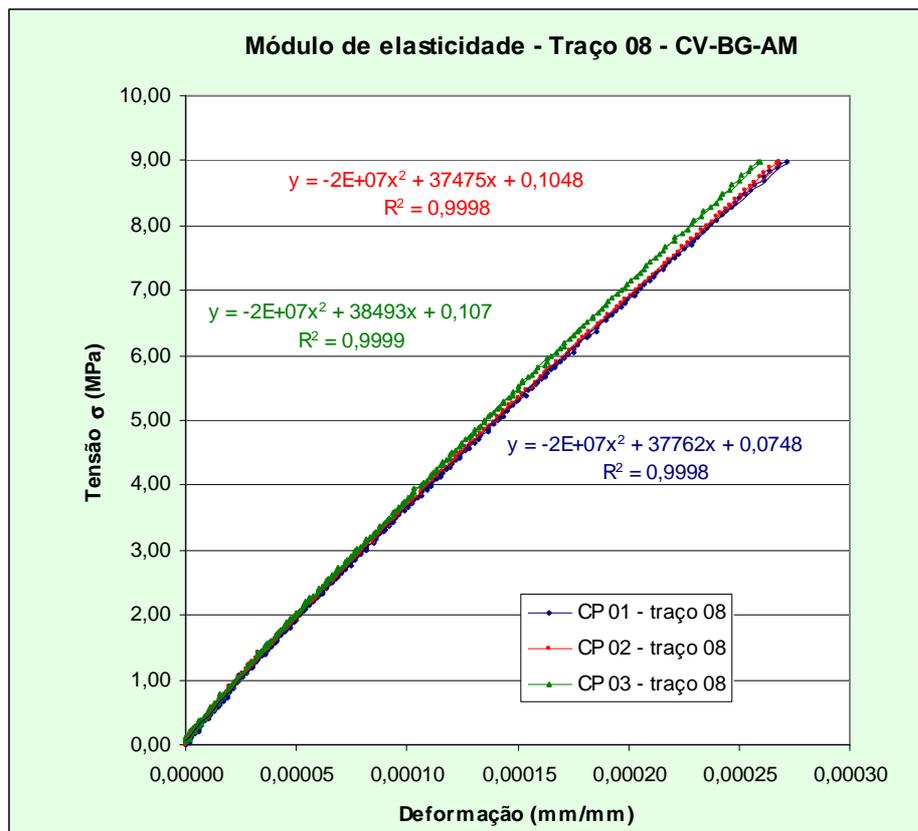


FIGURA B.27 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 08- CV-BG-AM

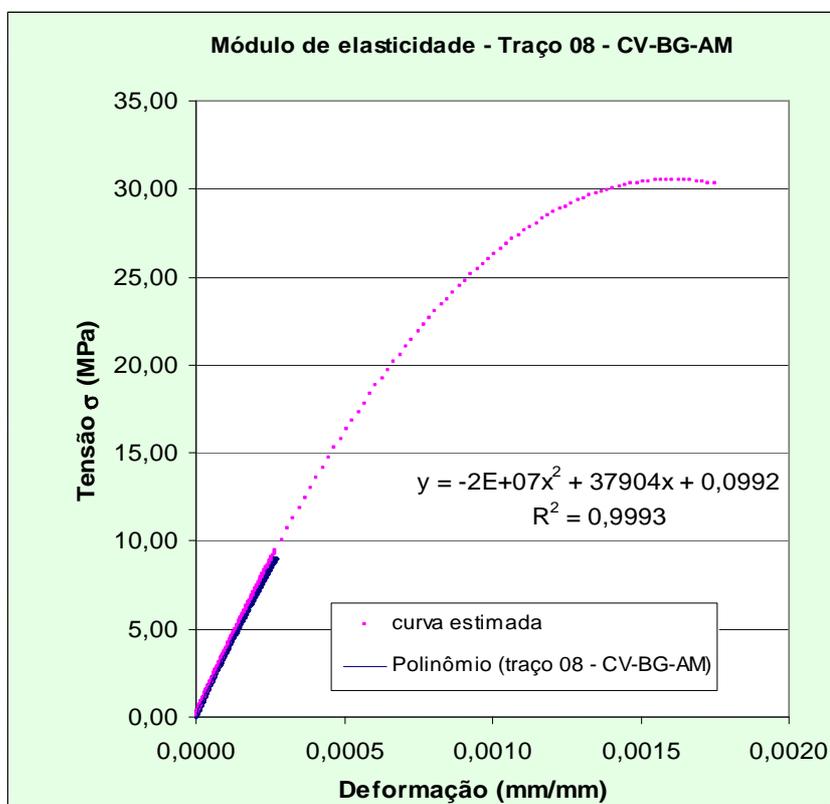


FIGURA B.28 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 