

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO
DETERIORADO PELA AÇÃO DE SULFATO MEDIANTE
UTILIZAÇÃO DO UPV**

Rodrigo Moysés Costa

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

**"ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DETERIORADO
PELA AÇÃO DE SULFATO MEDIANTE UTILIZAÇÃO DO UPV"**

Rodrigo Moysés Costa

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Protasio Ferreira e Castro
UFF - RJ

Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula
DEES - UFMG

Prof. Dr. Roque Luiz da Silva Pitangueira
DEES - UFMG

Prof. Dr. José Samuel Giongo
EESC - USP

Prof. Dr. Giuseppe Barbosa Guimarães
PUC - RJ

Belo Horizonte, 05 de outubro de 2004

O que vale sonhar, lutar e vencer se não há fé?

Obrigado meu Deus por tudo que fizestes e
tens feito por mim. A Ti dedico este trabalho e
entrego meu esforço. Obrigado.

Aos meus pais Oswaldo Costa Filho e Maria Márcia Moysés Costa, pela educação, dedicação, amor e carinho que me proporcionaram, fazendo de mim a pessoa que sou. A minha irmã Flávia Moysés Costa de Grajeda sempre presente com palavras de incentivo e motivação. À minha noiva, Cristiane Pinto Ferreira, pela sua compreensão, incentivo, dedicação, carinho e amor em todas as etapas deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ney Amorim Silva, meu orientador, amigo e dedicado mestre, que com compreensão, tolerância, apoio e amizade, acreditou em mim e possibilitou a realização deste trabalho em todos os momentos.

Ao Prof. Protásio Ferreira e Castro que colaborou com seus conhecimentos técnicos e científicos.

Ao Prof. Fernando Amorim de Paula pela disponibilidade e incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Edgar Mantilla Carrasco pelas sugestões enriquecedoras no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Abdias Magalhães Gomes que participou de maneira ativa deste trabalho com seus conhecimentos técnicos e científicos, além da ajuda pessoal.

Ao Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão pelos ensinamentos e carinho com que sempre me distinguiu.

À Prof^ª. Maria Elisa Scarpelli Ribeiro e Silva que contribuiu disponibilizando os recursos do laboratório do departamento de Engenharia Química da UFMG.

À Prof^ª. Maria Tereza Paulino Aguilár que contribuiu para a realização dos ensaios do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

Ao Prof. Antônio Valadão Cardoso que contribuiu sobremaneira disponibilizando o laboratório de porosimetria do CETEC para a realização deste trabalho.

À Eng^ª Olívia Maria de Sousa Ribeiro Vasconcelos que muito contribuiu no desenvolvimento deste trabalho, com especial distinção.

Ao pesquisador do CETEC, Prof. Jorge Safar por sua estimada ajuda.

À estatística Roberta Chendes Dias Gomes que muito contribuiu com seus conhecimentos técnicos e científicos.

Ao meu amigo e cunhado Leopoldo Grajeda Fernandes pela sua disponibilidade e idéias no planejamento e concretização deste trabalho.

Às secretárias de pós-graduação do departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, Iracema Alves Torres, Maria Inês Miranda de Souza, Patrícia Aparecida da Silva, Lucíola Maria Canêdo Alves, Fátima Aparecida de Carvalho e Renata Francisca Reis, pela atenção, gentileza e incentivo constante que me dedicaram.

Aos funcionários dos departamentos de Engenharia de Estruturas, Engenharia de Materiais de Construção, Engenharia Química e Engenharia de Minas com especial atenção ao Sr. José Eustáquio de Andrade, companheiro de longas horas de trabalho.

Aos laboratoristas Lauson Mateus Alves da Silveira e Elizabeth Solange da Silva, pela dedicação.

Às empresas Solocap, Êxito Construtora e Incorporadora Ltda e Holcim (Brasil) S.A. na pessoa do Eng. Flávio Renato Pereira Capuruço pelo fornecimento do cimento com alto padrão de qualidade, responsável pelo rigor científico deste trabalho.

Finalmente, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra, contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

SUMÁRIO

Apresentação

1	Introdução	1
1.1	Objetivo.....	2
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Apresentação.....	4
2	Ataque de Sulfatos no Cimento Portland	5
2.1	Reações do Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$).....	11
2.2	Reações do Sulfato de Sódio (Na_2SO_4).....	12
2.3	Reações do Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$).....	13
3	Utilização da Técnica de Pulso Ultra-Sônico no Concreto de Cimento Portland	19
3.1	Generalidades.....	19
3.2	Ensaio de Ultra-sonografia no Concreto.....	25
3.2.1	Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda.....	29
3.2.1.1	Frequência.....	29
3.2.1.2	Velocidade de Propagação.....	30
3.2.1.3	Comprimento de Onda.....	30
3.2.2	Relações entre Velocidade, Comprimento de Onda e Frequência...	30
3.2.3	Tipos de Ondas ou Pulsos.....	32
3.2.3.1	Ondas Longitudinais ou de Compressão.....	32
3.2.3.2	Ondas Transversais ou de Cisalhamento.....	33
3.2.3.3	Ondas Superficiais ou de Rayleigh.....	34
3.2.4	Geração de Ondas Ultra-Sônicas.....	35
3.2.4.1	Efeito Piezoelétrico.....	35
3.2.4.2	Tipos de Cristais.....	36
3.2.4.3	Transdutores Retos ou Normais.....	36
3.2.4.4	Transdutores Angulares.....	37

3.2.4.5	Transdutores Duplo-Cristal.....	37
3.2.5	Ultra-Sonografia e Concreto.....	38
3.2.5.1	Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico e Coeficiente de Poisson.....	41
3.2.5.2	Estimativa da Resistência do Concreto.....	42
3.2.5.3	Determinação da Homogeneidade do Concreto.....	42
3.2.5.4	Estudos da Hidratação do Cimento.....	43
3.2.5.5	Estudos da Durabilidade do Concreto.....	43
3.2.5.6	Medição e Detecção de Fissuras.....	44
3.3	Aparelhos para Ultra-sonografia.....	45
3.3.1	PUNDIT 6.....	45
3.3.1.1	Procedimento de Ensaio.....	46
3.3.2	V-Meter Mark II.....	46
3.3.2.1	Procedimento de Ensaio.....	47
3.4	Comparação entre o PUNDIT 6 e o V-Meter Mark II.....	47
4	Programa Experimental.....	48
4.1	Metodologia.....	48
4.1.1	Determinação do Número de Corpos-de-Prova.....	48
4.1.2	Propriedades dos Materiais.....	50
4.1.2.1	Agregado Miúdo.....	50
4.1.2.2	Agregados Graúdos.....	50
4.1.2.3	Cimentos.....	52
4.1.2.4	Solução.....	52
4.1.2.5	Concreto.....	53
4.1.2.6	Caixas D'água.....	54
4.1.2.7	Vidraria.....	54
4.1.2.8	Substâncias Químicas.....	55
4.1.2.9	Moldes para Fabricação de Corpos-de-Prova.....	55
4.1.3	Ensaios.....	55
4.1.3.1	Ultra-sonografia.....	56
4.1.3.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	56

4.1.3.3	Resistência a Compressão.....	57
4.1.3.4	Porosimetria de Mercúrio.....	58
4.1.3.5	Análise Química.....	59
4.1.3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
5	Análise dos Resultados.....	61
5.1	Análise dos Dados.....	67
5.2	Análise Estatística das Resistências dos Corpos-de-Prova.....	96
5.2.1	Comparações Utilizando Gráficos <i>Boxplot</i> e Medidas Descritivas	96
5.2.2	Variável Resposta – Resistência Real (MPa).....	97
5.2.3	Variável Resposta – Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s).....	100
5.2.4	Análise de Variância – Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica.....	108
5.2.5	Análise de Variância e Modelo de Regressão Linear – Variável Resposta Resistência Real.....	111
5.3	Análise Estatística do Módulo de Elasticidade Dinâmico dos Corpos-de-Prova.....	117
5.3.1	Comparações Gráficas Utilizando Gráficos <i>Boxplot</i>	117
5.3.2	Variável Resposta – Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa).....	118
5.3.3	Variável Resposta – Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s).....	122
5.3.4	Análise de Variância – Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica.....	128
5.3.5	Análise de Variância e Modelo de Regressão Linear – Variável Resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	131
5.4	Considerações Finais.....	133
5.4.1	Análise Quantitativa dos Gráficos <i>Boxplot</i> para os Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Resistência à Compressão.....	133
5.4.1.1	Variável Resposta Resistência Real (MPa).....	133
5.4.1.2	Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s).....	134

5.4.2	Análise Quantitativa dos Gráficos <i>Boxplot</i> para os Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	136
5.4.2.1	Variável Resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico(GPa)..	136
5.4.2.2	Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s).....	138
5.4.3	Resumo dos Resultados dos Gráficos <i>Boxplot</i>	140
6	Conclusão	142
7	Referências Bibliográficas	146
Anexo A	– Materiais e Equipamentos Utilizados.....	154
Anexo B	– Aparelhos Utilizados nos Ensaios e Misturas Usadas para a Fabricação dos Concretos.....	159
Anexo C	– Resultados dos Ensaios e Análises do Microscópio Eletrônico de Varredura.....	165
Anexo D	– Gráficos da Análise de Resíduos e Teste de Tukey.....	193

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – relação água/cimento

CAD – concreto de alto desempenho

CC – agregado graúdo calcário calcítico

CD – agregado graúdo calcário dolomítico

cp – corpo-de-prova

cps – corpos-de-prova

d – diâmetro do corpo-de-prova (cm)

D – peso unitário (kN/m^3)

DRX – ensaio de difração de raios-X

E_d – ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

END – ensaios não destrutivos

f – frequência da onda ultra-sônica (s^{-1})

f_c – resistência do concreto à compressão

f_{ck} – resistência característica do concreto (MPa)

f_r – frequência longitudinal ressonante (Hz)

g – aceleração relativa à gravidade (m/s^2)

GN – agregado graúdo de gnaiss

K – constante (m/s^2)

K_1 – constante para um cilindro (seg^2/cm^2)

l – distância entre os transdutores (mm)

L – comprimento do corpo-de-prova (cm)

MED – ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

MEV – ensaio de microscopia eletrônica de varredura

MF – módulo de finura

MP – material pulverulento

Rx – transdutor receptor do pulso ultra-sônico

S0 – solução com concentração de 0g/L de sulfato de magnésio

S10 – solução com concentração de 10g/L de sulfato de magnésio

S50 – solução com concentração de 50g/L de sulfato de magnésio

t – tempo da onda ultra-sônica (μs)

T_x – transdutor transmissor do pulso ultra-sônico

UPV – *Ultrasonic Pulse Test*

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

v – velocidade da onda de compressão para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (m/s)

W – massa do corpo-de-prova (kg)

λ – comprimento da onda ultra-sônica (m)

ν – coeficiente de Poisson

LISTA DE FIGURAS

3.1	Campo de audibilidade das vibrações mecânicas.....	29
3.2	Relação entre frequência e comprimento de onda.....	30
3.3	Esquema representativo de ondas longitudinais.....	32
3.4	Esquema representativo de ondas transversais.....	33
3.5	Transdutor normal ou reto.....	36
3.6	Transdutor angular.....	37
3.7	Transdutor duplo cristal.....	38
3.8	Métodos de propagação dos pulsos ultra-sônicos.....	39
3.9	Determinação da profundidade de deterioração para o método indireto.....	40
3.10	Relação velocidade x resistência à compressão estimada do concreto.....	42
3.11	Medição da profundidade da fissura.....	44
3.12	Aparelho de ultra-sonografia PUNDIT.....	46
3.13	Aparelho de ultra-sonografia V-Meter Mark II.....	47
4.1	Posicionamento das leituras da onda ultra-sônica nos cps.....	56
4.2	Fotos de um penetrômetro e seus componentes.....	58
5.1	Desgaste superficial do corpo-de-prova de concreto inserido na solução S0.....	75
5.2	Desgaste superficial do corpo de prova de concreto inserido na solução S0.....	79
5.3	Boxplots para a resistência real (MPa) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	97
5.4	Boxplots para resistência real (MPa) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	98
5.5	Boxplots para resistência real (MPa) estratificado por idade e solução (resistência ideal igual a 20 MPa).....	99
5.6	Boxplots para resistência real (MPa) estratificado por idade e solução (resistência ideal igual a 50 MPa).....	100
5.7	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	101
5.8	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	102

5.9	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por solução e idade (resistência ideal igual a 20 MPa).....	103
5.10	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por solução e idade (resistência ideal igual a 50 MPa).....	104
5.11	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e transdutores.....	105
5.12	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e máquina.....	106
5.13	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e ponto de medição.....	107
5.14	Boxplots para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	118
5.15	Boxplots para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	119
5.16	Boxplots para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificado por idade e solução (resistência ideal igual a 20 MPa).....	120
5.17	Boxplot para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificado por idade e solução (resistência ideal igual a 50 MPa).....	121
5.18	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	122
5.19	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	123
5.20	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por solução e idade (resistência ideal igual a 20 MPa).....	124
5.21	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por solução e idade (resistência ideal igual a 50 MPa).....	125
5.22	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e frequência dos transdutores.....	126
5.23	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e máquina.....	127
5.24	Boxplots para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificado por resistência ideal (MPa) e ponto de medição.....	128

LISTA DE QUADROS

5.1	Quadrados latinos utilizados na fabricação dos concretos, execução dos ensaios e disposição nas soluções (fc em MPa e I em dias).....	65
5.2	Quadrados latinos utilizados na fabricação dos concretos, execução dos ensaios e disposição nas soluções (fc em MPa e I em dias).....	66
5.3	Concretos com resistência de 20 MPa e agregado graúdo CC, submetidos à solução S0.....	67
5.4	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	67
5.5	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	68
5.6	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções de S10 e S50.....	68
5.7	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CD, submetidos à solução S0.....	71
5.8	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	71
5.9	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	72
5.10	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	72
5.11	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo GN, submetidos à solução S0.....	76
5.12	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	76
5.13	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	77
5.14	Concretos com resistência de 20 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	77
5.15	Concretos com resistência de 50 MPa e agregado graúdo CC, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.....	80

5.16	Concretos com resistência de 50 MPa e agregado graúdo CC e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	80
5.17	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	81
5.18	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	81
5.19	Concretos com resistência de 50 MPa e agregado graúdo CD, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.....	86
5.20	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	86
5.21	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	87
5.22	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	87
5.23	Concretos com resistência de 50 MPa e agregado graúdo GN, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.....	91
5.24	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	91
5.25	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.....	92
5.26	Concretos com resistência de 50 MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.....	92
5.27	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 28 dias.....	112
5.28	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 28 dias.....	113
5.29	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 90 dias.....	114

5.30	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 90 dias.....	115
5.31	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 180 dias.....	116
5.32	Modelo de regressão linear para resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 180 dias.....	116
5.33	Modelo de regressão linear para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando as resistências ideais de 20 MPa e 50 MPa e a máquina JAMES.....	131
5.34	Modelo de regressão linear para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando as resistências ideais de 20 MPa e 50 MPa e a máquina PUNDIT.....	132

LISTA DE TABELAS

2.1	Algumas propriedades dos principais componentes do cimento Portland.....	14
2.2	Requerimentos de proteção contra danos ao concreto por ataque de sulfato de fontes externas de sulfato.....	17
2.3	Classes de agressividade ambiental.....	18
3.1	Velocidades da onda longitudinal em diferentes meios.....	33
3.2	Velocidades da onda transversal em diferentes meios.....	34
5.1	Descrição das variáveis utilizadas na análise estatística.....	96
5.2	Medidas descritivas para a resistência real (MPa) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	97
5.3	Medidas descritivas para a resistência real (MPa) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	98
5.4	Medidas descritivas para a resistência real (MPa) estratificadas por idade e solução para a resistência ideal de 20 MPa.....	99
5.5	Medidas descritivas para a resistência real (MPa) estratificadas por idade e solução para a resistência ideal de 50 MPa.....	100
5.6	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	101
5.7	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	102
5.8	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por idade e solução para a resistência ideal de 20 MPa.....	103
5.9	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por idade e solução para a resistência ideal de 50 MPa.....	104
5.10	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por resistência ideal (MPa) e frequência do transdutor.....	105
5.11	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por resistência ideal (MPa) e máquina.....	106
5.12	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μ s) estratificadas por resistência ideal (MPa) e ponto de medição.....	107

5.13	Análise de variância para as medidas de tempo da onda ultra-sônica (μs) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa.....	109
5.14	Análise de variância para as medidas de tempo da onda ultra-sônica (μs) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 50 MPa.....	110
5.15	Variáveis categóricas incluídas no estudo.....	112
5.16	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 28 dias.....	113
5.17	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 28 dias.....	114
5.18	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 90 dias.....	114
5.19	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 90 dias.....	115
5.20	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina JAMES e idade de 180 dias.....	116
5.21	Análise da variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para a resistência real (MPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa, máquina PUNDIT e idade de 180 dias.....	117
5.22	Descrição das variáveis utilizadas na análise estatística.....	117
5.23	Medidas descritivas para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	118

5.24	Medidas descritivas para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	119
5.25	Medidas descritivas para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificadas por idade e solução (resistência ideal igual a 20 MPa).....	120
5.26	Medidas descritivas para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) estratificadas por idade e solução para a resistência ideal de 50 MPa.....	121
5.27	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de cimento.....	122
5.28	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por resistência ideal (MPa) e tipo de agregado.....	123
5.29	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por idade e solução para resistência ideal de 20 MPa.....	124
5.30	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por idade e solução para resistência ideal de 50 MPa.....	125
5.31	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por resistência ideal (MPa) e frequência dos transdutores.....	126
5.32	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por resistência ideal (MPa) e máquina.....	127
5.33	Medidas descritivas para o tempo da onda ultra-sônica (μs) estratificadas por resistência ideal (MPa) e ponto de medição.....	128
5.34	Análise de variância para as medidas de tempo da onda ultra-sônica (μs) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa.....	129
5.35	Análise de variância para as medidas de tempo da onda ultra-sônica (μs) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 50 MPa.....	130
5.36	Análise de variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa e máquina JAMES.....	131
5.37	Análise de variância e estimativas dos coeficientes do modelo de regressão para o módulo de elasticidade dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando resistência ideal de 20 MPa e 50 MPa e máquina PUNDIT.....	132
5.38	Comparativo dos resultados médios dos gráficos boxplot para os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e UPV.....	141

RESUMO

Este trabalho correlaciona, por intermédio de modelos matemáticos, os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico dos concretos classes C20 e C50 com o ensaio da ultra-sonografia (UPV), variando-se três tipos de cimento (CP II E 32, CP III 32 RS e CP IV 32), três tipos de agregados graúdos (gnaisse, calcário calcítico e calcário dolomítico), submetidos a três soluções de sulfato de magnésio (0g/L $MgSO_4$, 10g/L $MgSO_4$ e 50g/L $MgSO_4$), ensaiados em três idades distintas (28dias, 90 dias e 180 dias). Com o objetivo de auxiliar nas análises dos resultados da resistência à compressão e UPV, foram realizados os ensaios complementares da difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e porosimetria de mercúrio. Tais ensaios informaram qualitativamente a natureza do concreto estudado, em alguns momentos justificando os resultados quantitativos em outros os corroborando, resultando em uma análise mais completa do ataque do sulfato de magnésio ao concreto. Desta forma, o presente trabalho possibilita a partir de um sólido tratamento estatístico dos resultados dos ensaios de mais de 600 corpos-de-prova, a determinação das propriedades mecânicas acima mencionadas utilizando-se os modelos matemáticos propostos.

ABSTRACT

This work correlates, through mathematical models, test values of ultrasonic pulse velocity (UPV) with tests values of compressive strength and dynamic elastic modulus for concrete classes C20 and C50. The tests employ concretes of three different ages (28, 90 and 180 days), using three cement types (CP II E 32, CP III 32 RS and CP IV 32), combined with three types of coarse aggregates (gneiss, calcite and dolomite limestone), submitted to three sulfate magnesium environments (0 g/L, 10 g/L and 50 g/L of $MgSO_4$). Complementary tests of X-ray diffraction (DRX), scanning electron microscopy (MEV) and mercury intrusion porosimetry were accomplished to corroborate with and improve analyses of correlation between UPV and compression strength values. Such tests inform the nature of studied concrete either justifying quantitative results other corroborating them. They also permit a more complete analysis of magnesium sulfate attack to concrete. So, through a solid statistical analysis of tests results for more than 600 specimens and all combinations of the above related variables, this work determines compressive strength and dynamic elastic modulus results, using the proposed mathematical models of correlating these mechanical properties with ultrasonic pulse velocity (UPV).

1

INTRODUÇÃO

O concreto, termo oriundo da palavra latina “concretus”, significa “crescido junto” e desde seu surgimento com os gregos e romanos, vem modificando e implementando o estilo de vida de civilizações, com especial atenção as ocidentais. Os fatores que contribuíram para o rápido crescimento da sua utilização são sua facilidade de execução, textura, forma, resistência e seu preço.

Desde a sua criação substanciais mudanças ocorreram, tanto no concreto, como no ambiente no qual ele está inserido. Estruturas, até então, com vida útil longa, passaram a ter longevidade menor. Desta forma, surgiu, naturalmente, a preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto. Mais recentemente, em meados do século XX, com a utilização do ensaio de ultra-sonografia, a prática de avaliação das estruturas agilizou os diagnósticos estruturais, não causando inclusive nenhum dano às estruturas, uma vez que tal ensaio é de natureza não destrutiva.

A técnica de avaliação das estruturas que utiliza ensaios não destrutivos (END) é aprimorada constantemente e seu emprego cresce continuamente em todo o mundo, abrangendo vários ensaios. Dentre os que se destacam, pela praticidade, portabilidade e fácil manuseio, está o ultra-som com sua técnica e princípio de utilização simples; mas, quando se trata do concreto, que é um material heterogêneo por causa dos seus

componentes de naturezas distintas, surgem situações que exigem cuidados mais abrangentes.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo determinar importantes propriedades mecânicas dos concretos convencional e de alto desempenho, correlacionando através de modelos matemáticos obtidos através de um amplo tratamento estatístico dos resultados, o ensaio da ultra-sonografia com os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. Os concretos em questão são de classes C20 e C50, fabricados com três tipos de cimento (CP II E 32, CP III 32 RS e CP IV 32), três tipos de agregados graúdos (gnaisse, calcário calcítico e calcário dolomítico), submetido a três soluções de sulfato de magnésio com concentrações distintas (0g/L $MgSO_4$, 10g/L $MgSO_4$ e 50 g/L $MgSO_4$) e ensaiados em três idades (28 dias, 90 dias e 180 dias).

1.2 Justificativa

No último século, o concreto foi um dos materiais mais utilizados no nosso país e continuará sendo por um bom período. Desde o seu aparecimento que ele é utilizado com o propósito de fornecer à construção a necessária resistência, economia e facilidade de execução, inexistindo uma preocupação maior com sua durabilidade.

A indústria da construção civil contribui com aproximadamente 10% do valor do PIB brasileiro e é considerada como referência na política de crescimento na oferta de emprego, por contratar pessoal de diversos graus de escolaridade e capacitação profissional. O trabalhador deste setor geralmente apresenta baixa qualificação, necessitando sempre de um acompanhamento permanente.

Independente do tamanho e da importância da obra, mas em virtude dos aspectos artesanais do produto, o controle da qualidade atua nas seguintes etapas do processo de produção: componentes, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura. Neste

caso, as exigências de durabilidade e vida útil do concreto de cimento Portland acrescentaram parâmetros de controle que reduzem a probabilidade do aparecimento de “portas de entrada” de agentes agressivos, como é o caso das fissuras ou, simplesmente, da perda precoce da resistência do concreto.

Com o advento dos aditivos superplastificantes e mais recentemente dos hiperplastificantes, o constante problema da elevada permeabilidade dos concretos convencionais foi resolvido com o Concreto de Alto Desempenho (CAD), aliando elevada resistência mecânica à baixa permeabilidade. Este material, embora semelhante ao concreto convencional, apresenta determinadas particularidades que, em geral, advêm da sua constituição interna, ou seja, da natureza do concreto por ser um material composto. Essas particularidades decorrem da adição à mistura de um material cimentício, que pode ser a sílica ativa, a escória de alto-forno ou a cinza volante. Como foi dito, a adição de material plastificante também torna-se imperativo, dada à necessidade de se diminuir a relação a/c, obtendo-se desta forma concretos com baixa permeabilidade. Por ter ainda um custo superior ao convencional, a utilização do CAD em larga escala ainda demorará a acontecer. Enquanto isso, o melhor a ser feito é preservar as estruturas de concreto que já existem e aperfeiçoar as técnicas de fabricação e manuseio dos “concretos convencionais”.

Provavelmente foi pensando nisso que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na nova edição da NBR 6118:2003, enfoca mudanças tais como, concreto classe C20 como resistência mínima, maiores cobrimentos, dimensões mínimas mais conservativas, visando exclusivamente aumentar a durabilidade do concreto. Isso veio corroborar a opinião vigente de que mudanças deveriam ocorrer na norma e no canteiro de obras. Todavia, para que estas mudanças possam acontecer de forma sustentável e representativa, de acordo com nossa realidade, deve-se continuar com as pesquisas, não só no âmbito da universidade, como também na indústria e no mercado consumidor.

É nesse contexto que se enquadra essa tese. Este trabalho fundamenta-se na necessidade de se ter um maior e melhor conhecimento do comportamento do concreto em ambientes agressivos. De uma maneira geral as obras não podem ser construídas sem

que se tenha o mínimo de conhecimento do ambiente em que estarão inseridas. Somente com este respaldo é que o engenheiro poderá lançar mão de um material que seja simultaneamente resistente e econômico, exercendo com excelência a engenharia.

Todavia, se a questão não for construir, mas sim recuperar, o profissional ao identificar o agente agressivo, deverá ter um conhecimento consistente de como a patologia em questão desenvolve-se, quais as propriedades mecânicas do concreto que sofrem o efeito desse ataque e como a estrutura se comporta.

1.3 Apresentação

No Capítulo 2 aborda-se o ataque do sulfato ao cimento Portland, sob um enfoque normativo, como ele ocorre, quais são os componentes do cimento que sofrem ataque, os locais onde são encontrados sulfatos, além de um histórico do cimento e como este resiste ao ataque dessa natureza.

No Capítulo 3 aborda-se a utilização da técnica do pulso ultra-sônico em concretos de cimento Portland, abrangendo desde a revisão bibliográfica sobre sua utilização, até os seus princípios de funcionamento.

No Capítulo 4 aborda-se a metodologia do trabalho, incluindo o número de corpos-de-prova, escolha e natureza dos materiais e ensaios realizados.

No Capítulo 5 enfoca-se a análise dos resultados, expondo-os de maneira objetiva, através das ferramentas estatísticas da análise de variância e análise de regressão.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões .

2

ATAQUE DE SULFATOS NO CIMENTO PORTLAND

Entre os muitos agentes deletérios ao concreto está o sulfato. Podendo ser encontrado no solo, no mar, no ar e em lençóis freáticos, ele é caracterizado como um dos mais deteriorantes agentes das estruturas de concreto.

Essencialmente, são dois os meios conhecidos de ataque por sulfato ao concreto: (1) reação com os produtos de hidratação da alumina e/ou aluminato tricálcico não hidratado, produzindo etringita e (2) reação com o hidróxido de cálcio produzindo gesso. No concreto endurecido, a formação da etringita resultante do ataque de sulfato pode, mas nem sempre leva à expansão. Em virtude da baixa resistência à tração do concreto, deformações provenientes da expansão resultantes da formação de etringita, durante o ataque de sulfato, pode levar à fissuração e conseqüente redução da resistência e desempenho da peça.

A intensidade do ataque varia com o íon cátion que está ligado ao radical SO_4^{-2} e embora os sulfatos mais solúveis sejam os de sódio (Na_2SO_4) e magnésio (MgSO_4), a ordem crescente de agressividade começa com o sulfato de cálcio (CaSO_4), passando pelos sulfatos supracitados respectivamente, terminando com o sulfato de amônia (NH_4SO_4). Todavia, o ataque por MgSO_4 revela uma certa particularidade, pois se divide em um primeiro instante, na formação de gesso e hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) à medida que consome o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e num segundo

instante reage com a fase de silicato de cálcio hidratado, fragmentando-a em gesso, sílica pura e novamente hidróxido de magnésio, que é insolúvel. Este ataque é prejudicial ao concreto, uma vez que o sulfato de magnésio é capaz de reagir tanto com a portlandita (Ca(OH)_2), quanto com a fase do silicato de cálcio hidratado. A fase do hidróxido de cálcio é responsável pela alcalinidade do sistema, mantendo desta forma, o pH da solução dos poros do concreto variando de 11,5 a 14. Nestas intensidades, a camada passivadora do aço permanece estável protegendo a armadura. No tocante à fase do silicato de cálcio hidratado, sua importância vem do fato de estar relacionada à resistência da matriz de cimento e conseqüentemente do concreto.

Frente a tal situação, a indústria cimenteira viu-se na necessidade de produzir um cimento que apresentasse uma elevada durabilidade quando submetido a um ambiente agressivo, o cimento com adição de escória de alto forno (cimento de alto forno).

Reportando ao passado da indústria cimenteira nacional, segundo BATTAGIN (1995), nos idos de 1952 não se encontrava cimento com adições no mercado, sendo pioneira a Fábrica de Cimento Tupi que produziu naquele ano 71.765 toneladas de cimento utilizando escória proveniente da CSN, em Volta Redonda-RJ. Os pioneiros na produção de cimentos com adição foram os europeus com especial atenção para os alemães que fabricaram o primeiro cimento comercial de alto-forno em 1892.

No que se refere ao cimento com adição de cinza volante (cimento pozolânico), a primeira tiragem comercial no Brasil ocorreu em 1969, no Rio Grande do Sul, sendo as mesmas provenientes da Termelétrica de Charqueadas com uma produção de 42.510 toneladas de cimento.

BATTAGIN (1995) complementa dizendo que o processo de se adicionar filer ao calcário é mais recente e as especificações pertinentes à fabricação do cimento de alto-forno fazem menção à utilização deste material desde 1987. No entanto, as primeiras experiências industriais visando a viabilização do filer calcário no Brasil, remontam aos anos 70. A ABCP mostrou que já era praticado no país entre 1982 e 1984 o uso de

calcário em teores médios de até 3%, antes mesmo que a NBR 5732:1991 contemplasse tal tipo de adição.

A sociedade moderna absorveu de forma tão rápida e positiva os cimentos com adições que fica difícil imaginar o retorno ao passado, em escalas correspondentes, quando se utilizava o cimento Portland sem adições.

Freqüentemente, o desempenho dos cimentos com adições pode ser comparado ao do cimento Portland puro, apresentando vantagens em situações específicas. Além de uma maior resistência ao ataque de sulfato eles apresentam uma melhor estabilidade, durabilidade e impermeabilidade, menor calor de hidratação e maiores resistências à tração e à flexão que os cimentos puros. Os cimentos de alto forno, tipo CP III, e o cimento pozolânico, tipo CP IV, são recomendados para:

- grandes estruturas de concreto como barragens e pontes;
- concretos expostos a ambientes agressivos por sulfatos, terrenos salinos, etc.;
- pistas de rolamento de estradas e aeroportos;
- obras marítimas ou em regiões costeiras;
- concretos que terão contato com águas correntes puras;
- concretos com agregados reativos, levando-se em consideração as reações álcali-agregado;
- tubos e canaletas que conduzem líquidos agressivos, ou efluentes industriais;
- estações de tratamento de esgotos.

Por essa gama de aplicabilidades é que os cimentos com adições vêm sendo utilizados progressivamente em substituição ao cimento puro. Este comportamento deve-se ao trabalho de divulgação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), suas associadas e à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que vêm desmitificando eventuais preconceitos do consumidor em relação aos cimentos com adição.

Conforme Costa (1999), “a escolha dos cimentos é regida, particularmente, pelo teor de sulfato que se encontra nas águas, sejam elas paradas ou correntes, do mar ou de lençóis freáticos ou até mesmo nos solos. No caso de serem encontradas quantidades inferiores aos limites máximos estabelecidos por norma, os cimentos Portland ordinários podem ser adotados. Quando se encontrar intensidades elevadas de sulfato, o recomendável é a utilização de cimentos Portland resistentes a sulfatos e no que se refere aos cimentos, essa resistência é adquirida com um teor menor de aluminato tricálcico (C_3A). Contudo, o baixo teor de C_3A , não é o bastante para se caracterizar um cimento resistente a sulfatos. No âmbito geral, pode-se classificar os cimentos resistentes a sulfatos como os seguintes:

- cimentos ricos em escória de alto-forno;
- cimento americano ASTM Tipo V (teor máximo em C_3A igual a 5%);
- cimento supersulfatado (baixa quantidade de clínquer; escória em proporção predominante e o teor em SO_3 ultrapassa 5%).

Contudo, se for obedecida pelo menos uma das seguintes condições abaixo, alguns tipos básicos de cimento Portland (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI), poderão ser considerados resistentes aos sulfatos:

- teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico, que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Deve ser lembrado, que no primeiro e último casos, o cimento deverá atender uma das normas NBR 5732:1991, NBR 5733:1991, NBR 5735:1991, NBR 5736:1991 e NBR 11578:1991. Caso o cimento original seja o Portland de alta resistência inicial - NBR 5733:1991, poderá ser adicionada escória granulada de alto-forno ou de materiais pozolânicos, para os fins específicos da NBR 5737:1992.”

A norma NBR 5737:1992 subscreve que o cimento é considerado resistente a sulfatos quando o teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer for igual ou inferior a 8% e o teor de adições carbonáticas for igual ou inferior a 5% da massa do aglomerante total. No caso específico do cimento Portland de alto-forno (CP III), o teor de escória granulada de alto-forno deve estar entre 60% e 70% e os cimentos Portland Pozolânicos (CP IV) devem apresentar um teor de materiais pozolânicos variando entre 25% e 40%.

Adicionalmente a tais medidas é de suma importância diminuir a permeabilidade do concreto, seja por meio do tipo de cimento a ser utilizado, seja utilizando técnicas de concretagem devidamente executadas, como por exemplo, o transporte, o lançamento, o adensamento e a cura.

São inúmeros os fatores que influenciam a durabilidade do concreto quando o objetivo é resistir ao ataque de sulfatos. Estes fatores podem ser divididos em causas externas e internas ao próprio concreto. Segundo a “American Society for Testing and Materials” (ASTM), os sulfatos podem ser oriundos de minerais nos agregados, dissolvidos na água, adições e aditivos e também podem estar presentes nos cimentos. Vale ainda citar que quando se trata de causas internas, a permeabilidade da estrutura é fator determinante da difusão de íons sulfatos até o interior do concreto.

Quando o ataque for externo, os sulfatos podem ser originários de lençóis freáticos ou trazidos de solos adjacentes e levados da superfície para o interior do concreto. O desenvolvimento das reações e o mecanismo de deterioração podem variar de acordo com a situação. Quando se processa para o interior do concreto a composição da solução dos poros pode mudar e alterar a progressão das reações. Geralmente, a deterioração do concreto pelo ataque do sulfato é proveniente da decomposição química de alguns produtos de hidratação do cimento após o seu endurecimento e formação de produtos expansivos. Tais expansões provocarão tensões superficiais que poderão levar a estrutura ao colapso.

Além disso, o sulfato pode reagir com a pasta de cimento e formar produtos de pouco valor cimentício e assim deixar o concreto menos resistente. Dentre outros, o principal

produto envolvido no ataque por sulfato é o sulfoaluminato de cálcio, formado durante a hidratação do cimento e também no caso do ataque de sulfato, sendo um produto da reação deste com a portlandita e aluminato de cálcio hidratado. Dependendo do teor de sulfato presente no ataque, o sulfoaluminato de cálcio pode assumir duas formas: o monosulfoaluminato de cálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$) e o trissulfoaluminato de cálcio ou etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$), sendo esta destrutiva. No entanto, quando exposto ao ataque de sulfatos, o monosulfoaluminato de cálcio pode ser convertido em etringita, que, sendo uma molécula grande, é expansiva e em se tratando de sulfato, é seu principal produto de reação.

Entretanto, no meio científico, há controvérsias quanto à formação da deterioração do concreto. O ACI (2000) ainda afirma que o simples fato de se encontrar etringita não é evidência suficiente para se afirmar que houve um ataque de sulfato, uma vez que esta também é um produto secundário da reação de hidratação do cimento. Em contrapartida, se cristais de etringita forem encontrados em fissuras, eles podem ser os agentes ou terem apenas se desenvolvido naquele local. A etringita proveniente das reações de hidratação do cimento não é considerada destrutiva e sua origem pode determinar se é mais ou menos expansiva, embora ainda não exista uma correlação entre a quantidade formada e a sua expansão. Havendo formação por uma reação no estado sólido, a etringita será mais expansiva que aquela formada por uma solução. Embora exista mais que um tipo de etringita, ainda sim, nem todas são expansivas.

O ataque de sulfatos pode ser enquadrado em duas categorias: aquela no qual é processada a reação do sulfato com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando gesso e outra, quando o sulfato reage com o aluminato de cálcio hidratado para formar etringita. Em casos mais severos outras fases podem ser atacadas, como é o caso do silicato de cálcio hidratado após a portlandita ser exaurida. O American Concrete Institute (2000) ainda preconiza que sendo importante resistir ao ataque de sulfato, a principal consideração a ser feita em relação ao cimento é a sua quantidade de C_3A . Para exposições moderadas, o ACI (2000) recomenda cimentos do Tipo II (Cimento Portland modificado com moderado desenvolvimento do calor de hidratação), que tem um teor

máximo de aluminato tricálcico de 8% e para condições severas, o cimento recomendado é o Tipo V (resistente a sulfatos) com um máximo de 5% de C_3A .

A ASTM (1995) menciona que há outros fatores que influenciam o ataque de sulfatos, como por exemplo, a temperatura e o processo de molhagem e secagem. Além da forma química oriunda das reações provenientes do ataque de sulfatos, estes podem apresentar formas puramente físicas como a expansão do concreto, resultante da tensão provocada pela cristalização, em virtude da precipitação dos sais de sulfato, tais como os sulfatos de sódio (Na_2SO_4) e magnésio ($MgSO_4$).

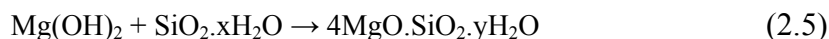
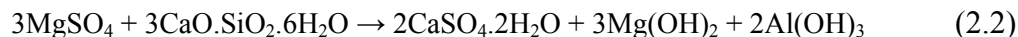
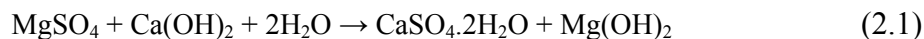
Como já mencionado, há muitos tipos de sulfatos e seus graus de agressividade são os mais variados possíveis, dependendo do íon cátion que está ligado ao radical SO_4^{-2} .

2.1 Reações do Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$)

O ataque do sulfato de magnésio é um dos mais perniciosos ao concreto, porque ocorre nas fases do silicato de cálcio hidratado e portlandita, desmembrando a fase do CSH em sílica, alumina e gesso. Um fator que faz o sulfato de magnésio ser mais agressivo ao concreto, que os de sódio e de cálcio, é o fato daquele ser quase duas vezes mais solúvel que o primeiro e trinta e cinco vezes mais que o segundo.

Segundo a ASTM (2004), o ataque em concentrações inferiores a 3,2g SO_4/L ou 4,0g $MgSO_4/L$ caracteriza-se pela formação da etringita. Concentrações de sulfato que estejam entre 3,2g SO_4/L e 6,0g SO_4/L ou 4,0g $MgSO_4/L$ a 7,5g $MgSO_4/L$ caracterizam-se pela formação de etringita e gesso e a deterioração e fissuração podem ser lentas e de difícil percepção. Em concentrações acima de 6,0g SO_4/L ou 7,5g $MgSO_4/L$, a reação caracteriza-se pela formação de hidróxido de magnésio, gesso e gel de sílica, não ocorrendo a formação de etringita e a deterioração do concreto é muito severa devido ao aumento da concentração de magnésio.

As reações que ocorrem envolvendo o sulfato de magnésio, segundo a ASTM (2004), podem ser vistas a seguir:

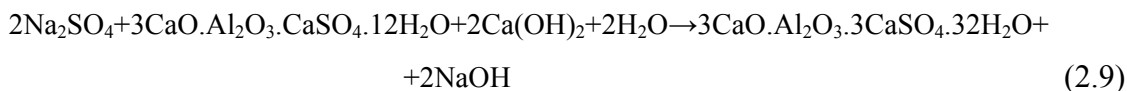
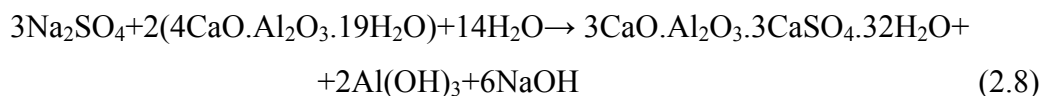
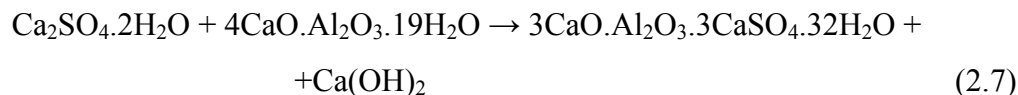
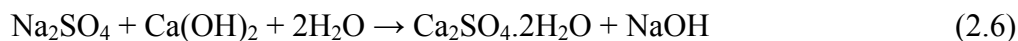


2.2 Reações do Sulfato de Sódio (Na_2SO_4)

Apresentando uma solubilidade cerca de vinte vezes maior que a do sulfato de cálcio, o Na_2SO_4 é mais agressivo, podendo estar presente em dois tipos de reações, sendo uma com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e outra com as fases do aluminato de cálcio hidratado.

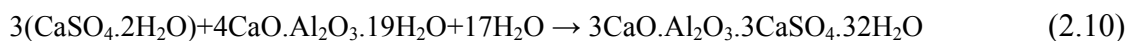
Segundo a ASTM (2004), o ataque do sulfato em concentrações inferiores a 1,0g SO_4/L caracteriza-se pela produção de etringita, com subsequente deterioração, após o ataque à fase do aluminato de cálcio hidratado.

Em elevadas concentrações, a reação é com o hidróxido de cálcio, produzindo gesso e ocasionando um aumento de volume. Todavia, ainda é inconclusivo o fato desta expansão ser ou não danosa ao concreto. As reações do sulfato de sódio podem ser vistas a seguir.



2.3 Reações do Sulfato de Cálcio (CaSO₄)

O sulfato de cálcio (CaSO₄) quando apresenta duas moléculas de água (CaSO₄.2H₂O) é conhecido comercialmente como gesso. Quando comparado aos sulfatos de magnésio e de sódio é considerado menos agressivo, uma vez que sua solubilidade na água é substancialmente inferior aos demais. A fase da pasta de cimento hidratado que reage com o CaSO₄ é a do aluminato de cálcio hidratado quando a concentração de sulfato estiver em torno de 2,0g CaSO₄/L de água. A seguir são apresentadas as reações do sulfato de cálcio com o aluminato de cálcio hidratado e o monosulfoaluminato de cálcio.



Conforme cita a ASTM (2004), geralmente a agressividade do ataque de sulfato é diretamente proporcional ao teor de aluminato tricálcico (C₃A) presente no cimento, contudo, esta não é uma regra imutável, uma vez que já foram observadas situações em que um cimento com elevada quantidade de C₃A ofereceu boa resistência ao ataque de sulfato, enquanto outro, com baixo teor de aluminato tricálcico, apresentou pouca resistência. Este fenômeno em parte pode ser explicado, pois, a fase do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) também é atacada pelo sulfato.