08- CV-BG-AM

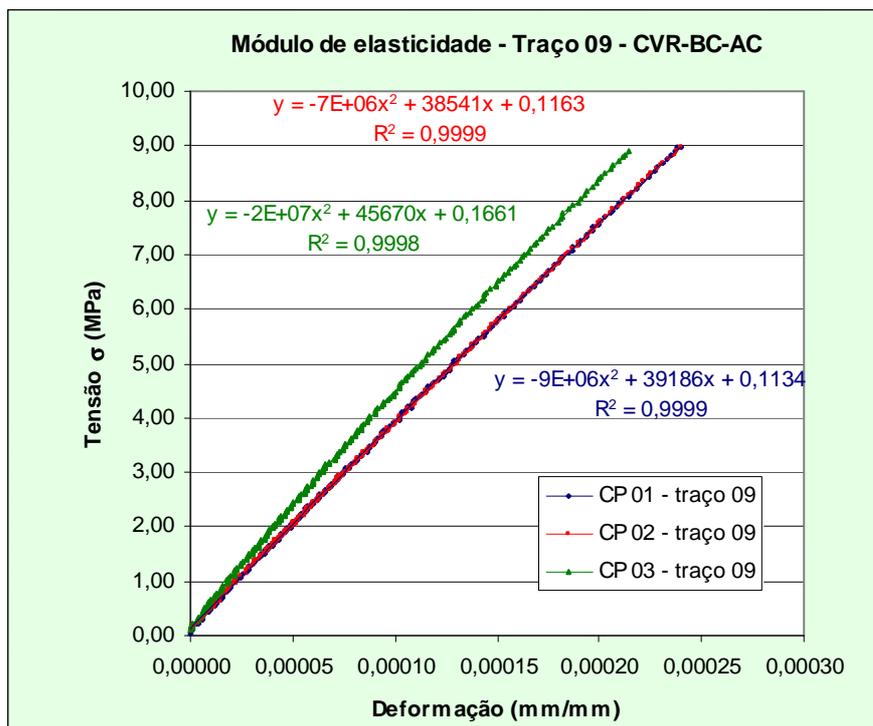


FIGURA B.29 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 09– CVR-BC-AC

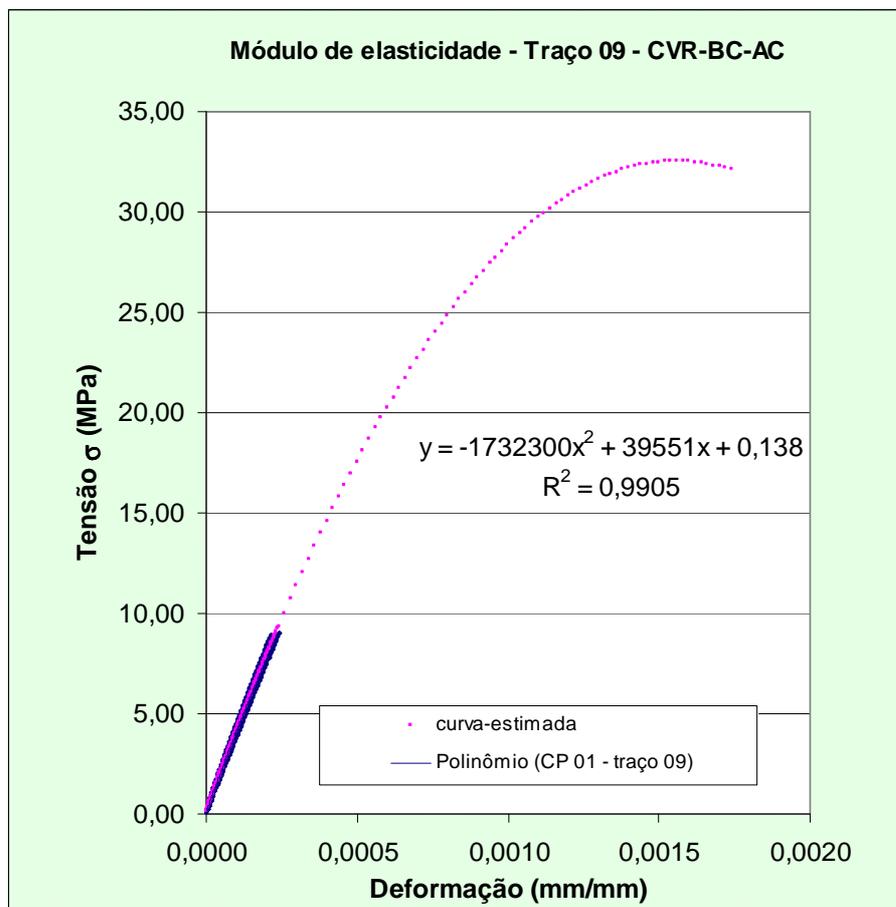