Uma vez atacado, o concreto apresenta uma recuperação trabalhosa; por isso é melhor prevenir para que este ataque não ocorra. Para tanto, é recomendado concreto com baixa permeabilidade; isto pode ser conseguido por meio da execução de adequadas funções quando da fabricação do concreto, como por exemplo: mistura, cura, manuseio, transporte, adensamento e principalmente a utilização de baixa relação água/cimento, como também utilizar cimentos resistentes a sulfatos e adições de pozolana, sílica ou escória.

Além de melhoramentos nos processos de fabricação do concreto, é necessário promover alterações na composição química do cimento para que a estrutura seja resistente a sulfatos, variando-se desde a quantidade de alumina, passando pelo teor de

portlandita até as adições de pozolanas e escórias. Quimicamente, pode-se aumentar a resistência do cimento ao sulfato, com os seguintes procedimentos:

1. Reduzindo-se o teor de C_3A no cimento.
2. Reduzindo a permeabilidade por adição de pozolana ou escória.
3. Limitando a quantidade de portlandita ($Ca(OH)_2$) na pasta de cimento hidratado ou convertendo-a em formas mais estáveis como o silicato de cálcio hidratado (CSH) ou carbonato de cálcio ($CaCO_3$).
4. Fazendo uso de fileres calcários.

No primeiro procedimento, não se deve limitar apenas à redução da quantidade de C_3A , pois isto levaria a um desequilíbrio químico do cimento, refletindo-se no concreto, visto que o aluminato tricálcico é o principal responsável pelo calor de hidratação do concreto e conseqüentemente do seu ganho de resistência nas primeiras horas, como é visto na TAB. 2.1 a seguir.

TABELA 2.1: Algumas propriedades dos principais componentes do cimento Portland. (COSTA,1999)

Componente	Nome	Propriedades
C_3S	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 do 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 camadas sobrejacentes do produto hidratado.
C_2S	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-C_2S - Em temperaturas por volta de $1450^\circ C$ - β-C_2S - Em temperaturas por volta de $670^\circ C$ - γ-C_2S * Mas é a forma β-C_2S 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 C_2S tem uma relação cal / sílica de 1,65.
C_3A	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_4AF	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.

Assim, é melhor adicionar óxido de ferro durante o processo de fabricação do cimento, convertendo o C_3A em C_4AF e CF . Todavia, tal conversão deve ser limitada, uma vez que as fases da ferrita hidratada são suscetíveis ao ataque do sulfato em condições severas, adverte a ASTM (2004).

No segundo procedimento para se ter um cimento e posteriormente um concreto resistente a sulfatos, é recomendada a adição de pozolana ou escória. Estes dois materiais agem aumentando a resistência do cimento ao sulfato uma vez que reagem com o $Ca(OH)_2$ para formar C-S-H. Contudo, o uso de tal processo deve ser criterioso, uma vez que a pozolana reage com o hidróxido de cálcio levando a uma queda do pH do sistema com conseqüente instabilidade da camada passivadora do aço. Mesmo que o pH não atinja valores inferiores a 11,5, como decorrência de tal reação, a redução do teor de portlandita no interior do concreto seria danosa, caso a estrutura estivesse exposta a uma atmosfera com concentração elevada de CO_2 .

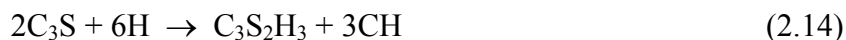
Pesquisas revelam que a profundidade de carbonatação é maior quando a quantidade de portlandita é menor. Logo, conclui-se que, a presença de cinza volante resulta numa carbonatação mais rápida. Em contrapartida, a reação da sílica da cinza volante com o hidróxido de cálcio, resulta em uma estrutura mais densa da pasta de cimento. Embora a cinza volante apresente estes dois comportamentos, é conclusiva a afirmação de que os benefícios trazidos ao concreto por este material cimentício, são maiores que seus malefícios. No caso das escórias, estas têm se mostrado efetivas quando substituem pelo menos 50% do cimento à medida que a quantidade de Al_2O_3 é reduzida no cimento.

O terceiro procedimento é possível aumentando-se o teor de C_2S e reduzindo-se o de C_3S , uma vez que o silicato bicálcico produz menos $Ca(OH)_2$ que o silicato tricálcico, como é visto nas equações a seguir.

Reação de Hidratação do C_2S



Reação de Hidratação do C₃S



Como a ASTM (2004) afirma, não há comprovação de que isto funcione e vale ressaltar o risco de uma carbonatação mais rápida como já fora mencionado. Ainda há a possibilidade de se converter a portlandita em silicato de cálcio hidratado por meio de uma reação química com formas reativas de SiO₂ ou em carbonato de cálcio (CaCO₃) por este ser mais estável. Contudo deve-se recordar que a molécula do carbonato de cálcio é maior que a da portlandita o que poderia levar a uma futura expansão do concreto, resultando na fissuração do mesmo com possível queda de resistência.

Por fim, a adição de fileres calcários pode ser benéfica, uma vez que eles reagem com o C₃S formando o carboaluminato (C₃A.CaCO₃.12H₂O).

O ACI (2000), ao criar a TAB. 2.2, apresentada a seguir, faz considerações importantes a respeito da água do mar, quando afirma que a proporção dos constituintes salinos da água do mar é distinta mas constante em todo o planeta, sendo sua concentração menor em regiões mais frias e é especialmente alta em áreas costeiras de águas rasas, onde a taxa de evaporação diária é alta. Na seqüência afirma, que fundações localizadas na orla marítima abaixo do nível do lençol freático salino, por meio da sucção por capilaridade seguida de evaporação, pode provocar no concreto, localizado acima do solo, uma saturação e cristalização, resultando em um ataque químico à pasta de cimento (sulfato) e grave corrosão do aço (cloretos).

TABELA 2.2: Requerimentos de proteção contra danos ao concreto por ataque de sulfato de fontes externas de sulfato. (ACI 201.2R-01, 2000)

Severidade de Exposição Potencial	Sulfato Solúvel em Solução Aquosa (SO ₄)	Sulfato(SO ₄) na água,ppm	a/mc em massa, Max.	Requerimentos de materiais cimentícios.
Classe 0	0,00 a 0,10	0 a 150	Nenhuma exigência especial p/ resistência a sulfato.	Nenhuma exigência especial para resistência a sulfato.
Classe 1	>0,10 e <0,20	>150 e <1500	0,50	C150 Tipo II ou equivalente
Classe 2	0,20 a <2,0	1500 a <10000	0,45	C150 Tipo V ou equivalente
Classe 3	2,0 ou maior	10000 ou maior	0,40	C150 Tipo V mais pozolana ou escória
Água do mar	-	-	*	*

E uma das novidades da norma brasileira NBR 6118:2003, que substitui a NBR 6118:1980, é a abordagem do assunto durabilidade do concreto, por exemplo, sobre a expansão do concreto por ação de águas presentes em solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos. De forma simplificada e objetiva, a TAB. 2.3 ajuda na percepção da agressividade ao concreto, inclusive avaliando as condições de exposição ao ambiente.

Ao ser atacado pelo sulfato o concreto adquire externamente uma coloração esbranquiçada, em um primeiro momento, podendo em seguida, com a formação de compostos expansivos em seu interior, apresentar fissuração externa ou/e até mesmo deslocamento, com perda de resistência à compressão.

TABELA 2.3: Classes de agressividade ambiental. (NBR 6118:2003)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

3

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE PULSO ULTRA-SÔNICO NO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.

3.1 Generalidades

A idéia de que o ensaio de ultra-sonografia é um eficiente procedimento para a determinação da integridade física e homogeneidade do concreto de cimento Portland é unânime no meio científico. Entretanto, as opiniões divergem em relação à determinação da resistência desse compósito. Alguns autores como KAUSHIK (1995), BENTUR e COHEN (1988), afirmam que muitos são os fatores que influenciam nos resultados do ensaio: tipo do agregado graúdo, tipo de cimento e a proporção da mistura. É neste contexto que surge a presente pesquisa, procurando conhecer além dos fatores acima, o ambiente agressivo no qual a estrutura está inserida e, nessas mesmas condições, o comportamento do concreto e seus constituintes.

A pesquisa limitou-se aos ambientes sulfatados, mas norteou-se na busca de agregar informações e dados que influenciam na avaliação da resistência do concreto. A partir dos resultados do programa experimental é proposto um modelo de avaliação da resistência, para concretos submetidos ao ataque de sulfatos, levando-se em

consideração uma série de fatores, entre eles a idade da peça. Além disso, o potencial de aplicação prática desse modelo pode tornar-se objeto de estudos para pesquisadores que se dedicam à durabilidade das estruturas.

O sulfato como agente deletério ao concreto pode ser encontrado no mar, no solo, no ar e ligado a diferentes cátions. Neste trabalho optou-se pela solução de sulfato como sendo o ambiente agressivo onde o concreto estaria submerso. A intensidade do ataque dos sulfatos ao concreto depende da natureza do íon cátion que está ligado a este radical (SO_4^{-2}). O sulfato de magnésio ($MgSO_4$) é um dos mais agressivos ao concreto, uma vez que reage com o hidróxido de cálcio e a fase do silicato de cálcio hidratado, o primeiro sendo responsável pela alcalinidade do sistema e o segundo pela resistência da pasta de cimento e conseqüentemente do concreto.

Sendo assim, foi necessária uma revisão bibliográfica que abrangesse ambas as áreas de conhecimento - ensaios não destrutivos e ataques de sulfato ao concreto, já contemplado no Capítulo 2. Um dos primeiros trabalhos pesquisados foi MALHOTRA e CARINO (1991), por descrever diferentes tipos de ensaios não destrutivos, como a dureza superficial, o “pullout test”, o ensaio de medição da velocidade do pulso ultrasonográfico, o método de emissão acústica e a combinação entre eles. O livro publicado por GALAN (1990), soma conceitos ao determinar algumas propriedades mecânicas do concreto.

AL-AKHRAS e AL-QADI (1998) desenvolveram uma pesquisa que investigou a viabilidade do uso das ondas ultra-sônicas para detectar as propriedades básicas do concreto de cimento Portland. O programa experimental dessa pesquisa baseou-se na variação da relação água/cimento, tipo de agregado, incorporação de ar e tempo de cura na medição da velocidade da onda ultra-sônica. Foram utilizadas as relações água/cimento de 0,35; 0,45 e 0,55; dois tipos de agregados, sendo eles quartzito e calcário e foram feitas incorporações de ar em alguns corpos-de-prova. Estes foram submetidos ao processo de cura úmida nas idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias ensaiados utilizando-se um aparelho de ultra-sonografia com transdutores de 54 kHz e 340 kHz.

Após a execução de todo o processo da pesquisa acima, os autores concluíram que a velocidade do pulso ultra-sônico a uma frequência de 340 kHz é menor que aquela obtida com uma frequência de 54 kHz, usando o método indireto, por causa do comprimento de onda relativamente pequeno dos primeiros transdutores comparado ao tamanho máximo dos agregados nas misturas de concreto de cimento Portland. As conclusões também apontam que o tipo de agregado tem um efeito significativo na propagação das ondas ultra-sônicas. A velocidade das ondas ultra-sônicas nos concretos que contêm calcário como agregado graúdo, é maior que aquela verificada nos concretos feitos com quartzito. Os autores ainda afirmam que a velocidade da onda ultra-sônica não mostrou nenhuma diferença significativa para diferentes relações a/c ou intensidades de incorporação de ar.

Outro trabalho que chama a atenção para o uso da ultra-sonografia no estudo de propriedades do concreto, é o de NILSEN e AITCIN (1992). Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 10cmx20cm, curados em água saturada com cal a uma temperatura de 20°C até a idade do ensaio. Nas datas previstas de 1, 7, 28 e 91 dias, os corpos-de-prova, após o ensaio de *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. Dois corpos-de-prova foram designados para o ensaio de módulo de elasticidade estático e três para o de resistência à compressão. O aparelho usado foi o PUNDIT e as medições foram feitas longitudinalmente ao eixo do corpo-de-prova. Neste sentido, as velocidades do pulso ultra-sônico mantiveram-se entre 4432 m/s e 5093 m/s em concretos cujas densidades variavam de 2020 kg/m³ a 3805 kg/m³. No fim, os autores concluíram ser possível relacionar os resultados do ultra-som obtidos no campo e em laboratório, na determinação do módulo de elasticidade estático. Contudo, ainda segundo os autores, não é possível determinar a resistência do concreto por meio do ensaio de ultra-sonografia.

ISMAIL, YUSOF e IBRAHIM (1996), moldaram 500 corpos-de-prova, incluindo-os em nove diferentes grupos variando a idade do ensaio, tipo e tamanho do agregado graúdo, método, tempo de cura, relação a/c e a existência de armadura. Desenvolveram um modelo matemático, para trabalhar em conjunto com o UPV e chegaram à conclusão

que o erro médio para a estimativa da resistência à compressão do concreto utilizando a combinação entre o UPV e o modelo desenvolvido por eles é de apenas 5%. Também concluíram que o principal fator de influência na medição do UPV é a quantidade de água presente no concreto.

FERREIRA e CASTRO (2000) utilizando um tipo de cimento Portland, areia natural e três agregados graúdos de tamanho máximo de 19mm, de origens distintas, fabricaram concretos que variaram sua resistência de 18 MPa a 40 MPa. Eles correlacionaram o ensaio destrutivo de resistência à compressão de corpos-de-prova com os ensaios não destrutivos de medição da onda ultra-sônica, “pulloff test” e penetração de pinos e mostraram que há influência da resistência ao esmagamento do agregado graúdo sobre as correlações dos END com o resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto.

OHDAIRA e MASUZAWA (2000) relacionaram a quantidade de água presente no concreto com a propagação da onda ultra-sônica. Para isso submergiram corpos-de-prova cilíndricos de 10cmx20cm em água por 50 dias a fim de saturá-los. Para detectar o efeito da água na leitura do ultra-som, retiraram os corpos-de-prova no tempo previsto e os secaram em uma câmara, mas ainda assim os mesmos apresentaram variação na quantidade de água entre 0% e 8%. Com transdutores cujas frequências variavam entre 20 kHz e 100 kHz os corpos-de-prova foram ensaiados e seus resultados variaram em função do teor de água. A velocidade da onda ultra-sônica variou de 3000 m/s a 4500 m/s de acordo com a quantidade de água. Sendo assim, concluíram que as mudanças na velocidade de propagação do pulso ultra-sônico e a transmissão de componentes de alta frequência são aproximadamente proporcionais à variação da quantidade de água no concreto. Logo, a determinação da quantidade de água no concreto pode ser aplicada ao END como um dos meios para obter a variação da resistência do concreto.

A publicação dos indianos KAUSHIK, JAISINGH e JAISINGH (1995) aborda o tema da durabilidade do concreto, quando corpos-de-prova foram submersos em soluções de uréia e sulfato de amônia e após um período de até 270 dias, foram submetidos a

ensaios destrutivos (Resistência à Compressão) e não-destrutivos (Medição da Velocidade do Pulso Ultra-sonográfico) objetivando-se determinar qual foi a ação deletéria causada por essas soluções. Concluíram que é difícil especificar um mínimo aceitável para a velocidade do pulso ultra-sônico para concretos aplicados a tais condições e também afirmaram que para concretos com mistura de 1:2:4 em massa, uma faixa de velocidade de 3600 m/s a 4200 m/s pode representar um bom concreto. Todavia, concretos que apresentam uma velocidade inferior a 3600 m/s precisam de investigações adicionais detalhadas.

Ainda nessa mesma linha, foram encontrados outros artigos referentes ao ataque do concreto por sulfatos. PARK et al. (1999) foram mais específicos ao pesquisarem a influência dos ataques dos sulfatos de magnésio e de sódio, contidos no solo da Coreia, na resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto convencionais e de alta resistência. Foram moldados 720 corpos-de-prova cilíndricos e distribuídos em tanques, com soluções de sulfato de magnésio, de sódio, uma mistura dos dois sulfatos e a solução padrão com apenas água, para efeito de comparação. Contudo, mesmo querendo analisar o ataque dos sulfatos ao concreto, não se realizou um ensaio acelerado, como o que foi feito pelos indianos (KAUSHIK, JAISINGH e JAISINGH, 1995) citados anteriormente. Concluíram que entre os sulfatos de sódio e de magnésio, este último tem um efeito maior na redução da resistência à compressão do concreto após 270 dias.

No caso do ataque do sulfato de sódio, corpos-de-prova de concreto de resistência normal, sem superplastificante ou sílica, apresentaram um mal desempenho, visto que houve uma tendência na redução da resistência à compressão. Os autores concluíram que isto pode ser em virtude da elevada relação a/c, propiciando uma maior permeabilidade.

Ainda neste trabalho, no caso do ataque do sulfato de magnésio, corpos-de-prova de concreto de alta resistência com superplastificante e sílica, que sofreram o ataque do sulfato de magnésio, mostraram um desempenho pior quando comparados com aqueles sem plastificante, com uma tendência de diminuição da resistência à compressão. Segundo os autores, isto revela que embora o concreto de alta resistência com adição de

sílica seja o mais eficiente contra o ataque do sulfato de sódio, sua resistência ao ataque do sulfato de magnésio diminui quando a quantidade de sílica aumenta, sendo que os corpos-de-prova que contêm no mínimo 10% de sílica têm resistência menor que aqueles com teor inferior a 10%, após 270 dias de ataque.

SHANNAG e SHAIA (2003) abordaram a questão da resistência do concreto de alto desempenho em relação a um ataque de sulfatos de sódio e de magnésio nas águas dos mares Morto e Vermelho. Este estudo também se baseia no ensaio não destrutivo da ultra-sonografia e ao contrário do estudo dos coreanos, utilizou-se corpos-de-prova cúbicos. Os autores concluíram que após um ano de imersão dos corpos-de-prova nas soluções de sulfato e nas águas dos mares, a mistura de concreto contendo uma combinação de 15% de sílica ativa e 15% de pozolana natural mostra uma proteção adequada contra o ataque de sulfato. Ainda concluíram que, concretos de alto desempenho que contenham várias combinações de sílica ativa e pozolana natural, podem apresentar um bom equilíbrio entre a resistência e a durabilidade podendo ser recomendados para uso na indústria do concreto.

Na mesma linha, MBESSA e PÊRA (2001) pesquisaram a durabilidade do concreto de alta resistência quando submetido a um ataque acelerado de sulfato de amônia com ciclos de molhagem e secagem. A pesquisa consistiu em avaliar a perda de massa, a resistência à compressão e as variações de comprimento antes e depois do ataque de sulfato. A microestrutura do concreto também foi analisada por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Suas conclusões foram modestas, sendo que apenas descrevem que a utilização da sílica diminui a permeabilidade e a porosidade do concreto, dificultando o ataque do sulfato. Todavia, uma observação importante é que não foi notada nenhuma expansão dos corpos-de-prova durante os ciclos de molhagem e secagem.

TULLIANI et al. (2002) diferentemente dos outros pesquisadores abordaram o ataque de sulfatos contidos nas águas do esgoto, em fundações prediais com idade média de 35 anos, no norte da Itália. Foram detectadas quantidades significativas de gipsita, próxima à etringita e/ou taumasita por meio das análises da difração de raios-X realizadas em

amostras de concreto em contato com o solo. No MEV viu-se grandes cristais de gipsita localizados principalmente na interface formada pela pasta de cimento e o agregado. Os efeitos da degradação aumentaram com a proximidade das estruturas de concreto de uma boca de lobo. Este local foi reconhecido como uma fonte de sulfato por causa do metabolismo de compostos de enxofre dos microorganismos presentes no esgoto. Conseqüências deste ataque foram uma fraca resistência da ligação entre a pasta de cimento e os agregados e uma severa fissuração do concreto que cobre a armadura. Os autores concluíram que houve uma grande deterioração do concreto provocada pelo ataque dos sulfatos, ocorrendo o fenômeno da expansão da etringita. Contudo, o fenômeno da expansão da etringita foi inadequado para explicar a forte deterioração do concreto e a perda de resistência e adesão da pasta de cimento primeiramente atribuído ao processo de descalcificação do C-S-H, que é responsável pela capacidade de ligação da pasta de cimento.

Continuando a análise da deterioração do concreto por ataque de sulfato, MARCHAND et al. (2002), pesquisaram o efeito de uma solução fraca de sulfato de sódio na durabilidade do concreto. Foram feitas diversas simulações objetivando-se investigar a influência de vários parâmetros tais como relação água/cimento, tipo de cimento, concentração de sulfato de sódio e o gradiente na umidade relativa do material. Os pesquisadores concluíram que os resultados numéricos indicaram que a exposição a soluções fracas de sulfato de sódio pode resultar em uma significativa reorganização da microestrutura do concreto. A penetração dos íons sulfato dentro do concreto não está somente na origem da precipitação das fases do sulfato mas também resulta na dissolução do hidróxido de cálcio e descalcificação do C-S-H. Os resultados também mostram claramente que a relação a/c, continua sendo o parâmetro chave que controla a durabilidade do concreto frente ao ataque de sulfato.

3.2 Ensaio de Ultra-sonografia no Concreto

A deterioração das estruturas de concreto é um fator preocupante quando se vive em um país em desenvolvimento com dificuldades naturais para obtenção de recursos para a construção de novos edifícios, sendo que a solução passa pela recuperação das

estruturas antigas. Neste caso, uma técnica útil é o ensaio não destrutivo da ultra-sonografia tornando possível examinar as estruturas sem causar-lhes danos.

O produto das reações químicas, proveniente dos ataques de agentes deletérios ao concreto, pode variar por causa da natureza do agente agressor; todavia, o resultado final não varia, podendo ser descoloração, fissuras, deslocamento e até mesmo destacamento do concreto acompanhados, em todos os casos, de perda de resistência.

Patologias, como a corrosão das armaduras, afetam a integridade física do concreto armado, uma vez que a armadura poderá ter um aumento de volume significativo quando comparado ao seu estado original. Esta expansão implicará em acomodações internas da peça, que levarão à formação de vazios e fissuras.

A expansão do concreto também pode ser oriunda de um ataque de sulfato, apresentando a etringita como um dos produtos formados.

Assim sendo, o ensaio não destrutivo de ultra-sonografia tem como objetivo monitorar e diagnosticar as condições físicas estruturais, almejando conservar o estado de vida útil das estruturas.

São muitas as normas que regulamentam o ensaio de ultra-sonografia. A brasileira NBR 8802:1994 faz menção ao tipo de material acoplante utilizado no ensaio, algumas definições, como onda longitudinal, velocidade de propagação e frequência ultra-sônica. Na fase de execução do ensaio, as superfícies a serem ensaiadas devem estar lisas, ou serem homogeneizadas pela aplicação de argamassa, gesso ou resina epóxi.

Os métodos de ensaio convergem em relação àqueles descritos nas principais normas estrangeiras - o direto, o semidireto e o indireto; e os resultados devem ser apresentados referentes à velocidade, que é calculada utilizando-se a Eq.(3.16).

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.16)$$

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).

Entre as normas estrangeiras, destacam-se a britânica BS 1881 (1986) pela sua riqueza de detalhes e a americana ASTM C597 – 02 (2002). A primeira corrobora a NBR 8802:1994 ao afirmar que a velocidade do pulso ultra-sônico deve ser calculada utilizando-se a Eq.(3.16), pelo fato de se homogeneizar uma superfície irregular com uma pasta de cimento, epóxi ou um plastificante e ao citar os três métodos de realização do ensaio de ultra-sonografia. Concordam também quanto ao objetivo do ensaio de ultra-sonografia, que é a determinação da integridade do concreto. Contudo, a norma britânica vai além, ao citar discriminadamente as aplicabilidades da ultra-sonografia: detecção de defeitos, grandes vazios ou cavidades no interior da peça e estimar a profundidade de uma trinca superficial ou até mesmo a espessura de uma camada de concreto com qualidade inferior. Um assunto que nem todas as normas mencionam, mas que é citado pela norma britânica, é a correlação entre a velocidade do pulso ultra-sônico e a resistência do concreto, que é afetada por uma série de fatores: idade do concreto, condições de cura e umidade, proporções da mistura e tipos de agregado e cimento. Entretanto, para se estabelecer tal correlação é necessário um número suficiente de corpos-de-prova a fim de se ter confiabilidade estatística.

A norma americana, ASTM C 597-02 (2002), a priori, afirma que não se deve utilizar os resultados da ultra-sonografia para se determinar a resistência ou o módulo de elasticidade de um determinado concreto. Contudo, em determinadas condições, pode-se estabelecer a correlação entre a resistência do concreto e a velocidade do pulso ultra-sônico em determinado número de amostras, utilizando-se essa relação como base para a determinação de sua resistência ou módulo de elasticidade.

O estudo da propagação das ondas ultra-sônicas foi, sobremaneira, acelerado durante a segunda guerra mundial simultaneamente no Canadá e na Inglaterra. Segundo

MENEGHETTI (1999), Leslie e Cheesman desenvolveram, no Canadá, um aparelho denominado cinescópio, enquanto na Inglaterra, Jones desenvolveu o ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico. No início da década de 70, surgiu o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester) e posteriormente o V-Meter Mark II. Estes aparelhos são portáteis, relativamente leves, possuem bateria própria e apresentam, em um mostrador digital, o tempo de propagação da onda ultra-sônica.

Inicialmente, o equipamento de ultra-sonografia foi desenvolvido para determinar a uniformidade no interior das estruturas e a espessura do revestimento; monitorar as mudanças internas da estrutura, detectando defeitos e anisotropia do material. Sendo assim, com a evolução simultânea das técnicas de uso do aparelho e da engenharia, começou-se a utilizar o UPV para se estimar a resistência do concreto.

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

Grupo I – Fatores Internos à Estrutura de Concreto.

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

Grupo II – Fatores externos à Estrutura de Concreto.

- Umidade superficial da estrutura.
- Vibração do meio.
- Idade dos corpos-de-prova testados.

- Meio a que a estrutura está exposta.
- Temperatura ambiente.
- Largura da peça a ser ensaiada.
- Modo de colocação dos transdutores sobre a superfície.
- Condições da superfície a ser ensaiada.

Tais fatores são importantes e devem ser levados em consideração. Contudo, aqueles que acreditam que seja possível a determinação da resistência de uma estrutura de concreto por meio do ensaio ultra-sonográfico, o fazem utilizando coeficientes de correção que levam em consideração alguns destes fatores.

3.2.1 Freqüência, Velocidade e Comprimento de Onda

3.2.1.1 Freqüência

Os diversos sons, sejam da natureza, ou produzidos pelo homem, são classificados pelas suas freqüências e medidos em ciclos por segundo, isto é, o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos. A unidade de medida que representa esse processo é denominada “Hertz”, cuja abreviatura é “Hz”. Desta forma, é correto dizer que um som de 280 Hz de freqüência gera 280 ciclos ou ondas por segundo passando em nossos ouvidos. Aqueles sons que estão abaixo de 20 Hz são denominados infra-sons e os que se situam acima dos 20000 Hz ou 20 kHz são os ultra-sons, como mostrado na FIG. 3.1.

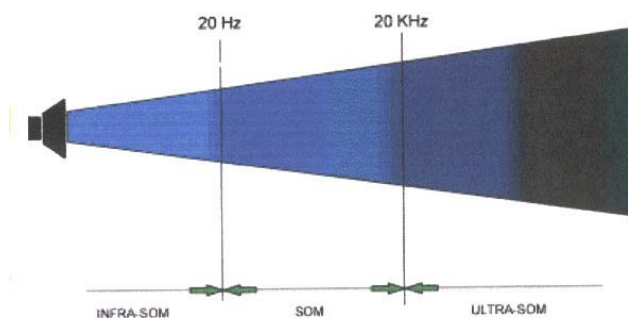


FIGURA 3.1- Campo de audibilidade das vibrações mecânicas. (ANDREUCCI, 2002)

3.2.1.2 Velocidade de Propagação

O termo “Velocidade de Propagação” pode ser definido como sendo a relação entre a distância percorrida pela onda sônica e o tempo dispendido. Vale dizer, que a velocidade de propagação é uma característica do meio e desta forma, independe da frequência.

3.2.1.3 Comprimento de Onda

Comprimento de onda é a distância entre dois pontos de máximos ou de mínimos consecutivos, medida em um mesmo instante e na direção de propagação de uma onda senoidal; e frequência é o número de ondas que passam por um observador fixo, sendo um inversamente proporcional ao outro, como pode ser visto na FIG. 3.2. O comprimento de onda, é denominado pela letra grega Lambda “ λ ”.

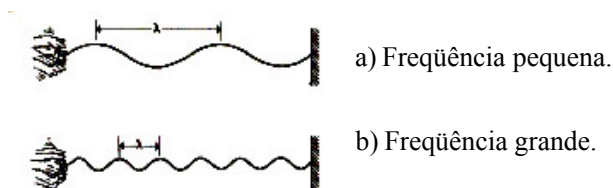


FIGURA 3.2 – Relação entre frequência e comprimento de onda.

3.2.2 Relações entre Velocidade, Comprimento de Onda e Frequência

A relação entre a velocidade “ V ”, a frequência “ f ” e o comprimento de onda “ λ ”, é dada pela Eq. (3.17):

$$V = \lambda \cdot f \quad (3.17)$$

$V - (\text{m/s}); \lambda - (\text{m}); f - (\text{s}^{-1})$

Esta relação, que serve para calcular o comprimento de onda, é de grande utilidade e de fácil aplicação, pois a velocidade da onda ultra-sônica e a frequência da fonte emissora

já são amplamente conhecidas. Logo, o comprimento de onda pode ser calculado pela equação abaixo Eq. (3.18).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (3.18)$$

Esta equação é de grande importância, pois é ela que fornece condições para se determinar o tipo de transdutor a ser empregado. Como visto anteriormente, quanto maior a frequência do transdutor emissor, menor será o comprimento de onda.

Sabe-se, da física, que a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga e que em um determinado meio, a velocidade de propagação é constante e característica. Também é sabido, que quando o som passa de um ambiente de menor massa específica para um de maior massa específica, a velocidade da onda sonora diminui e conseqüentemente, diminui também o seu comprimento de onda, uma vez que as duas grandezas são diretamente proporcionais entre si.

No caso do concreto, que é um material heterogêneo, é muito difícil considerar que a onda sonora mantenha-se em velocidade constante, visto que a interface matriz/agregado varia de região para região no interior da estrutura, inclusive produzindo regiões com mais ou menos microfissuras.

É nesse contexto que a norma britânica BS 1881 (1986) estabelece que a frequência natural dos transdutores deve estar normalmente entre 20 kHz e 150 kHz, embora frequências mais baixas, como as de 10 kHz possam ser usadas em trajetos com comprimentos muito longos. No entanto, pulsos de alta frequência (comprimento de onda pequeno) têm um começo bem definido, mas, quando eles passam através do concreto, tornam-se atenuados mais rapidamente que os pulsos de frequências menores. Isto é, transdutores emissores de alta frequência são preferidos para usos, nos quais o caminho a ser percorrido pela onda é curto e por conseguinte, aqueles de baixa frequência são os preferidos quando a trajetória da onda entre os transdutores emissor e receptor, for maior. Isso quer dizer que se a peça a ser analisada é de largura considerável, um transdutor de alta frequência não deverá ser usado, uma vez que a onda tenderá a se dissipar dentro da estrutura antes que chegue ao transdutor receptor.

Assim, para o material concreto, transdutores com frequências que variam entre 50 kHz e 60 kHz são mais apropriados na maioria dos casos.

3.2.3 Tipos de Ondas ou Pulsos

Há três tipos de ondas e cada uma ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão. Estas ondas podem ser longitudinais ou de compressão, transversais ou de cisalhamento e de superfície ou de *Rayleigh* e são produzidas por transdutores eletro-acústicos que são acoplados à superfície da estrutura.

3.2.3.1 Ondas Longitudinais ou de Compressão

São ondas cujas partículas oscilam na sua direção de propagação, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases.

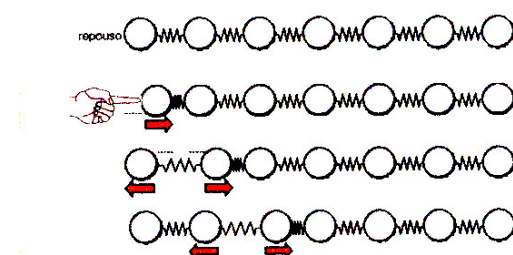


FIGURA 3.3 – Esquema representativo de ondas longitudinais. (ANDREUCCI, 2002)

Nota-se na FIG. 3.3 que quando o primeiro plano de partículas vibra, este transfere sua energia cinética para os próximos planos, que passam a oscilar. Assim, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda, isto é, direção longitudinal, gerando zonas onde haverá compressão e outras onde ocorrerá a dissipação da energia.

A distância entre duas zonas de compressão determina o comprimento de onda (λ). Segundo MENEGHETTI (1999), as ondas longitudinais ou de compressão são duas vezes mais rápidas que os outros dois tipos.

ANDREUCCI (2002) revela na TAB. 3.1 a velocidade de propagação das ondas longitudinais em diferentes meios.

TABELA 3.1– Velocidades da onda longitudinal em diferentes meios. (ANDREUCCI, 2002)

Material	Velocidade(m/s)
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inox.	5800
Nylon	2600
Óleo(SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5800
Acrílico	2700
Aço fundido	4800

3.2.3.2 Ondas Transversais ou de Cisalhamento

No caso das ondas transversais, mostradas na FIG. 3.4, ou de cisalhamento as partículas se movimentam perpendicularmente à direção de percurso da onda. Nota-se que os planos de partículas, mantêm-se equidistantes, movendo-se apenas verticalmente.

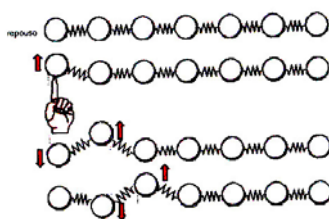


FIGURA 3.4 – Esquema representativo de ondas transversais. (ANDREUCCI, 2002)

As partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos, uma vez que as propriedades das ligações entre as partículas nos meios gasoso e líquido, praticamente impossibilitam a propagação deste tipo de onda. Na TAB.3.2 são apresentadas as velocidades de propagação das ondas transversais em alguns meios.

TABELA 3.2 – Velocidades da onda transversal em diferentes meios. (ANDREUCCI,2002)

Material	Velocidade(m/s)
Ar	-
Alumínio	3100
Cobre	2300
Ouro	1200
Aço	3200
Aço inox.	3100
Nylon	1100
Óleo (SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000
Acrílico	1100
Aço fundido	2400

3.2.3.3 Ondas Superficiais ou de Rayleigh

O seu nome vem de sua propriedade de propagar na superfície dos sólidos. Em virtude da complexidade do movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases distintas é aproximadamente 10% inferior à de uma onda transversal. Suas partículas são posicionadas elipticamente e não possuem a componente normal, propagando-se paralelamente à superfície e transversalmente em relação à direção de propagação. Sua aplicação restringe-se ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais.

Geralmente os transdutores são projetados para gerar ondas longitudinais. Contudo, durante o processo de ensaio, pode ocorrer a geração de ondas de cisalhamento ou de superfície, mas estas não chegam a influenciar no resultado final, visto que as primeiras são mais rápidas que as últimas.

No que diz respeito à velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, esta é obtida dividindo-se a distância “ l ” entre os transdutores, pelo tempo de propagação da onda Eq.(3.19).

$$V = \frac{l}{t} \quad (3.19)$$

onde :

V = velocidade em mm/ μ s

l = distância em mm

t = tempo em μ s

3.2.4 Geração de Ondas Ultra-Sônicas

3.2.4.1 Efeito Piezoelétrico

O componente emissor, que pode ser circular ou retangular, ao vibrar a uma determinada frequência, gera e introduz no material ensaiado as ondas ultra-sônicas. Esses componentes são chamados de transdutores e também podem ser designados por cabeçotes. Segundo ANDREUCCI (2002), diversos cristais apresentam o efeito piezoelétrico. Aplicando-se uma determinada pressão sobre uma placa, haverá o aparecimento de cargas elétricas em sua superfície. O efeito inverso também é verdadeiro, ou seja, se for aplicado dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezoelétrico, de modo que se possa carregar as faces eletricamente, esta placa comportar-se-á como se estivesse sobre pressão e diminuirá de espessura. O cristal piezoelétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. Este fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezoelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de 1000V, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Ao se tentar impedir esse movimento, a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal.

3.2.4.2 Tipos de Cristais

Os materiais piezoelétricos são o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o titanato zirconato (V-Meter MK II) e o metaniobato de chumbo. Para a inspeção ultra-sônica, além da potência de emissão também é importante a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura.

Os cristais supracitados são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor. Existem três tipos usuais de transdutores: reto ou normal, angular e duplo-cristal.

3.2.4.3 Transdutores Retos ou Normais

Este é o nome dado ao transdutor monocristal gerador de ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento, mostrado na FIG. 3.5.

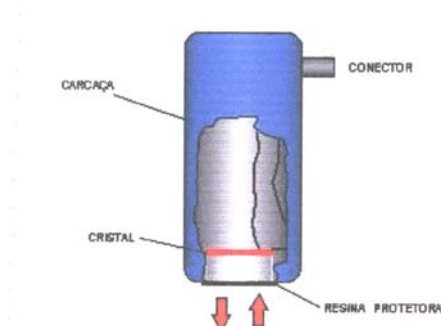


FIGURA 3.5 – Transdutor normal ou reto. (ANDREUCCI, 2002)

Segundo ANDREUCCI (2002), os transdutores normais são construídos a partir de um cristal piezoelétrico, que é colado em um bloco rígido denominado de amortecedor, com sua parte livre sendo protegida por uma membrana de borracha ou uma resina especial. Este cabeçote emite um impulso ultra-sônico que atravessa o material e reflete nas interfaces, gerando ecos. Ao voltarem ao transdutor, estes ecos geram no mesmo um sinal elétrico correspondente.

Geralmente, os transdutores normais ou retos são circulares com diâmetros que variam de 5 mm a 24 mm.

3.2.4.4 Transdutores Angulares

A diferença entre estes, mostrados na FIG. 3.6 e os transdutores retos, é o fato destes formarem um ângulo com a superfície do material. Este ângulo é obtido, inserindo uma cunha de plástico entre o cristal piezoelétrico e a superfície.

Estes cristais piezoelétricos variam suas dimensões entre 8mmx9mm até 15mmx20mm. Na prática opera-se o aparelho de ultra-som com diversos ângulos. No caso do concreto, deve-se calcular o ângulo real, sob o qual o feixe ultra-sônico penetra o material, por causa da mudança de velocidade do meio. Este procedimento deve-se ao fato de que o ângulo nominal é válido somente para ensaios realizados em peças de aço.

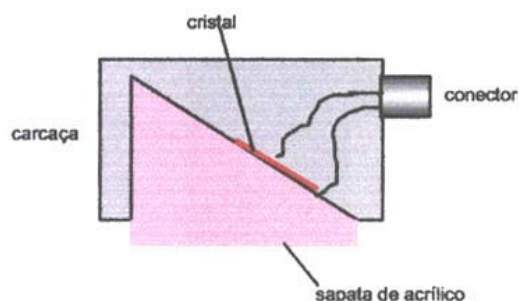


FIGURA 3.6 – Transdutor angular. (ANDREUCCI, 2002)

3.2.4.5 Transdutores Duplo-Cristal

Este tipo de transdutor, mostrado na FIG. 3.7, é útil quando o objetivo é inspecionar ou medir materiais com espessura reduzida ou quando se deseja detectar descontinuidades logo abaixo da superfície do material. Neste caso, a “zona morta” existente na tela do aparelho impede uma resposta clara, pelo fato do cristal piezoelétrico receber uma resposta num espaço curto de tempo após a emissão do pulso ultra-sônico, não tendo suas vibrações amortecidas suficientemente. Uma vez que o transdutor de duplo-cristal

é capaz de separar a emissão da recepção, torna-se mais apropriado para as situações supracitadas.

Conforme ANDREUCCI (2002), estes transdutores possuem dois cristais que são incorporados à mesma carcaça e separados por um material acústico isolante e levemente inclinados em relação à superfície de contato. Cada um deles funciona somente como emissor ou receptor, sendo indiferente qual deles exerce qual função.

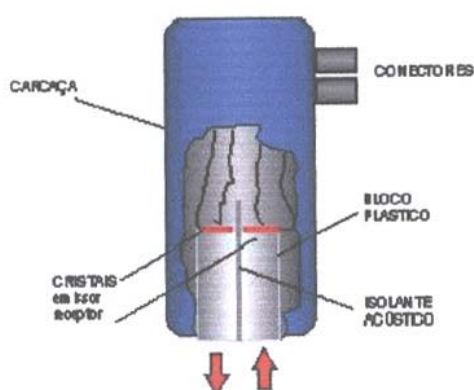


FIGURA 3.7 – Transdutor duplo-cristal. (ANDREUCCI, 2002)

3.2.5 Ultra-sonografia e Concreto

O aparato completo do equipamento de ultra-sonografia consiste em um gerador de pulsos, um par de transdutores, um amplificador e um dispositivo eletrônico de tempo para medir o tempo de trânsito do pulso ultra-sônico. As principais normas sobre o ensaio de ultra-sonografia são a alemã, a britânica BS 1881 (1986), a norte americana ASTM C597 – 02 (2002), a russa, a tcheca e a brasileira NBR 8802:1994. Todas essas normas apresentam semelhanças para a medição do tempo de trânsito do pulso longitudinal ultra-sônico no concreto.

Segundo MENEGHETTI (1999), a frequência das ondas pode variar de 20 kHz a 150 kHz, podendo ser encontrado na bibliografia normativa internacional frequências com um espectro de variação um pouco mais amplo, variando de 10 kHz a 200 kHz. Tal

variação deve-se ao fato dos transdutores de menor frequência (10 kHz a 40 kHz) serem recomendados para comprimentos longos e os de 60 kHz a 200 kHz para curtos. Todavia, os transdutores que variam de 40 kHz a 60 kHz são aqueles utilizados na maioria dos casos, especialmente o de 54 kHz.

O comprimento mencionado não se refere à distância entre os transdutores e sim à largura da peça a ser ensaiada. Coincidentemente, se for possível ter acesso a ambas as faces da estrutura, como no caso de uma viga ou pilar, a largura da peça será a mesma que a distância entre os transdutores (FIG.3.8a), mas isto nem sempre ocorre, como pode ser visto nos casos das (FIG.3.8b) e (FIG.3.8c). Nesta figura são mostradas as três situações possíveis de colocação dos transdutores em uma estrutura.

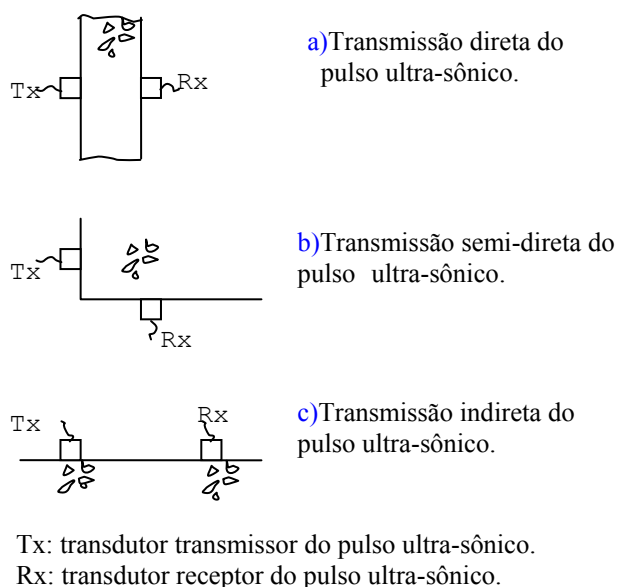


FIGURA 3.8 – Métodos de propagação dos pulsos ultra-sônicos .