FIGURA B.30 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 09– CVR-BC-AC

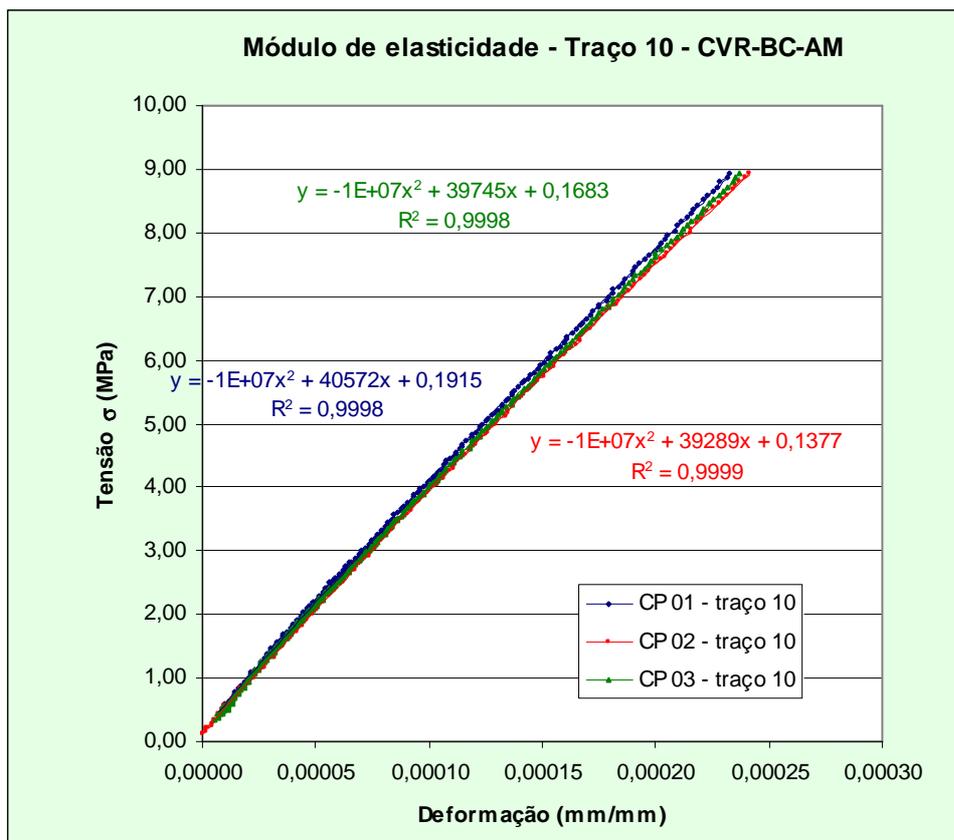


FIGURA B.31 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 10– CVR-BC-AM