O método mais preciso é o de transmissão direta, mostrado na FIG. 3.8a, pois o pulso longitudinal que sai do transdutor transmissor propaga-se principalmente na direção normal à face do transdutor receptor.

O arranjo indireto ou de superfície (FIG. 3.8c) é possível porque o feixe ultra-sônico de energia espalha-se dentro do material testado, mas neste caso a força do pulso detectado é somente 1% ou 2% daquela verificada no de transmissão direta, para o mesmo

comprimento percorrido. Neste caso, a localização do transdutor transmissor é fixada e a do receptor é aumentada de forma gradativa e linear à medida que as leituras são realizadas. Considerando um gráfico, a distância entre os dois transdutores é marcada no eixo das abscissas e o tempo de trânsito do pulso ultra-sônico no eixo das ordenadas. A inclinação do segmento de reta é a velocidade do pulso superficial ao longo da linha percorrida pelos transdutores, como mostrado na FIG. 3.9. Outra desvantagem, que o método de superfície apresenta, é que o pulso se propaga na camada de concreto próxima à superfície. Este concreto é, algumas vezes, de composição ligeiramente diferente daquele das camadas inferiores. Por exemplo, o concreto próximo à superfície de uma laje tem mais quantidade de material fino do que aquele das camadas inferiores. Esta desvantagem, entretanto, pode se converter em um uso muito significativo para detectar e estimar a espessura de uma camada de material com qualidade diferente. Uma camada de concreto com qualidade inferior pode ocorrer em face a práticas impróprias de construção, como por exemplo uma vibração com pouca energia no ato da concretagem, lançamento incorreto, etc., danos em virtude da ação do tempo (congelamento, ataque de sulfatos, corrosão das armaduras, etc.), danos pela ação do fogo e terremotos.

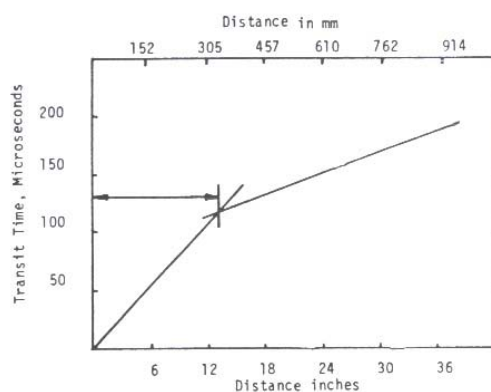


FIGURA 3.9 – Determinação da profundidade de deterioração para o método indireto. (MALHOTRA, 1991)

Contudo, há situações em que não é possível posicionar os transdutores diretamente, como é visto na FIG. 3.8a, nem mesmo colocá-los no mesmo plano, como no caso da transmissão indireta da FIG. 3.8c. Nestas situações, a solução seria colocá-los perpendicularmente um ao outro, como mostrado na FIG.3.8b. Mas deve-se ter cuidado

especial para que o pulso transmitido não seja atenuado impossibilitando a sua recepção.

3.2.5.1 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico e Coeficiente de Poisson

Um dos usos mais diretos do método de velocidade do pulso ultra-sônico, está na determinação do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson do concreto. Usando a Eq.(3.20), Leslie et al., citados por MALHOTRA (1991), publicaram detalhados resultados de testes. O coeficiente de Poisson do concreto situa-se na faixa de 0,15 a 0,25 para a maioria dos concretos. No caso da determinação do módulo de elasticidade dinâmico, assumindo-se um valor médio para o coeficiente de Poisson, o erro permanecerá na casa de 10% ou menos.

$$V = \left(\frac{KE_d}{D} \right)^{1/2} \quad (3.20)$$

$$E_d = \frac{V^2 D}{K}$$

onde :

V = velocidade da onda de compressão.(m/s)

$$K = \frac{(1 - \nu) \cdot g}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \text{ (m/s}^2\text{)}$$

E = Módulo de Elasticidade Dinâmico.(kN/m²)

D = Peso unitário.(kN/m³)

g = Aceleração devido à gravidade.(m/s²)

ν = Coeficiente de Poisson.

3.2.5.2 Estimativa da Resistência do Concreto

O método de velocidade do pulso-ultrasônico fornece meios convenientes para a estimativa da resistência à compressão medidas em corpos-de-prova e em estruturas. A resistência pode ser estimada a partir da velocidade do pulso ultra-sonográfico por uma correlação gráfica pré-estabelecida entre os dois parâmetros, como a mostrada na FIG. 3.10.

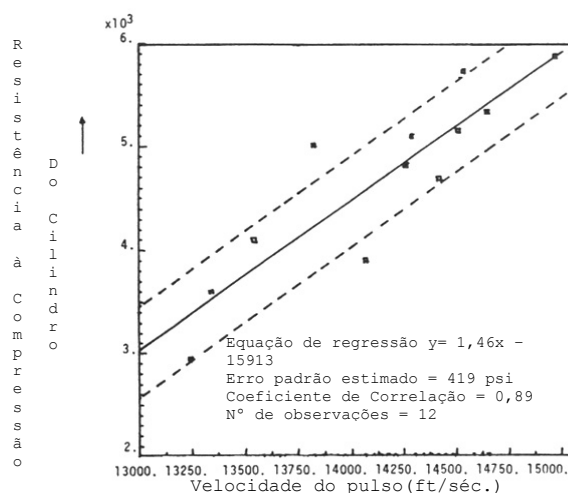


FIGURA 3.10 – Relação velocidade x resistência à compressão estimada do concreto. (MALHOTRA, 1991)

A relação entre a resistência e a velocidade do pulso não é única, mas é afetada por muitos fatores, tais como, tamanho, tipo e quantidade do agregado, tipo e quantidade de cimento, relação a/c, umidade, etc.. O RILEM (1993) e a norma britânica BS 1881 (1986) fornecem práticas recomendadas à realidade britânica, para desenvolver as relações pré-estabelecidas entre a velocidade do pulso e a resistência à compressão, que posteriormente podem ser usadas para estimar no campo a resistência baseada na velocidade do pulso ultra-sônico.

3.2.5.3 Determinação da Homogeneidade do Concreto

O método de velocidade do pulso ultra-sônico é muito usado para determinar a homogeneidade do concreto e a posteriori garantir relativamente a qualidade do mesmo. As heterogeneidades em uma viga de concreto causarão variações na velocidade do

pulso. A resistência do concreto varia em uma estrutura por causa das variações no material, fornecimento, mistura e por uma inadequada ou variada compactação. O método de velocidade do pulso ultra-sônico é efetivo no estabelecimento de dados comparativos e para a avaliação qualitativa do concreto. Para a obtenção desses dados qualitativos, deve-se fazer um sistema de distribuição de pontos em forma de malha, sobre a estrutura. Dependendo da quantidade de concreto a ser analisado, o tamanho da estrutura, a variabilidade esperada e a precisão requerida, deve-se fazer uma malha de no mínimo 30cm de espaçamento. Outras aplicações desta comparação qualitativa são a verificação da densidade do concreto e a localização de áreas de concreto poroso.

3.2.5.4 Estudos da Hidratação do Cimento

O método de velocidade do pulso tem a vantagem de ser verdadeiramente não destrutivo e além disso as mudanças internas da estrutura de concreto podem ser monitoradas. Muitos pesquisadores têm estudado o processo de endurecimento da pasta de cimento, argamassa e concreto. Um uso prático muito significativo do método é o cálculo da velocidade de endurecimento, inicial ou final, para diferentes tipos de cimentos ou aditivos a serem usados para um dado projeto.

3.2.5.5 Estudos da Durabilidade do Concreto

Ambientes agressivos provocam danos à estrutura e conseqüentemente diminuem a velocidade do pulso. Deteriorações causadas pela ação do gelo e degelo, exposição a sulfatos, corrosão das armaduras, ataque pelo fogo e outros tipos de agressividades podem ser facilmente detectados pelo método de velocidade do pulso ultra-sônico e têm sido estudados por muitos pesquisadores. Essa deterioração, seja no campo, ou no laboratório, pode ser estudada ensaiando-se várias vezes a mesma estrutura.

3.2.5.6 Medição e Detecção de Fissuras

Como é sabido, o pulso ultra-sônico transmite uma quantidade pequena de energia através do ar. Portanto, se um pulso que esteja propagando pelo concreto encontra uma fissura cheia de ar ou um vazio, cuja área perpendicular projetada ao seu trajeto seja maior que a área de transmissão do transdutor, o pulso ultra-sônico será difratado contornando o defeito. Assim, o tempo de propagação do pulso ultra-sônico será maior do que aquele através de um concreto similar sem qualquer defeito. O método de medição da velocidade do pulso ultra-sônico é efetivo para localizar fissuras, cavidades e outros defeitos dessa natureza. Contudo, essa técnica de detecção de vazios e fissuras tem restrições, pois, se a fissura ou vazio encontrar-se preenchida por água ou detritos, o pulso ultra-sônico não terá uma diminuição acentuada em sua velocidade, fazendo com que, neste caso, o vazio não seja convenientemente detectado.

A profundidade de uma fissura superficial cheia de ar pode ser estimada pelo método da velocidade do pulso ultra-sônico, como pode ser visto na FIG. 3.11. A profundidade “h”, é dada pela Eq.(3.21).

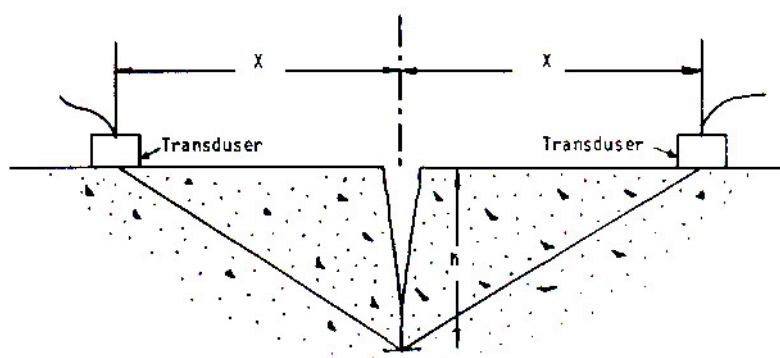


FIGURA 3.11 – Medição da profundidade da fissura. (MALHOTRA, 1991)

$$h = \left(\frac{x}{T_2} \right) (T_1^2 - T_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

Onde:

x = distância do transdutor à fissura(note que ambos os transdutores devem estar equidistantes da fissura).

T_1 = tempo de transmissão em torno da fissura.

T_2 = tempo de transmissão ao longo da superfície de concreto do mesmo tipo sem qualquer fissura(note que o comprimento superficial para T_1 T_2 deve ser igual).

Deve-se ressaltar, que para a Eq.(3.21) ser válida, a fissura deve ser perpendicular à superfície do concreto. Para isso, deve-se verificar anteriormente se a fissura é perpendicular ou não à superfície da estrutura. Isso pode ser feito obtendo-se o tempo de transmissão com ambos os transdutores equidistantes da fissura. Movendo-se os transdutores alternadamente, para longe da fissura e o tempo decrescendo indicará que a fissura inclina-se na direção do transdutor que foi movido.

3.3 Aparelhos para Ultra-sonografia

3.3.1 PUNDIT 6

O Pundit (*“Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester”*) fabricado pela CNS Electronics é um aparelho digital, leve, portátil, que usa uma bateria de cádmio niquelada, com uma autonomia de operação de 5 horas, tornando-o um instrumento de pouco consumo energético e de extrema praticidade. O equipamento, mostrado na FIG. 3.12 é constituído de:

- circuito gerador-receptor;
- transdutor – emissor;
- transdutor – receptor;
- circuito medidor de tempo;
- cabos coaxiais;
- barra de referência.



FIGURA 3.12: Aparelho de Ultra-sonografia PUNDIT.

3.3.1.1 Procedimento de Ensaio

O procedimento para a execução do ensaio usando o Pundit vem descrito a seguir:

- verificar se o aparelho está apto para ser ligado em 110V ou 220V;
- conectar o aparelho na tomada correspondente;
- conectar os cabos dos transdutores nas saídas rec. (receptor) e trans. (transmissor), com o aparelho desligado;
- conectar os transdutores aos cabos;
- passar glicerina ou graxa comum nas superfícies dos transdutores de forma que estas sejam preenchidas por completo;
- ligar o aparelho;
- calibrar o aparelho utilizando a barra de referência;
- posicionar os transdutores na superfície a ser analisada conforme os métodos de execução (direto, indireto e semidireto) já citados.

3.3.2 V-Meter Mark II

O V-Meter Mark II, mostrado na FIG.3.13, é fabricado pela James Instruments Inc. Non Destructive Testing Systems oferecendo, além das vantagens do PUNDIT 6, outras no processo executivo.



FIGURA 3.13 – Aparelho de ultra-sonografia V-Meter Mark II

3.3.2.1 Procedimento de Ensaio

O procedimento de ensaio utilizando-se o aparelho de ultra-sonografia da James Instruments é semelhante ao PUNDIT, com ressalva do material acoplante que, para este caso, é recomendado o uso de uma pasta de silicone da marca Dow Corning modelo 111R ou similar e não há necessidade da calibração do aparelho, uma vez que ele é auto-calibrável.

3.4 Comparação entre o PUNDIT 6 e o V-Meter Mark II

Do ponto de vista prático, ambos são portáteis e de uso simples. Utilizam transdutores de mesma frequência, embora não seja recomendada a troca dos transdutores entre os aparelhos. O aparelho V-Meter Mark II apresenta duas vantagens e uma desvantagem em relação ao aparelho PUNDIT. A desvantagem é que no caso do PUNDIT, é permitida e difundida a utilização de graxa comum, menos onerosa, como material acoplante na execução do ensaio. Entretanto, as vantagens do V-Meter Mark II são o peso mais leve e por ser auto-calibrável, o ensaio é agilizado e fornece resultados mais confiáveis.

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

As etapas de produção, armazenagem e ensaios dos corpos-de-prova de concreto tiveram suas seqüências e procedimentos planejados, de forma que houvesse uma correlação e interatividade dos resultados, levando a conclusões mais precisas e completas. A correlação e a interatividade dos resultados são evidenciadas no capítulo seguinte e a metodologia utilizada no programa experimental é apresentada a seguir.

4.1.1 Determinação do Número de Corpos-de-Prova

A determinação do número total de corpos-de-prova que foram moldados dependia de algumas definições como o número de fatores variantes, a quantidade de níveis que teriam, os ensaios que seriam feitos e o número de corpos-de-prova para cada ensaio.

O número de fatores variantes foi definido em cinco, sendo eles: o tipo de cimento, o tipo de agregado, a concentração da solução de sulfato de magnésio, a idade dos ensaios e a resistência à compressão.

Mas para a determinação do total de corpos-de-prova que foram moldados seria necessário definir a quantidade de níveis de cada fator. Aliando a necessidade do trabalho ser realizado em tempo hábil com um número suficiente de variantes para uma melhor abrangência dos resultados, optou-se por três níveis para cada fator. Utilizando-se a ferramenta estatística “planejamentos fatoriais com três níveis (3^k)” (ESPINOSA, 2001), sendo k o número de fatores, chegou-se ao número de 243 corpos-de-prova. Este número ainda não seria o definitivo, uma vez que não haviam sido definidos os ensaios a serem executados.

Enfocando o estudo das propriedades mecânicas do concreto, optou-se pelos ensaios de resistência à compressão uniaxial, determinação da velocidade do pulso ultra-sônico, módulos de elasticidade dinâmico e estático e permeabilidade. Uma vez que os ensaios de resistência à compressão normal, módulo de elasticidade estático e permeabilidade são de natureza destrutiva, seria necessário a moldagem de 3 grupos de corpos-de-prova distintos, porém idênticos, para a execução de todos os ensaios.

Entretanto, ainda tinha que ser determinado o número de corpos-de-prova para cada ensaio. Inicialmente pensou-se em seis; mas a preocupação com o número final de corpos-de-prova era para que o mesmo não fosse superior a 1000. Sendo assim, após estudos preliminares, envolvendo pesquisa bibliográfica e outras consultas, determinou-se que quatro corpos-de-prova seriam suficientes, alcançando o total de 972.

A técnica do quadrado latino (PAPADAKIS, VENUAT, 1966) foi utilizada para determinar as possíveis combinações a serem utilizadas, de tal forma a se obter uma melhor confiabilidade estatística.

Durante a fase de produção do concreto e moldagem dos corpos-de-prova, optou-se por concretos com duas resistências, não considerando a resistência intermediária (35 MPa), visto que o acréscimo no número de corpos-de-prova seria substancialmente elevado e com pouco retorno no que diz respeito à riqueza de informações. Sendo assim, o número total foi determinado em 648 corpos-de-prova.

4.1.2 Propriedades dos Materiais

4.1.2.1 Agregado Miúdo

A areia utilizada neste trabalho foi de textura grossa e oriunda de Lagoa da Prata/MG. Antes da fabricação dos corpos-de-prova foram realizados ensaios de:

- Análise granulométrica (NBR NM 248:2001);
- determinação da massa específica real (NBR NM 52:2003);
- determinação do teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46:2003);
- determinação do teor de torrões de argila (NBR 7218:1987);
- determinação de impurezas orgânicas (NBR NM 49:2001).

A análise granulométrica determinou o módulo de finura da areia que foi de 2,27, sendo seu diâmetro máximo característico de 2,4mm e uma boa granulometria, isto é, apresentou uma distribuição razoável nas peneiras normais. A massa específica real determinada foi de 2,53 g/cm³. O teor de material pulverulento foi satisfatório (3,15%), uma vez que a NBR NM 46:2003, prevê um limite máximo de 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para os demais concretos. Os resultados dos ensaios de determinação de torrões de argila e impurezas orgânicas também apresentaram resultados conformes.

4.1.2.2 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos escolhidos para este trabalho, foram aqueles de maior utilização no Estado de Minas Gerais; sendo eles:

- Brita 1 calcário calcítico.
- Brita 1 calcário dolomítico.
- Brita 1 gnaisse.

A escolha de tal granulometria se deu porque as concreteiras não utilizam na fabricação do concreto, britas com diâmetros superiores a 19,0mm; alegam que o mangote através do qual é bombeado o concreto, não é dimensionado para diâmetros superiores a este. Os ensaios realizados nos agregados graúdos foram:

- análise granulométrica (NBR NM 248:2001);
- determinação do teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46:2003);
- determinação da massa específica aparente (NBR 7251:1982);
- determinação da massa específica real (NBR NM 52:2003);
- determinação da massa unitária do agregado graúdo em estado compacto seco (NBR 7810:1983).

As análises granulométricas foram satisfatórias revelando uma boa distribuição do material nas peneiras normais. Os módulos de finura (MF) dos agregados graúdos, calcário calcítico, calcário dolomítico e gnaisse foram respectivamente 7,04; 7,27 e 6,98 tendo um diâmetro máximo comum de 25mm.

O ensaio de determinação do teor de material pulverulento (MP) foi satisfatório para as três britas, sendo que os resultados foram 0,49% para o calcário calcítico, 0,16% para o calcário dolomítico e 0,28% para o gnaisse. A norma NBR 7219:2003 prevê que para agregados graúdos o limite máximo de material pulverulento seja de 1%.

O ensaio de determinação da massa específica aparente mostrou que a mesma variou pouco entre os três tipos de agregado; sendo 1,42 g/cm³ para o calcário calcítico, 1,41 g/cm³ para o gnaisse e 1,47 g/cm³ para o calcário dolomítico.

O ensaio de determinação da massa específica real, através do frasco de Chapman, indicou os valores de 2,65 g/cm³ para o gnaisse e o calcário calcítico e 2,82 g/cm³ para o calcário dolomítico.

As massas específicas dos agregados graúdos obtidas segundo os procedimentos da NBR 7810:1983 foram, em média, $1,66 \text{ g/cm}^3$ para o calcário calcítico, $1,70 \text{ g/cm}^3$ para o calcário dolomítico e $1,59 \text{ g/cm}^3$ para o gnaisse.

4.1.2.3 Cimentos

Os cimentos utilizados - CP II E 32 Ciminas e CP III 32 RS Barroso foram fornecidos pela Ciminas Holcim e o CP IV 32 Montes Claros pela empresa Êxito Construtora e Incorporadora Ltda. Os fabricantes forneceram as finuras Blaine dos respectivos materiais, sendo:

- finura Blaine do cimento CP II E 32 Ciminas: $3685 \text{ cm}^2/\text{g}$;
- finura Blaine do cimento CP III 32 RS Barroso: $3832 \text{ cm}^2/\text{g}$;
- finura Blaine do cimento CP IV 32 Montes Claros: $4260 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Os sacos de cimento foram armazenados em um recinto fechado, livre de qualquer tipo de intempérie e empilhados sobre um estrado, a 10cm do piso.

4.1.2.4 Solução

O sulfato escolhido foi o sulfato de magnésio, por sua agressividade ao concreto. Segundo o ACI 201.2R-01 (2000), a classe 2 de exposição ou severa, é quando há uma concentração de sulfato (SO_4^{-2}) dissolvido em água entre 1500 ppm (1,5 g/L) e 10000 ppm (10 g/L) e a classe 3 ou muito severa, é quando essa concentração está acima de 10000 ppm. Desta forma, as concentrações escolhidas foram de 10 g/L e 50 g/L, sendo que esta última objetivava acelerar o ataque do sulfato ao concreto.

No entanto, antes do início dos trabalhos foi imperativo determinar se as soluções atacariam as caixas d'água de polietileno que seriam utilizadas. Para isso, foram colocadas duas peças de polietileno dentro de dois béqueres, com concentrações de 10 g/L e 50 g/L de sulfato de magnésio. Estes béqueres permaneceram em repouso por

sete dias, sendo que ao final deste tempo, constatou-se que as peças não sofreram ataque algum, viabilizando o início das atividades.

O sulfato de magnésio foi pesado e misturado com água dentro das caixas, até a formação da solução de sulfato de magnésio. Externamente em cada reservatório, foi colada uma etiqueta indicando a sua concentração.

4.1.2.5 Concreto

A princípio, o traço do concreto foi calculado utilizando-se o método do INT (Instituto Nacional de Tecnologia), mas estes seriam de difícil execução, pois os resultados apontavam para uma mistura muito forte. Assim, optou-se pelo método de tentativa e erro baseando-se em experiências passadas. Para o traço de 20 MPa, obteve-se tal valor logo na primeira tentativa; entretanto, para a mistura de 50 MPa, foram necessárias algumas tentativas, até que se optou por adicionar sílica ativa na proporção de 10% do total de material cimentício. Ambas as misturas utilizaram o aditivo plastificante MBT Mastermix 322 NT, objetivando-se melhor trabalhabilidade do concreto. Desta forma, foi possível conseguir um concreto de 50 MPa utilizando-se um cimento de 32 MPa. Os abatimentos dos concretos de 50 MPa apresentaram uma média de 2,14 cm, diferentemente daqueles de 20MPa que acusaram 8,04 cm de média. As misturas utilizadas neste trabalho estão no ANEXO B.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram deixados em repouso por 24 horas e então desmoldados, identificados e convenientemente armazenados em suas respectivas caixas d'água, durante o tempo previsto.

Foram feitos três grupos de quatro corpos-de-prova, totalizando 12 para cada mistura, uma vez que alguns ensaios eram destrutivos (por exemplo: a resistência à compressão) e outros não, sendo que cada grupo era colocado na mesma solução, durante o mesmo tempo.

4.1.2.6 Caixas D'água

Os corpos-de-prova foram armazenados em 6 caixas d'água de 1000 litros, instaladas em local amplo e apropriado. A quantidade de caixas d'água foi calculada previamente para que todos os corpos-de-prova pudessem ser espaçadamente acomodados não havendo necessidade de serem colocados uns sobre os outros. Para se evitar o aparecimento de fissuras e concentrações de tensões indesejadas nos fundos das caixas, durante o uso, optou-se por colocá-las sobre uma superfície limpa e homogênea. Para isso, criou-se uma camada de areia lavada e peneirada, de aproximadamente 2 cm de altura, no chão do local de armazenamento.

Das 6 caixas, duas foram destinadas à solução de 10 g/L (S10), duas à solução de 50 g/L (S50) e as duas últimas à solução de 0 g/L (S0), isto é, apenas água.

A alternância dos ciclos de molhagem e secagem dos corpos-de-prova, em pouco tempo sujou as soluções das caixas d'água. Visto que tal poluição poderia afetar as concentrações das soluções, duas caixas d'água, sendo uma de concentração 10g/L e a outra de 50 g/L, foram lavadas e tiveram suas soluções convenientemente pesadas e misturadas novamente. A partir disto a secagem passou a ser feita sobre o piso do laboratório convenientemente protegido.

4.1.2.7 Vidraria

Faz parte deste item todo o instrumental utilizado nas análises químicas e nos ensaios de determinação das propriedades dos agregados graúdo e miúdo do concreto, sendo:

- 28 Béqueres de 400ml;
- 1 frasco de Chapman;
- 4 frascos Erlenmeyer;
- 10 vidros de relógio;
- 4 funis de vidro;
- 1 bastão de vidro;

- 10 cadinhos de porcelana;
- 38 caixas de filtro faixa azul.

4.1.2.8 Substâncias Químicas

Foram adquiridos 188 kg de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) para a preparação das soluções, onde seriam submersos os corpos-de-prova de concreto e 3 kg de cloreto de bário utilizados nas análises químicas para a determinação do teor de sulfato no interior dos corpos-de-prova.

4.1.2.9 Moldes para Fabricação de Corpos-de-Prova

Tendo em vista o grande número de corpos-de-prova que foram feitos, adquiriu-se 44 moldes cilíndricos para concreto de dimensões 10cmx20cm.

Todos os materiais utilizados estão apresentados no ANEXO A.

4.1.3 Ensaio

Moldados os corpos-de-prova, estes eram deixados em repouso dentro de seus moldes metálicos por 24 horas. Após este tempo, foram desmoldados, identificados e transportados para as caixas d'água com as respectivas soluções. Todos os aparelhos utilizados nos ensaios estão apresentados no ANEXO B.

O processo de molhagem e secagem consistiu em deixar os corpos-de-prova submersos na solução indicada por 1 dia e fora dela por 3 dias. O objetivo de tal procedimento foi promover a aceleração do ataque do sulfato de magnésio ao concreto.

Na data prevista dos ensaios, os corpos-de-prova foram retirados das caixas d'água e estipulado um período de aproximadamente duas horas para a secagem. Sendo insuficiente, aumentava-se o tempo de espera. Secos, os corpos-de-prova passavam pelos seguintes ensaios:

4.1.3.1 Ultra-sonografia

Os procedimentos adotados para este ensaio seguem o descrito nos itens 3.3.1.1 e 3.3.2.1 para os aparelhos PUNDIT e V-Meter Mark II respectivamente, sendo o tempo de transmissão da onda ultra-sônica medido em três pontos dos corpos-de-prova, como mostrado na FIG. 4.1.

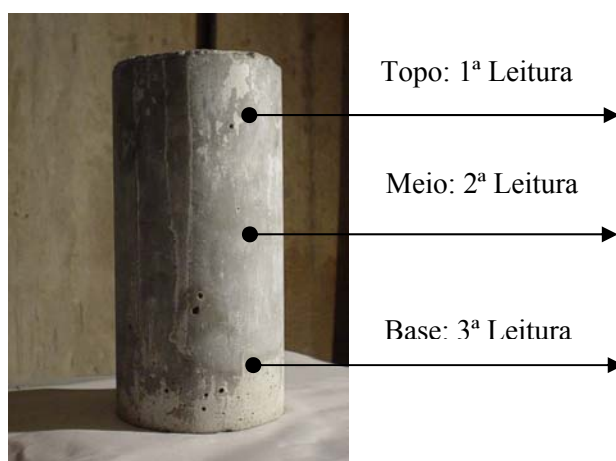


FIGURA 4.1 – Posicionamento das Leituras da Onda Ultra-sônica nos CPs.

O ensaio foi realizado em ambiente livre de vibrações; as superfícies dos corpos-de-prova foram limpas e os transdutores colocados diametralmente opostos, um de frente para o outro. Durante o ensaio, na necessidade de se repetir alguns pontos, limpava-se a área, procurando deixá-la o mais seca possível de forma que a umidade deixada pelo material acoplante interferisse o mínimo possível na próxima leitura.

Iniciava-se a seqüência de ensaios com o aparelho V-Meter Mark II. Após o ensaio suas superfícies eram limpas e passava-se para o aparelho PUNDIT.

4.1.3.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Logo após o ensaio de ultra-sonografia realizava-se o ensaio de determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico.

Este ensaio foi realizado no aparelho Erudite MKII Resonant Frequency Test System do fabricante C.N.S. Electronics e tem como princípio a medição da frequência ressonante longitudinal que atravessa o corpo-de-prova de concreto. Este é colocado horizontalmente sobre uma haste metálica, emitindo-se ondas ultra-sônicas em uma de suas extremidades e determinando suas frequências por um sensor do outro lado. O valor lido é dado em Hz, que em conjunto com a massa e as dimensões do corpo-de-prova é aplicado na Eq.(4.1), obtida do manual do fabricante.

$$E_d = K_1 W f_r^2 \quad \left(\text{kgf/cm}^2 \right) \quad (4.1)$$

Onde :

$$K_1 = 519,4 \times 10^{-5} \frac{L}{d^2} \text{ em seg}^2/\text{cm}^2 \text{ (para um cilindro).}$$

W = massa do corpo - de - prova em kg.

L = comprimento do corpo - de - prova em cm.

d = diâmetro do corpo - de - prova em cm.

f_r = frequência longitudinal ressonante.

No entanto, como o concreto é um material muito heterogêneo, apenas uma medição não é suficiente, sendo utilizado neste trabalho a média de dez medidas para se chegar a um valor significativo.

4.1.3.3 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado logo após o ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico capeando-se com enxofre as extremidades dos corpos-de-prova e tendo-se o cuidado de nivelá-los e identificá-los lateralmente.

4.1.3.4 Porosimetria por Mercúrio

Visto que o ensaio de resistência à compressão é destrutivo, lançou-se mão de um segundo conjunto de corpos-de-prova, sendo estes “gêmeos” daqueles. O aparelho utilizado foi o Autopore II 9220 V 3.05. Para este ensaio extraíram-se pequenos fragmentos, que foram secos em estufa a uma temperatura média de 130°C por aproximadamente 24 horas.

Antes de se retirar a amostra da estufa, pesou-se o penetrômetro vazio, montado como mostra a FIG. 4.2.

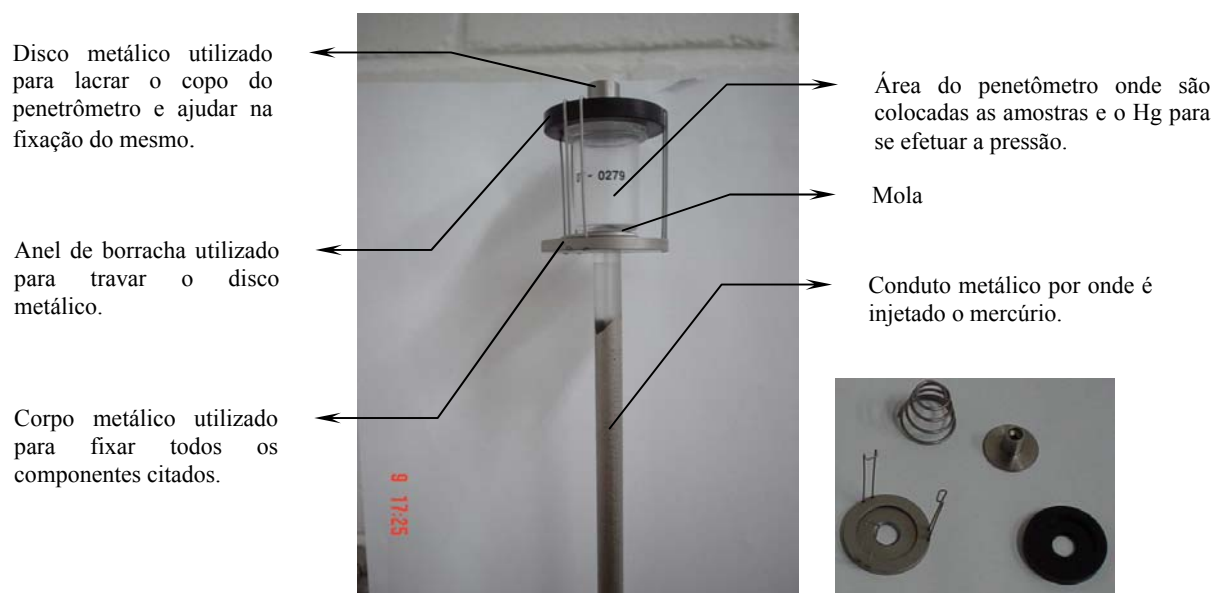


FIGURA 4.2 – Fotos de um penetrômetro e seus componentes.

Uma vez pesado o penetrômetro, tarou-se a balança (com 5 casas decimais de precisão) e pesou-se este com as amostras, para se obter o peso destas. O passo seguinte foi ligar o computador que estava acoplado ao equipamento para iniciar o ensaio e inserir o penetrômetro na câmara de baixa pressão.

O ensaio consistiu de três instantes – o primeiro quando o aparelho cria vácuo no interior do penetrômetro para aplicar sobre as amostras uma pressão de 1,5 psi a 30 psi, denominada etapa da baixa pressão. O segundo iniciou-se com a pesagem do

penetrômetro contendo as amostras e mercúrio para colocá-lo na câmara de alta pressão, onde recebeu uma pressão crescente de 30 psi a 61000 psi. O terceiro instante foi a leitura do diâmetro médio dos poros da amostra.

4.1.3.5 Análise Química

O procedimento adotado nesta pesquisa, para a determinação do teor de sulfatos no concreto, foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Química da UFMG (DEEQ) e é padrão em suas análises cotidianas.

A análise química teve como objetivo determinar quantitativamente o teor de sulfato presente nas diversas amostras de concreto. Assim, os resultados das análises indicaram se um concreto feito com um tipo de cimento e agregado apresentavam numa determinada idade uma concentração de sulfato em seu interior, maior ou menor que outros concretos feitos com cimentos e agregados graúdos diferentes.

Para a execução do ensaio de análise química que determina a concentração de sulfato presente no concreto, coletou-se 1,0000 g de amostra em pó e adicionou-se 25 mL de água destilada fria, agitando vigorosamente a solução. Após esta etapa acrescentou-se 5mL de ácido clorídrico na proporção de 1:19 e quando necessário, aquecia-se a solução e dissolvia-se o material usando bastão de vidro. Em seguida diluiu-se a solução para 50mL e a mesma foi aquecida por aproximadamente 15 minutos tomando-se o cuidado para que ela não entrasse em ebulição. Na etapa seguinte a solução passou por um filtro médio lavando o resíduo com água quente e diluindo-a no final da filtragem em 250mL, aquecendo-a até a ebulição. Simultaneamente ao aquecimento adicionou-se lentamente 10mL de BaCl_2 (100g/L) a quente, até que o precipitado estivesse bem formado. Deixou-se a solução em repouso por um tempo de 12 horas a 24 horas a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição, tomando-se cuidado para que o volume da solução permanecesse entre 225mL e 260mL. Finalmente, a solução foi filtrada em papel faixa azul que por sua vez foi colocado em um cadinho que foi transferido para uma estufa e incinerado a uma temperatura entre 800°C e 900°C. Após a retirada do

cadinho da estufa, o material calcinado foi resfriado em um dessecador e posteriormente pesado.

4.1.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nesta pesquisa, o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) teve a finalidade de corroborar com os ensaios realizados, varrendo a amostra em busca de produtos expansivos (por exemplo o gesso) resultantes das reações entre o sulfato de magnésio e a pasta de cimento. Esta interação pôde ocorrer de duas formas distintas, sendo a primeira por meio da micro-análise que o microscópio fornece e a segunda visualizando-se as amostras pelas fotos produzidas.

O aparelho utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura equipado com espectômetro por energia dispersiva (EDS), modelo JSM 6360 LV, da marca JEOL. Este aparelho analisa a amostra utilizando um feixe de elétrons retroespalhados ou secundários. As amostras deste trabalho foram analisadas utilizando-se o feixe de elétrons retroespalhado.

5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados divide-se em dois grupos: aquele em que os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de determinação da velocidade do pulso ultra-sônico e resistência à compressão do concreto e aquele cujos ensaios determinaram o módulo de elasticidade dinâmico assim como o UPV. Os ensaios de porosimetria que determinam a permeabilidade do material baseando-se na porosidade superficial do mesmo e microscopia eletrônica de varredura, foram utilizados com o propósito de auxiliarem na conclusão final.

As ferramentas estatísticas utilizadas foram a análise de variância para n fatores e a análise de regressão múltipla. O banco de dados analisado foi composto de dez variáveis, sendo elas:

- resistência real;
- resistência ideal;
- tempo da onda ultra-sônica;
- tipo de cimento;
- tipo de agregado;
- solução;
- idade;
- máquina;
- transdutor;
- ponto de medição.

Foi denominado por resistência real o valor obtido na prensa, após o rompimento dos corpos-de-prova no ensaio de resistência à compressão e por resistência ideal o valor esperado, que no caso deste trabalho são de 20MPa e 50MPa.

O tempo da onda ultra-sônica é definido pelo tempo que esta levou para sair do transdutor emissor e alcançar o receptor, lido no próprio aparelho.

Os cimentos analisados foram os já mencionados a priori, isto é, o CP II E 32, o CP III 32 RS e o CP IV 32.

Os agregados foram, o gnaïsse (GN), o calcário calcítico (CC) e o calcário dolomítico (CD).

A denominação solução foi dada às três concentrações utilizadas no trabalho, sendo elas a solução sem sulfato ou solução zero (S0), a solução com 10 g/L de sulfato de magnésio (S10) e a solução com 50 g/L de $MgSO_4$ (S50).

O termo idade define o tempo que os corpos-de-prova ficaram submersos nas soluções, que foi de 28 dias, 90 dias e 180 dias.

Pelo termo máquina, entende-se que são os dois aparelhos de ultra-som utilizados, o JAMES e o PUNDIT.

Os transdutores utilizados nesta análise foram os de 37 kHz e 54 kHz para o aparelho PUNDIT e 54 kHz e 150 kHz para o aparelho JAMES.

Os pontos de medição analisados foram aqueles onde se realizaram as leituras do ultra-som, isto é, no topo, no meio e na base dos corpos-de-prova.

Os quadros a seguir são resultantes de uma série de ensaios, previamente determinados pelo quadrado latino, conforme já considerado no Capítulo 4. O uso desta ferramenta estatística, como dito anteriormente, fundamentou-se na necessidade de se reduzir, sem

afetar a confiabilidade do trabalho, o número de corpos-de-prova a serem feitos. Por causa disso, algumas combinações não ocorreram. Por exemplo, se o QUADRO 5.3, na sua segunda coluna, refere-se a corpos-de-prova com cimento CP II E 32 com idade de 90 dias, o QUADRO 5.4, também referente ao cimento CP II E 32, poderá ter somente idades de 28 dias e 180 dias. Ou seja, as outras duas idades complementares àquelas adotadas neste trabalho de pesquisa. O mesmo procedimento ocorreu com os concretos feitos com cimentos CP III 32 RS (QUADRO 5.3 e QUADRO 5.5) e CP IV 32 (QUADRO 5.3 e QUADRO 5.6).

Os QUADROS 5.1 e 5.2 referem-se aos quadrados latinos programados para os 648 corpos-de-prova a serem moldados com resistência $f_{ck} = 20$ MPa (324 corpos-de-prova) e $f_{ck} = 50$ MPa (324 corpos-de-prova).

Nesses quadros, a primeira grande coluna refere-se aos resultados dos testes da resistência f_c e do UPV. A segunda, aos resultados do módulo de elasticidade dinâmico e também do UPV. Na terceira coluna, os resultados listados são referentes aos ensaios do porosímetro de mercúrio.

As três grandes linhas nesses quadros referem-se às três idades de permanência dos CP's nas diferentes soluções – 28 dias, 90 dias e 180 dias.

Cada um dos nove quadrados latinos que formam os QUADROS 5.1 e 5.2 tem valores fixos dos tipos de cimento (linhas) e valores alternados ciclicamente dos tipos de agregados (colunas).

O número indicado em cada uma das células internas de cada quadrado latino representa a média aritmética de 4 ensaios.

Por exemplo, no QUADRO 5.1, as células sombreadas indicam que foram feitos doze corpos-de-prova, sendo quatro para o ensaio de resistência à compressão e UPV, quatro para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico e UPV e outros quatro para o ensaio de porosimetria por mercúrio.

No caso do ensaio de porosimetria por mercúrio, a sua natureza dispendiosa e insalubre inviabilizou a execução de mais de uma amostra para cada corpo-de-prova, sendo este um procedimento padrão para tal tipo de ensaio, embora os QUADROS 5.1 e 5.2 revelem que foram feitos quatro corpos de prova para cada mistura. Vale ressaltar que foi tomado o cuidado de se ensaiar somente a argamassa superficial do corpo-de-prova, isto é, em nenhuma amostra ocorreu a presença de brita.

A porosidade interna do corpo-de-prova foi avaliada pela leitura do tempo da onda ultra-sônica e a porosidade externa ou superficial pelo ensaio de porosimetria por mercúrio. No primeiro caso, quanto menor a leitura do tempo da onda ultra-sônica, maior a compactidade interna da estrutura.

Os valores Δ Massa presentes nos QUADROS 5.3 a 5.26 referem-se às variações da massa do corpo-de-prova na idade do ensaio em relação ao valor medido no ato da desfôrma inicial do mesmo.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que havia mudanças significativas nas superfícies dos corpos-de-prova. Desta forma, os corpos-de-prova passaram a ter a massa aferida antes dos ensaios de ultra-sonografia e, de fato, notou-se que as suas massas variavam para mais ou para menos.

No caso do primeiro, este poderia ser em virtude da formação de produtos expansivos ou por causa da presença de água no interior do corpo-de-prova. Contudo, no caso de redução de massa, inevitavelmente estaria relacionado ao fato de ter ocorrido perda de material. Mas, adotou-se tal procedimento, como dito acima, no transcorrer da pesquisa, levando à ausência de alguns resultados.

A partir dos quadrados latinos apresenta-se a análise qualitativa dos resultados, em seguida a análise quantitativa por meio de um sólido tratamento estatístico e as conclusões finais, culminando com o quadro resumo dos resultados dos gráficos *boxplot*.

QUADRO 5.1: Quadrados Latinos Utilizados na Fabricação dos Concretos, Execução dos Ensaios e Disposição nas Soluções (f_c em MPa e I em dias).