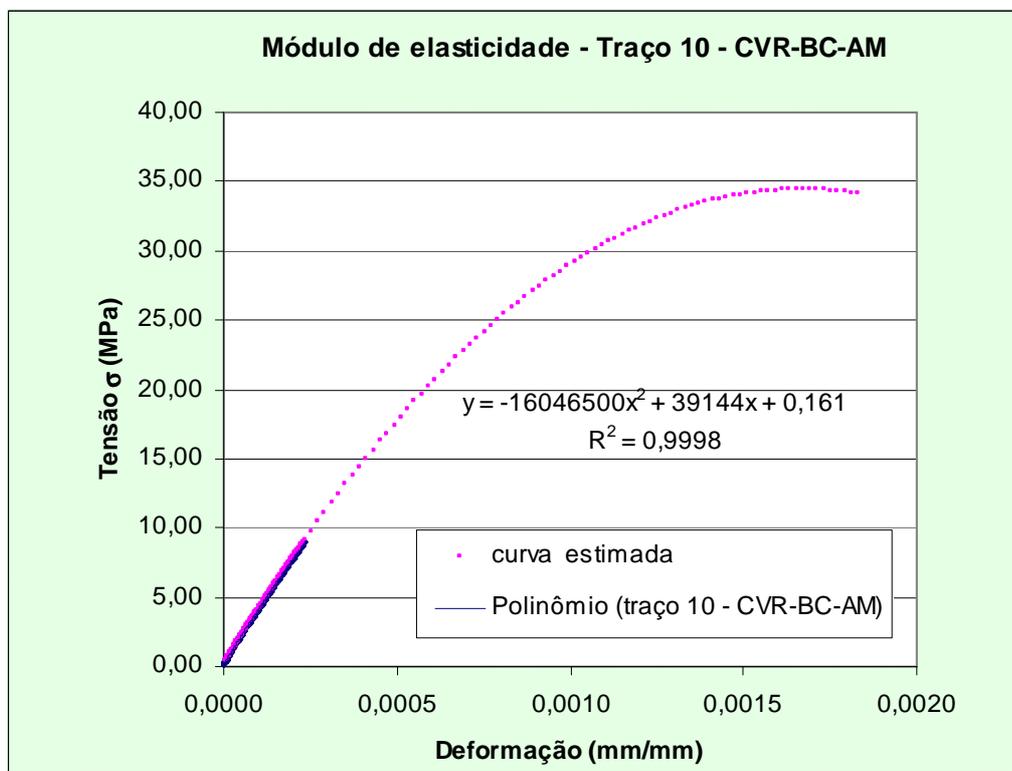


FIGURA B.32 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 10– CVR-BC-AM

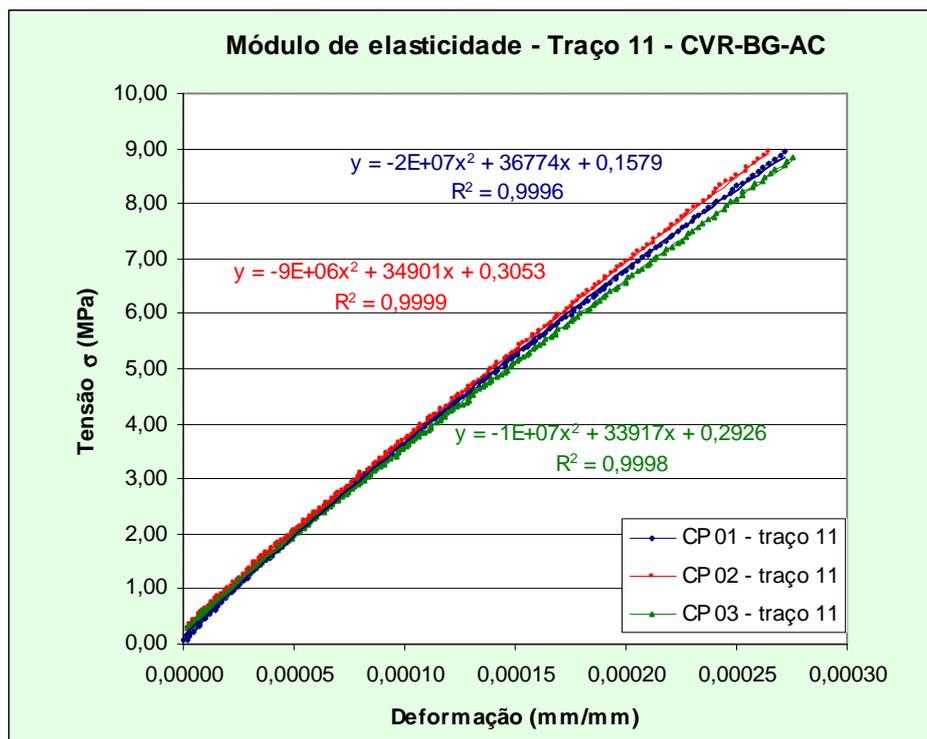


FIGURA B.33 