$f_c = 20$ I = 28		f_c / UPV		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 28		Ed / UPV		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 28		Porosímetro de Hg		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 90		f_c / UPV		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 90		Ed / UPV		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 90		Porosímetro de Hg		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 180		f_c / UPV		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 180		Ed / UPV		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

$f_c = 20$ I = 180		Porosímetro de Hg		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

QUADRO 5.2: Quadrados Latinos Utilizados na Fabricação dos Concretos, Execução dos Ensaios e Disposição nas Soluções (f_c em MPa e I em dias).

fc = 50 I = 28		f _c / UPV		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 28		Ed / UPV		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 28		Porosímetro de Hg		
		CD	CC	GN
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 90		f _c / UPV		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 90		Ed / UPV		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 90		Porosímetro de Hg		
		CC	GN	CD
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 180		f _c / UPV		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 180		Ed / UPV		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

fc = 50 I = 180		Porosímetro de Hg		
		GN	CD	CC
Cimento	II	S0	S10	S50
		4	4	4
	III	S10	S50	S0
		4	4	4
	IV	S50	S0	S10
		4	4	4

5.1 Análise dos Dados

Os quadros que vêm a seguir, têm o objetivo de dispor de uma forma clara, os resultados obtidos nos ensaios realizados, para tornar a análise destes mais clara e elucidativa.

QUADRO 5.3: Concretos com resistência de 20MPa e agregado graúdo CC, submetidos à solução S0.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	90	180	28
Tempo Onda Ultra-Sônica (μs)	19,81	18,91	18,20
f_c (MPa)	27,25	29,50	23,75
Δ Massa (g)	-	+ 43	-
Porosidade (nm)	18,40	18,60	36,50
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine (m^2/kg)	368	383	426

QUADRO 5.4: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 28 dias na solução S10	20,39
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 180 dias na solução S50	22,29
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	23,50
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	20,00
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	28,10
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	37,00
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S50	- 23,00

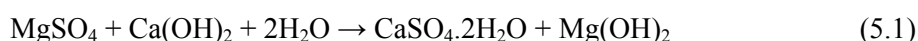
QUADRO 5.5: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.

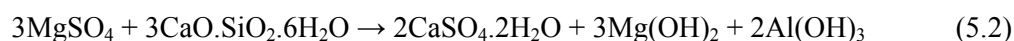
Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 90 dias na solução S10	19,68
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 28 dias na solução S50	19,57
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	35,75
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	32,25
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	20,00
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	24,90
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S10	- 25,00
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S50	-

QUADRO 5.6: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 180 dias na solução S10	20,53
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 90 dias na solução S50	20,92
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	23,50
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	25,50
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	20,60
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	22,20
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S10	+ 10,00
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S50	-

O cimento CP II E 32, embora receba adição de escória, o que diminui sua porosidade e reduz a quantidade de portlandita existente na matriz de cimento, não é fabricado para suportar ataque de sulfatos. Isso ficou claramente evidenciado nos quadros anteriores, ao mostrar que o concreto feito com este cimento e agregado graúdo calcário calcítico, apresentou sinais de forte deterioração em todos os quesitos como aumento significativo das porosidades interna e externa, resultando em uma diminuição da resistência à compressão. Mesmo na solução S10, seu desempenho foi ruim. O aumento das suas porosidades interna e externa resultando em queda da resistência à compressão leva à forte suspeita de que seja por causa de compostos expansivos formados pelas reações do sulfato de magnésio das soluções com a matriz da pasta de cimento. Estas equações são citadas pela norma americana ASTM C 618 (2003) e são colocadas a seguir:





O concreto feito com cimento CP III 32 RS, agregado graúdo calcário calcítico e submetido ao ataque da solução S50 por 28 dias, apresentou um desempenho melhor em relação ao CP II E 32, visto que ele é resistente a sulfatos. Contudo, o concreto feito com este cimento também apresentou uma certa deterioração, como pode ser visto por causa das porosidades externa e interna. Estes dados mostram que a combinação cimento CP III 32 RS e agregado calcário calcítico apresentou danos estruturais quando exposta à solução S50 num espaço curto de tempo de 28 dias. Provavelmente isso tenha ocorrido, pois, segundo MEHTA (1994) a reação da escória de alto forno com o cimento Portland produzindo C-S-H é lenta. NEVILLE (1997) acrescenta que a maior finura da escória de alto forno, resulta numa melhor evolução da resistência, mas somente em idades mais avançadas, uma vez que é necessário ocorrer a sua ativação. NEVILLE (1997) ainda acrescenta que a sua hidratação com o cimento Portland ocorre em idades mais avançadas. Todavia, quando foi exposto à solução S10 apresentou um desempenho melhor, porém, ainda mostrando deterioração provocada pelo ataque do sulfato. Isso é corroborado com o fato da porosidade interna ser significativamente maior quando comparado ao mesmo concreto não exposto ao ataque (S0). Contudo, o aumento da resistência à compressão do concreto, quando submetido à solução S10, em conjunto com um aumento significativo da porosidade interna e um ligeiro aumento da porosidade externa, levanta a suspeita de que este não seja um ganho real de resistência e sim um resultado temporário de uma compacidade maior provocada pela formação de produtos expansivos oriundos de reações entre o sulfato da solução e a matriz da pasta de cimento do concreto. Estes produtos foram detectados em ensaios do MEV (Anexo C).

O concreto feito com cimento CP IV 32 e agregado calcário calcítico, mostrou uma porosidade superficial elevada na idade de 28 dias, submetido à solução S0. NEVILLE (1997) afirma que concretos que recebem adição de cinza volante, como por exemplo, o cimento CP IV pozolânico, apresentam permeabilidade elevada nas primeiras idades,

conseqüência da reação lenta da cinza volante no concreto e, com o transcorrer do tempo, o concreto passa a ter permeabilidade bem baixa. Um dado complementar à afirmação acima é sua baixa porosidade interna.

Quando submetido ao ataque de sulfatos na solução S50, o concreto com cimento CP IV 32 reagiu de forma parecida com aquele submetido à solução S10, porém mostrando que de fato o ataque da solução S50 em 90 dias acelerou seu processo de deterioração, confirmado pelos dados do QUADRO 5.6. É mostrado que durante 90 dias, o ataque da solução S50, diminuiu o diâmetro dos poros externos e aumentou consideravelmente a porosidade interna da peça. Este dueto de informações leva a crer que o aumento de resistência à compressão fora provocado por reações internas do sulfato com a matriz de cimento e que uma queda de resistência à compressão no futuro, é mais esperada do que um ganho efetivo da mesma.

Quando submetido à solução S10, durante 180 dias, o concreto reagiu de forma semelhante àquele da solução S50, contudo, o efeito deteriorante da solução de sulfato no concreto, demorou um tempo maior, por causa da sua menor concentração. Acredita-se que a redução da porosidade externa em relação ao concreto submetido à solução S50, seja conseqüência da deterioração mais lenta e que o ganho de resistência provocado pelo ataque da solução S10, tenha a mesma conclusão apresentada no parágrafo anterior, uma vez que, confirmando a suspeita, alguns ensaios realizados aos 270 dias, em corpos-de-prova sob ataque da solução S10, apresentaram queda da resistência à compressão (Anexo C).

QUADRO 5.7: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CD, submetidos à solução S0.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	28	90	180
Tempo Onda Ultra-sônica (μ s)	19,17	18,20	19,03
f_c (MPa)	22,75	32,75	20,25
Δ Massa(g)	-	- 10	+ 48
Porosidade (nm)	29,40	16,10	48,80
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine (m^2/kg)	368	383	426

QUADRO 5.8: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S10	19,29
Tempo da onda ultra-sônica (μ s)/ 90 dias na solução S50	20,03
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	22,00
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	23,75
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	31,10
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	49,30
Δ Massa (g) 180 dias na solução S10	- 18,00
Δ Massa (g) 90 dias na solução S50	- 85,00

QUADRO 5.9: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S10	18,81
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S50	19,51
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	21,00
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	21,50
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	23,60
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	35,80
Δ Massa (g) 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) 180 dias na solução S50	- 10,00

QUADRO 5.10: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S10	19,89
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S50	19,60
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	26,75
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	21,75
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	21,40
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	27,60
Δ Massa (g) 90 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) 28 dias na solução S50	-

Ao analisar os quadros acima, referentes ao concreto feito com cimento CP II E 32, constata-se pelas leituras dos tempos da onda ultra-sônica e do diâmetro dos poros superficiais, que os aumentos das porosidades interna e superficial são proporcionais às concentrações das soluções de sulfato. Outro dado interessante, é que a solução S10, com uma concentração de 10 g/L, durante 180 dias de ataque, não provocou perda de resistência do concreto, mas revelou um aumento na leitura da onda ultra-sônica e na porosidade externa se comparada à solução S0. O corpo-de-prova apresentou aos 180 dias, sob ataque da solução S10, uma perda de massa de 18g. Provavelmente, tal redução ocorreu devido ao efeito da desdolomitização, pois, por meio do ensaio de difração de raios-X (DRX) realizado no pó armazenado no fundo do recipiente, encontrou-se uma quantidade razoável de calcita e aragonita – compostos oriundos da reação da desdolomitização.

O concreto feito com cimento CP II E 32, exposto durante 90 dias, à solução de 50 g/L, apresentou um desempenho insatisfatório quanto à porosidade, mesmo com uma resistência à compressão ligeiramente superior. Tudo leva a crer que este aumento de resistência é devido à expansão provocada por reações entre o sulfato de magnésio e a matriz da pasta de cimento. Corroborando esta teoria, está o aumento substancial da porosidade superficial do concreto seguido do aumento de vazios internos, medido pela elevação do tempo de propagação da onda ultra-sônica. A perda de 85 g de material provavelmente se deve ao mesmo fenômeno da desdolomitização que produz carbonato de cálcio, uma vez que o ensaio de DRX feito no pó armazenado no fundo da caixa d'água revelou um acúmulo de CaCO_3 e caulinita.

O concreto feito com cimento CP III 32 RS, revelou aumento crescente das suas porosidades, superficial e interna, proporcional à solução em que se encontravam. Entretanto, os quadros acima também mostram que houve redução acentuada da sua resistência à compressão comparando seu desempenho quando exposto à solução S0. A perda de 10g em sua massa, tanto na solução S0 como na S50, pode ser devido ao efeito da desdolomitização; reação que ocorre entre a dolomita do calcário dolomítico e a portlandita da matriz de cimento. Esta afirmação é corroborada com o fato de que se encontrou uma razoável quantidade de carbonato de cálcio no fundo do reservatório, quando foi feita a análise de DRX do pó acumulado no fundo da caixa d'água.

A presença de tal carbonato de cálcio, levantou a suspeita de que este poderia ser oriundo de uma possível carbonatação do concreto. No entanto, logo essa hipótese foi descartada uma vez que ao se aspergir fenolftaleína sobre o mesmo, imediatamente a superfície ficou rosa, indicando que a carbonatação não havia ocorrido, como pode ser visto no Anexo C.

Segundo a ASTM (2004), quando a concentração de sulfato está acima de 7,5g de MgSO_4/L , a reação caracteriza-se pela formação de hidróxido de magnésio, gesso e gel de sílica, não ocorrendo a formação de etringita. Tais compostos foram detectados no ensaio do MEV (Anexo C). Segundo NEVILLE (1997), a reação da escória de alto forno com o hidróxido de cálcio é semelhante àquela que ocorre com os cimentos

pozolânicos, produzindo C-S-H. Talvez por causa disso e da formação do gel de sílica é que a porosidade interna aumentou mas não foi suficiente para fazer o concreto perder resistência.

Analisando os quadros acima, constata-se que o concreto feito com cimento CP IV 32, apresentou uma porosidade elevada, quando submerso na solução S0, se comparado às soluções S10 e S50. Fato este, que não ocorre com sua porosidade interna, como pode ser visto pelas leituras do tempo do pulso ultra-sônico. Segundo NEVILLE (1997), o cimento pozolânico reage com a portlandita da matriz de cimento formando C-S-H, além do fato de que, este cimento apresenta nas primeiras idades uma permeabilidade elevada, que é reduzida somente com o transcorrer do tempo. Todavia, o que parece ter ocorrido com tal concreto, uma vez que apresenta uma porosidade superficial elevada e reduzida internamente, é o fato de que tenha ocorrido um desgaste externo provocado pelo alto teor do pH da S0, como pode ser visto na FIG.5.1. Segundo informações da Companhia de Saneamento local (COPASA), o pH da água distribuída na torneira da região central de BH, é em média de 8,17 e o pH que a solução S0 possuía durante este período era de 10,2 (relatórios no Anexo C). Além disso, constatou-se uma superfície externa bem áspera. Sua resistência à compressão, com o agregado calcário dolomítico, não apresentou um bom desempenho se comparada aos valores com os outros agregados. Talvez isto seja efeito da desdolomitização.

O concreto feito com cimento CP IV 32, agregado graúdo de calcário dolomítico e submetido a uma solução com 50 g/L (S50) de sulfato de magnésio, durante 28 dias, revelou um aumento significativo da sua porosidade externa (29%) em relação à solução com 10 g/L (S10), em um período de 90 dias. Comparando os períodos de ataque, a solução S50 mostrou ser substancialmente agressiva, principalmente porque a porosidade interna, mostrada pela leitura da onda ultra-sônica, indica que em apenas 28

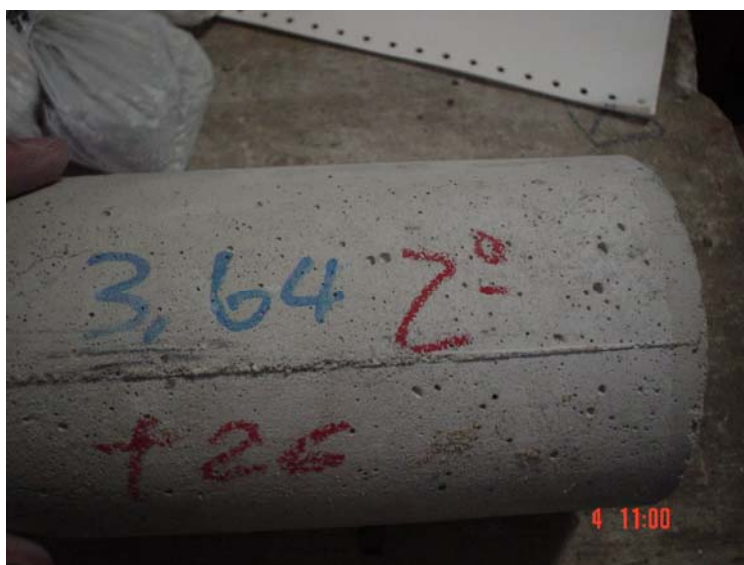


FIGURA 5.1: Desgaste superficial do corpo-de-prova de concreto inserido na solução S0. (CP IV 32 – 20 MPa)

dias as alterações internas do concreto submetido à solução S50, foram próximas daquelas apresentadas pela solução S10, durante um período de 90 dias.

Embora tenham apresentado um aumento da resistência à compressão em comparação com a solução S0, é razoável afirmar que tal aumento tenha sido devido às expansões internas do corpo-de-prova de concreto, provocadas pelas reações da solução de sulfato com a matriz de cimento.

QUADRO 5.11: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo GN, submetidos à solução S0.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	180	28	90
Tempo Onda Ultra-sônica (μs)	20,84	20,30	20,96
f_c (MPa)	26,00	33,25	26,25
Δ Massa (g)	+ 40	-	-
Porosidade (nm)	28,00	22,80	61,90
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine	368	383	426

QUADRO 5.12: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 90 dias na solução S10	21,43
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 28 dias na solução S50	22,80
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	33,25
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	24,50
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	30,90
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	35,50
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S10	- 40,00
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S50	-

QUADRO 5.13: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S10	20,86
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S50	21,60
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	34,25
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	41,75
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	24,80
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	25,60
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S10	+ 35,00
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S50	- 25,00

QUADRO 5.14: Concretos com resistência de 20MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S10	20,68
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S50	22,21
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	26,00
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	23,50
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	28,50
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	25,30
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S50	- 28,00

O concreto feito com cimento CP II E 32, agregado graúdo gnaïsse e submetido durante 90 dias à solução S10, mostrou um comportamento previsível apresentando um aumento das porosidades externa e interna em relação à solução S0. No caso da solução S50, aos 28 dias, o aumento dos diâmetros dos poros externos foi maior que na solução S10, o que também ocorreu com a porosidade interna. Assim, constata-se que o cimento CP II E 32 de fato não oferece resistência ao ataque de sulfatos, ainda mais sendo um ataque tão agressivo quanto o da solução com 50 g/L. Em se tratando da resistência à compressão, a solução de sulfato de magnésio S50, em 28 dias, foi capaz de produzir uma queda, o que leva a crer que o aumento da resistência à compressão no caso da solução S10, não é real e sim consequência de uma maior compactação temporária dos poros, devido à formação de produtos expansivos, produto das reações entre o sulfato e a matriz de cimento. Essa teoria fundamenta-se no aumento das porosidades interna e externa, seguido de perda de massa (40g) pelo concreto quando submetido à solução

S10 e pela queda da resistência à compressão do concreto, quando submetido à solução S50.

O concreto feito com cimento CP III 32 RS, agregado graúdo gnaisse e submetido durante 180 dias à solução S10, mostrou um comportamento condizente com sua propriedade de ser resistente a sulfatos. Durante 180 dias, submetido ao ataque da solução S10, ele registrou um aumento da sua porosidade externa, seguido de um aumento da porosidade interna, mas a resistência à compressão permaneceu praticamente a mesma que a da solução S0. A combinação agregado gnaisse com cimento CP III 32 RS mostrou-se resistente ao ataque da solução S10, durante o intervalo de 180 dias, inclusive ganhando massa (35g), mas essa resistência não foi duradoura, pois aos 270 dias a sua resistência à compressão foi de 31MPa. No caso da solução S50, o concreto feito com cimento CP III 32 RS e agregado gnaisse, mostrou comportamento semelhante ao da solução S10. O aumento exagerado da resistência à compressão do concreto, quando submetido à solução S50, leva a crer que seja um resultado temporário da formação de produtos expansivos no interior do concreto oriundos de reações entre o sulfato e a matriz de cimento.

O concreto feito com cimento CP IV 32, utilizando agregado graúdo gnaisse e submetido à solução S10 durante 28 dias, revelou dados interessantes. Segundo METHA (1994), o cimento Portland pozolânico reage lentamente com a portlandita, na presença de água, formando C-S-H, o que leva a uma redução da porosidade externa do concreto, conforme já comentado e até a uma resistência ao ataque de sulfatos, uma vez que o teor de portlandita diminui. Baseando-se neste comentário, aos 28 dias, sob ataque da solução S10, o concreto feito com agregado graúdo gnaisse e cimento CP IV 32, apresentou uma porosidade externa superior àquela após um ataque de 180 dias de uma solução de sulfato com concentração de 50 g/L. A porosidade interna também se mostrou alterada. Aos 90 dias, na solução S0, a porosidade interna da estrutura era maior, refletida pela leitura da onda ultra-sônica no interior do concreto e aos 28 dias, sob ataque da solução S10, essa porosidade diminuiu. Isso revela, em conjunto com o aumento da porosidade externa do concreto na solução S10, que houve a formação de produtos expansivos no interior do concreto, provavelmente devido a reações entre a

solução de sulfato de magnésio e a matriz de cimento. No entanto, esse aumento não foi significativo ao ponto de reduzir a resistência à compressão. Todavia, aos 180 dias na solução S50, o concreto utilizando cimento CP IV 32, perdeu 28 g de massa, apresentou um aumento considerável da porosidade interna e diminuiu a resistência à compressão. Este desgaste é confirmado novamente aos 270 dias, quando o concreto feito com cimento CP IV 32 e agregado graúdo de gnaïsse apresentou uma resistência à compressão de 22,54 MPa acompanhado de um aumento do tempo da onda ultra-sônica.

O aumento exacerbado da porosidade superficial do concreto feito com cimento CP IV 32 e agregado graúdo gnaïsse, na solução S0, provavelmente é resultado de dois fatores agindo simultaneamente - o primeiro, segundo NEVILLE (1997), é o fato da pozolana reagir lentamente no concreto, o que leva a uma elevada permeabilidade nas primeiras idades, vindo a ocorrer sua redução apenas no transcorrer do tempo. O segundo fator é que a solução S0, nesta idade, já apresentara uma mudança de seu pH de 8,2 para 10,2. Tudo leva a crer que essa elevação do pH tenha desgastado a superfície do concreto, aumentando o diâmetro dos poros externos, como pode ser visto na FIG. 5.2 abaixo.



FIGURA 5.2: Desgaste superficial do corpo-de-prova de concreto inserido na solução S0.

QUADRO 5.15: Concretos com resistência de 50MPa e agregado graúdo CC, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	90	180	28
Tempo Onda Ultra-Sônica (μ s)	18,28	18,71	19,48
f_c (MPa)	45,75	55,75	47,00
Δ Massa (g)	-	-10,00	-
Porosidade (nm)	23,40	18,10	23,80
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine (m^2/kg)	368	383	426

QUADRO 5.16: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S10	21,23
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S50	18,33
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	43,75
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	51,50
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	26,40
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	31,40
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S50	-20,00

QUADRO 5.17: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50

Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S10	18,07
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S50	19,83
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	48,25
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	44,25
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	23,90
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	27,10
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S50	-

QUADRO 5.18: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CC e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

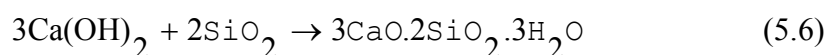
Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S10	18,85
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S50	18,72
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	60,25
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	50,75
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	17,20
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	18,70
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S50	-

PARK et al. (1999), BENTUR E COHEN (1988) fizeram pesquisas adicionando sílica ativa ao concreto e submetendo-o ao ataque do sulfato de magnésio. O primeiro utilizou proporções que variaram de 0% a 15% de fumo de sílica em substituição ao cimento. O segundo apenas este último valor. Ambos utilizaram as soluções de sulfato de sódio e magnésio, sendo que PARK et al. (1999) fizeram soluções com concentrações de 10% de sulfato, enquanto BENTUR e COHEN (1988) trabalharam com concentrações de sulfato entre 20% e 25%. Ambas as equipes chegaram à conclusão de que o sulfato de magnésio é o mais deletério e que a adição de sílica ativa ao concreto, em teores aproximadamente de 10%, não contribui para um aumento da resistência deste ao ataque do $MgSO_4$. Corroborando esta afirmação, PARK et al. (1999) afirmam que corpos-de-prova de concreto que têm um teor superior a 10% de sílica ativa apresentam uma resistência à compressão menor, após 270 dias de ataque, que aqueles com um teor

menor. Somado a essas conclusões, BENTUR e COHEN (1988), afirmam que o efeito do fumo de sílica nos vários ambientes de sulfato não é bem definido, sendo que, ainda hoje, não há uma explicação satisfatória para a redução do desempenho do concreto com teores elevados de fumo de sílica, quando submetido a soluções de sulfato de magnésio.