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 11– CVR-BG-AC

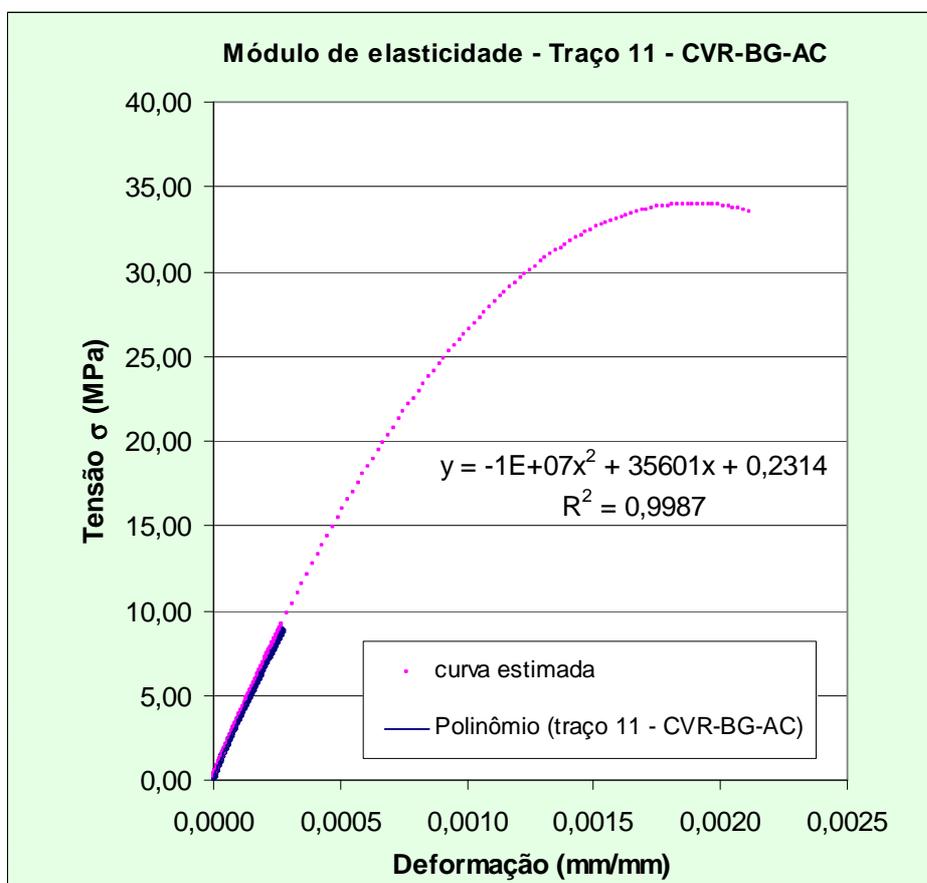


FIGURA B.34 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 11– CVR-BG-AC

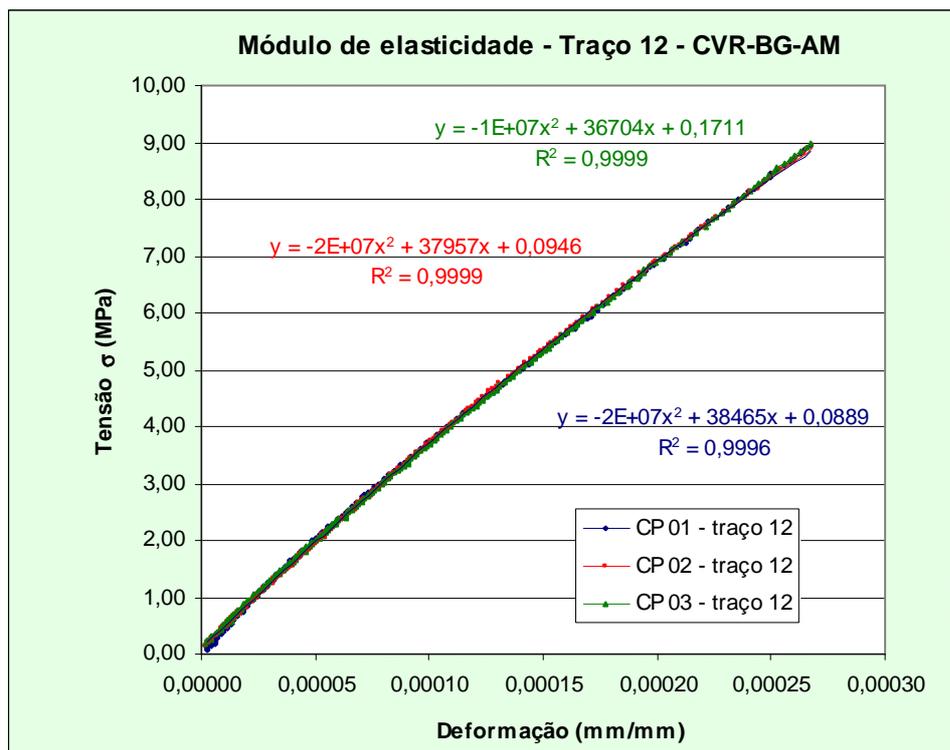


FIGURA B.35 - Curvas tensão-deformação referentes aos 3 CP's do Traço 12– CVR-BG-AM

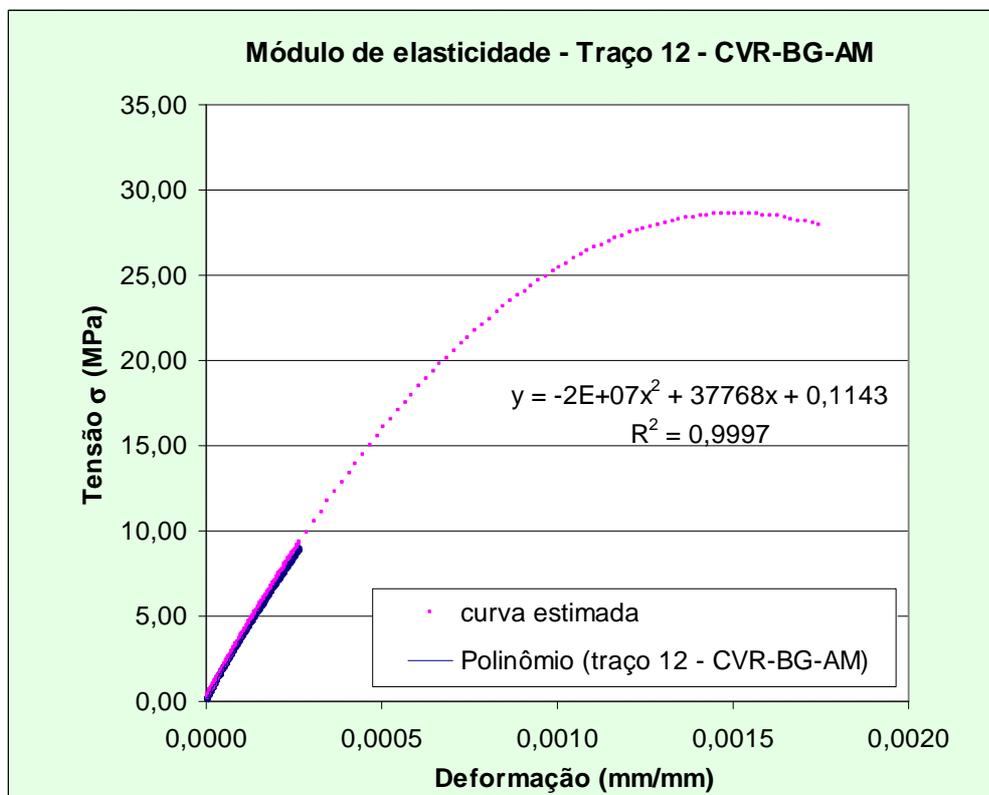


FIGURA B.36 - Curva tensão-deformação estimada para o Traço 12– CVR-BG-AM