O concreto feito com cimento CP II E 32, agregado graúdo calcário calcítico, submetido à solução S0 durante 90 dias, apresentou menores porosidades superficial e interna com uma resistência à compressão ligeiramente maior que quando submetido à solução S10. Todos os respectivos valores para esta solução apresentaram desempenho inferior, particularmente a leitura do tempo da onda ultra-sônica. Isso revela que, o fator cimento prevaleceu sobre o fumo de sílica, isto é, a inaptidão do cimento CP II E 32 para resistir a um ataque de sulfato foi maior do que o efeito redutor do fumo de sílica sobre a permeabilidade. Em apenas 28 dias, a solução S10 foi capaz de causar alterações nas porosidades superficial e interna do concreto.

Todavia, quando submetido à solução S50, durante 180 dias, o desgaste superficial dos corpos-de-prova de concreto foi maior do que aqueles ocorridos nas soluções S0 e S10, apresentando um diâmetro médio dos poros sensivelmente superior. Entretanto, a leitura do tempo da onda ultra-sônica, que reflete a porosidade interna da estrutura, apresentou efeito contrário, refletindo uma estrutura compacta internamente, inclusive com aumento da resistência à compressão. Segundo NEVILLE (1997), o principal efeito da sílica ativa no concreto é a redução da permeabilidade do cimento hidratado, mas não necessariamente a redução da porosidade total. Este fenômeno é consequência da reação da sílica do fumo de sílica com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento gerando C-S-H, conforme a Eq.(5.6).



Porém, segundo BENTUR e COHEN (1988), o gel de C-S-H formado por esta reação não é igual ao silicato de cálcio hidratado, produto das reações de hidratação do cimento Portland. No primeiro caso a relação cálcio/sílica é menor que no segundo. Com base

nessas afirmações, provavelmente, a maior compactação interna do concreto (baixa leitura do tempo da onda ultra-sônica), assim como o aumento da resistência à compressão sejam conseqüências da formação de produtos expansivos oriundos de reações entre o silicato de cálcio hidratado e a solução de sulfato de magnésio. Tal afirmação, leva a crer que esse aumento de resistência à compressão seja temporário.

O concreto feito com o mesmo agregado graúdo, porém com cimento CP III 32 RS apresentou um comportamento similar ao concreto feito com cimento CP II E 32, apesar deste não ser resistente a sulfatos. Segundo PARK et al. (1999), concretos feitos com cimentos resistentes a sulfatos e substituição de 10% da massa de cimento por sílica ativa, têm uma resistência à compressão menor que concretos que utilizam um teor menor de fumo de sílica. BENTUR e COHEN (1988) acrescentam que não existe muita diferença entre o concreto feito com o cimento resistente a sulfato e aquele que não o é, no que diz respeito à queda da resistência à compressão, quando submetidos especificamente a um ataque de sulfato de magnésio.

Submetido à solução S0 durante 180 dias, a porosidade externa do concreto feito com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo calcário calcítico, foi substancialmente menor que quando submetido às soluções S10 e S50, independentemente do tempo. A leitura da resistência à compressão também apresentou um comportamento coerente. Contudo, vale ressaltar que o efeito da solução S50 no concreto com cimento CP III 32 RS foi mais danoso do que para o concreto com cimento CP II E 32. Como dito anteriormente, o C-S-H formado pela reação da sílica do fumo de sílica com a portlandita da pasta de cimento tem uma relação cálcio/sílica menor que aquele oriundo das reações de hidratação do cimento Portland. BENTUR e COHEN (1988) complementam dizendo que o gel pozolânico C-S-H tem uma densidade menor que o gel C-S-H do cimento Portland. Somado a isso, tem-se que a quantidade de C-S-H gerada pela hidratação do cimento CP II E 32 é maior que aquela formada pelo CP III 32 RS, uma vez que os teores de C_3S e C_2S do primeiro são 41,68% e 7,89%, enquanto que para o segundo são 22,44% e 4,25% respectivamente e assim, o concreto feito com o cimento CP III 32 RS, embora resistente a sulfatos, no caso do $MgSO_4$, não apresentou vantagem em relação ao cimento CP II E 32. Tudo leva a crer que deva ser porque a proporção de C-S-H

pozolânico no concreto feito com cimento CP III 32 RS é maior que aquela gerada pelo cimento CP II E 32.

Comparando-se as soluções S0 e S10, nota-se que houve uma compacidade maior do concreto submetido à solução S10 (tempo da onda ultra-sônica menor), assim como uma queda da resistência à compressão. Provavelmente isso deve ser efeito da formação de produtos expansivos entre as reações do sulfato de magnésio e a pasta de cimento, levando à formação do gesso em detrimento do C-S-H. Essa transformação acarretaria uma queda na resistência do concreto, visto que haveria uma perda de silicato de cálcio hidratado, ao mesmo tempo em que aumentaria a compacidade interna da estrutura, com a formação de gesso. Esse fato está confirmado no ensaio do MEV (Anexo C).

O concreto feito com cimento CP IV 32 pozolânico e agregado graúdo calcário calcítico, dentre os três tipos de cimento, é aquele que apresenta um comportamento mais peculiar. Toda essa particularidade é devido à presença da pozolana. No caso em questão, ocorre ainda a substituição de 10% do peso do cimento por fumo de sílica. A porosidade superficial deste concreto apresentou valores coerentes quando comparados os valores das soluções S10 e S50, revelando que esta última, embora para um tempo menor, deteriorou mais o concreto que a primeira. A porosidade externa na solução S0 é explicada no próximo parágrafo. Tal análise é confirmada pelos valores da resistência à compressão que novamente mostram uma maior deterioração do concreto devido ao ataque da solução S50. No caso dos valores da leitura da onda ultra-sônica, pode-se afirmar que não houve mudanças significativas. Em ambos os casos, é provável que o ocorrido seja devido à formação de produtos expansivos oriundos das reações entre o sulfato de magnésio e a pasta de cimento.

No caso do concreto submetido à solução S0, tudo leva a crer que a elevada média do diâmetro dos poros superficiais seja devido à presença da pozolana. Segundo NEVILLE (1997) a reação da cinza volante no concreto é lenta e inicialmente o concreto apresenta uma permeabilidade elevada, reduzindo-se com o tempo. Esta elevada permeabilidade pode ser percebida pelos altos valores das porosidades externa e interna. Uma vez que existe a relação direta entre a porosidade e a resistência à

compressão, é razoável afirmar que a resistência obtida aos 28 dias, pelos corpos-de-prova submetidos à solução S0, aumentaria caso o concreto permanecesse por um tempo maior dentro da solução.

QUADRO 5.19: Concretos com resistência de 50MPa e agregado graúdo CD, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	28	90	180
Tempo Onda Ultra-Sônica (μs)	18,84	17,16	17,94
f_c (MPa)	46,50	53,00	53,75
Δ Massa (g)	-	-	+20,00
Porosidade (nm)	33,00	14,50	23,70
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine (m^2/kg)	368	383	426

QUADRO 5.20: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 180 dias na solução S10	17,69
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 90 dias na solução S50	17,32
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	46,25
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	38,00
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	23,60
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	42,40
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S10	0,00
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S50	-

QUADRO 5.21: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 28 dias na solução S10	19,49
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 180 dias na solução S50	18,56
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	42,00
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	50,00
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	28,90
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	48,30
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S50	-20,00

QUADRO 5.22: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo CD e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 90 dias na solução S10	17,84
Tempo da onda ultra-sônica (μs) / 28 dias na solução S50	19,49
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	43,75
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	41,00
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	20,00
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	32,40
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S50	-

Segundo NEVILLE (1997), durante a reação álcali-carbonato, ocorre a desdolomitização, ou seja, a transformação da dolomita $[\text{CaMg}(\text{CaCO}_3)_2]$ em CaCO_3 e MgCO_3 . Contudo, não se conhece com clareza as reações envolvidas nesse processo. O autor ainda lembra que devido ao efeito da reação álcali-carbonato, o concreto pode sofrer expansão quando em meio úmido.

Baseando-se no mesmo autor, é provável que o comportamento do concreto feito com cimento CP II E 32 e agregado graúdo dolomítico submetido à solução S0, esteja refletindo os efeitos da desdolomitização devido a natureza do agregado graúdo. O concreto apresentou uma porosidade superficial média elevada, uma porosidade interna relativa também um pouco elevada, com ambos resultando numa queda da resistência à compressão.

Uma vez que este peculiar comportamento não ocorrera em outros concretos, tudo leva a crer que a razão deste seja a presença do calcário dolomítico, como agregado graúdo.

Quando submetido à solução S10, durante 180 dias, a resistência à compressão manteve-se constante em relação àquela da solução S0. No entanto, as porosidades interna e externa diminuíram, o que indica que com o ataque do sulfato de magnésio, é bem provável que tenha ocorrido a formação de compostos expansivos no interior do concreto, colmatando os poros tanto internos quanto externos. Todavia, tal colmatação, com o tempo, pode provocar a expansão das porosidades interna e externa, produzindo uma queda acentuada da resistência à compressão. Este efeito ocorreu quando o concreto foi submetido, durante 90 dias, à solução S50, apresentando uma elevação substancial dos poros superficiais, acompanhada de uma queda significativa da resistência à compressão.

O concreto feito com cimento CP III 32 RS e agregado calcário dolomítico, quando submetido à solução S0 por 90 dias, revelou um diâmetro médio dos poros superficiais baixo, assim como a porosidade interna. Ambos os fatores refletiram numa resistência à compressão em patamares normais.

Contudo, quando submetido à solução S10, por 28 dias, este concreto apresentou expansões significativas tanto dos poros externos quanto dos internos, com acentuada queda da resistência à compressão. Segundo NEVILLE (1997), quando a massa de fumo de sílica é de 10% do total de material cimentício, metade desse material reage após 1 dia e dois terços após 3 dias. No entanto, o prosseguimento da reação é lento e após 90 dias, apenas três quartos do fumo de sílica é hidratado. Provavelmente devido à lentidão no processo de hidratação do fumo de sílica e ao ambiente agressivo, tenha ocorrido a expansão significativa dos poros superficiais do concreto, assim como o aumento da porosidade interna, resultando em uma queda acentuada da resistência à compressão.

Quando submetido à solução S50, por um período de 180 dias, a porosidade interna manteve-se em patamares entre aqueles apresentados nas soluções S0 e S10. Isto mostra

que houve reações entre a pasta de cimento e solução de sulfato de magnésio, todavia também ocorreu a hidratação de uma porção maior do fumo de sílica que contribui para a redução da permeabilidade do concreto. No entanto, a ação deletéria das reações entre o sulfato da solução e a pasta de cimento, gerou um aumento expressivo dos poros superficiais. Os efeitos antagônicos de ambos os processos, provocaram uma ligeira redução da resistência à compressão mantendo-a no patamar da solução S0.

O concreto feito com cimento CP IV 32 pozolânico e agregado graúdo calcário dolomítico, submetido à solução S0 por 180 dias, apresentou uma porosidade superficial relativa um pouco alta, devido à presença da pozolana e do próprio fumo de sílica. Ambos, segundo NEVILLE (1997), apresentam reações lentas, reduzindo a permeabilidade do concreto apenas em idades mais avançadas, mas não necessariamente a porosidade total. Tal afirmação é corroborada pelos dados obtidos, que indicam uma porosidade superficial razoavelmente elevada, contrapondo-se à porosidade interna baixa. Tal dubiedade dos dados, não afetou a resistência à compressão do concreto, mantendo-a no patamar esperado.

Quando submetido, por 90 dias, à solução S10, o concreto com cimento pozolânico CP IV 32 e agregado graúdo calcário dolomítico, sofreu uma acentuada redução de resistência à compressão, com reduções de suas porosidades interna e externa. Tal fenômeno, embora possa parecer contraditório, leva a crer que tenha ocorrido o efeito da desdolomitização, acrescido de reações entre a solução de sulfato de magnésio e a pasta de cimento. O somatório destas duas situações levaria à formação de produtos expansivos, reduzindo inicialmente as porosidades externa e interna, mesmo contrapondo a uma redução da resistência, como verificado nos ensaios.

O texto supracitado é corroborado pelos dados obtidos deste concreto submetido à solução S50 por 28 dias. O elevado teor de sulfato de magnésio, somado às lentas reações da pozolana do cimento CP IV e do fumo de sílica adicionado, causaram um elevado aumento dos poros externos e internos, devido à formação de produtos expansivos oriundos das reações do sulfato de magnésio com a pasta de cimento, inclusive refletindo na queda da resistência à compressão do concreto. É possível

também, que tenha ocorrido o efeito da desdolomitização, provocado pela presença do calcário dolomítico, auxiliando ainda mais no aumento das porosidades com conseqüente queda da resistência à compressão.

QUADRO 5.23: Concretos com resistência de 50MPa e agregado graúdo GN, submetidos à solução S0. Substituiu-se 10% da massa de cimento por sílica ativa.

Propriedades	CP II E 32	CP III 32 RS	CP IV 32
Idade (dias)	180	28	90
Tempo Onda Ultra-Sônica (μ s)	19,36	21,91	19,33
f_c (MPa)	65,00	57,25	51,75
Δ Massa (g)	-	-	-
Porosidade (nm)	15,70	21,90	24,30
Material Cimentício Adicionado	Escória	Escória	Pozolana
Finura Blaine (m^2/kg)	368	383	426

QUADRO 5.24: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP II E 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP II E 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S10	19,44
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S50	22,43
f_c (MPa) / 90 dias na solução S10	48,25
f_c (MPa) / 28 dias na solução S50	56,00
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S10	27,70
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S50	33,50
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S50	-

QUADRO 5.25: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP III 32 RS, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP III 32 RS
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S10	19,86
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 90 dias na solução S50	19,74
f_c (MPa) / 180 dias na solução S10	59,50
f_c (MPa) / 90 dias na solução S50	51,75
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S10	20,80
Porosidade (nm) / 90 dias na solução S50	24,30
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 90 dias na solução S50	-

QUADRO 5.26: Concretos com resistência de 50MPa, agregado graúdo GN e cimento Portland CP IV 32, submetidos às soluções S10 e S50.

Complemento	CP IV 32
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 28 dias na solução S10	22,41
Tempo da onda ultra-sônica (μ s) / 180 dias na solução S50	20,24
f_c (MPa) / 28 dias na solução S10	52,75
f_c (MPa) / 180 dias na solução S50	62,50
Porosidade (nm) / 28 dias na solução S10	24,10
Porosidade (nm) / 180 dias na solução S50	28,30
Δ Massa (g) / 28 dias na solução S10	-
Δ Massa (g) / 180 dias na solução S50	-20,00

O concreto feito com cimento CP II E 32 e agregado graúdo de gnaïsse, não contrariou as previsões. Quando submetido à solução S0, por 180 dias, o concreto feito com este cimento, apresentou uma porosidade superficial e uma leitura do tempo da onda ultra-sônica baixas, conseqüentemente refletindo numa resistência à compressão elevada.

Quando submetido à solução S10, por 90 dias, o concreto feito com cimento CP II E 32 e agregado graúdo de gnaïsse, apresentou um substancial aumento do diâmetro dos poros superficiais, acompanhado de uma elevação ligeira da porosidade interna, levando a uma queda da resistência à compressão. O aumento da porosidade superficial do concreto foi mais significativo que o ocorrido internamente. Provavelmente, isso se deva ao fumo de sílica que age reduzindo a permeabilidade da pasta interna, independentemente de reduzir a porosidade total. Somado a isso, deve ter ocorrido a

formação de produtos expansivos resultado de reações entre a pasta de cimento e a solução de sulfato de magnésio.

No caso da solução S50, o concreto feito com cimento CP II E 32 e agregado graúdo de gnaiss, sentiu o efeito da elevada concentração de sulfato da solução, pois em apenas 28 dias, o diâmetro dos poros superficiais dobraram de tamanho, a leitura do tempo da onda ultra-sônica aumentou e a resistência à compressão caiu substancialmente quando comparados à solução S0. Segundo NEVILLE (1997), quando a massa de fumo de sílica corresponde a 10% do material cimentício, metade do material se hidrata após o 1º dia, dois terços após 3 dias, mas somente após 90 dias é que três quartos do material se hidrata. Como o concreto ficou submetido à solução S50 por 28 dias, nem todo o fumo de sílica se hidratou. Sendo assim, tudo leva a crer que, o ataque da solução se processou de forma intensa e provavelmente a degradação do material mostrada pelos números, seja devido à formação de produtos expansivos resultantes de reações entre a solução e a pasta de cimento.

Segundo NEVILLE (1997), o resultado da hidratação de um cimento que contém escória de alto forno é uma maior quantidade de C-S-H, gerando uma microestrutura da pasta de cimento hidratada mais densa. Todavia, a hidratação da escória de alto forno é lenta, uma vez que depende da decomposição da fase vítrea pelos íons de hidroxila, os quais são liberados durante a hidratação do cimento Portland. ROY¹ apud NEVILLE (1987), observou que 30% a 37% da escória de alto forno se hidratam somente após os 28 dias, concluindo que o concreto com esse tipo de cimento atinge resistências maiores em idades mais avançadas.

De acordo com a citação anterior, tudo leva a crer que o comportamento do concreto feito com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo de gnaiss, submetido à solução S0 por 28 dias, foi devido ao fato de que não houve tempo suficiente para que toda a escória do cimento se hidratasse. Por causa disso, as porosidades superficial e interna do concreto mantiveram-se em patamares elevados, refletindo numa resistência à compressão que, embora superior aos 50MPa esperados, poderia ser maior.

¹ Roy, D. M. *Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume*. Coventry, UK, 29pp. (29 April-1 May 1987).

Quando submetido à solução S10, durante 180 dias, o concreto apresentou diminuição em suas porosidades superficial e interna. A resistência à compressão aumentou, se comparada à obtida na solução S0. Provavelmente, tal aumento deve-se às diminuições das porosidades interna e externa, gerando um concreto mais compacto. É possível que também tenha ocorrido a formação de produtos expansivos, produto das reações entre a pasta de cimento e a solução de sulfato de magnésio, levando a crer que este aumento da resistência à compressão não seja real.

Quando submetido à solução S50, durante 90 dias, o concreto apresentou um aumento considerável da porosidade externa e uma diminuição da interna, com conseqüente queda da resistência à compressão. Tal conjunto de informações reforça a idéia de que houve formação de produtos expansivos oriundos de reações entre a pasta de cimento e a solução de $MgSO_4$.

NEVILLE (1997) afirma que, quando a massa de fumo de sílica for de 10% em relação ao total do material cimentício, a hidratação desse material é lenta, hidratando-se apenas três quartos após 90 dias. Tal afirmação reforça a idéia de que, quando submetido à solução S0 por 90 dias, nem todo o fumo de sílica do concreto feito com cimento CP IV 32 se hidratou e por isso a porosidade externa foi alta apesar da interna ter sido baixa. Quanto à resistência a compressão, tudo leva a crer que esta aumentaria com o transcorrer do tempo.

Quanto ao concreto feito com cimento CP IV 32 pozolânico, seu comportamento corresponde ao esperado. Submetido à solução S10, por 28 dias, nota-se que a média dos diâmetros dos poros superficiais do concreto manteve-se elevada, assim como sua porosidade interna (leitura do tempo da onda ultra-sônica). Como dito anteriormente, a reação da pozolana no concreto é lenta, o que leva, inicialmente, a uma elevada permeabilidade; todavia, com o transcorrer do tempo, esta diminui consideravelmente. Somado à pozolana do cimento, este concreto recebeu adição de fumo de sílica em substituição a 10% do peso de cimento. Como já citado 30% a 37% do fumo de sílica hidrata-se somente após 28 dias. Baseando-se em tais afirmações, conclui-se que os 28 dias que o concreto ficou submetido à solução de sulfato de magnésio foram

insuficientes para que a pozolana do cimento e a escória adicionada se hidratassem. Desta forma, o sulfato reagiu com a pasta de cimento formando compostos expansivos e provocando uma ligeira elevação da resistência à compressão.

Quanto à solução S50, vê-se que a solução de $MgSO_4$, durante 180 dias, provocou um aumento do diâmetro médio dos poros do concreto, seguido de uma perda de 20g de massa. Provavelmente, os aumentos das porosidades superficial e interna devem-se à formação de produtos expansivos gerados a partir de reações entre a solução de sulfato de magnésio e a pasta de cimento. Sendo assim, tudo leva a crer que o aumento da resistência à compressão não seja real e sim temporário.

5.2 Análise Estatística das Resistências dos Corpos-de-Prova

5.2.1 Comparações Utilizando Gráficos *Boxplot* e Medidas Descritivas

Na TAB. 5.1 encontram-se as descrições das variáveis utilizadas na análise estatística com suas respectivas unidades de medidas. Neste capítulo, a resistência real e o tempo da onda ultra-sônica, serão chamados de variáveis resposta, pois são as propriedades que se tentam explicar ao se realizar as análises estatísticas. Por sua vez, as demais variáveis do banco de dados, serão denominadas de fatores, visto que são elas que podem influenciar ou não as variáveis resposta.

Os objetivos dessa análise estatística são: fazer uma comparação gráfica considerando os gráficos do tipo *boxplots* das variáveis analisadas e propor um modelo matemático que estime a Resistência Real do concreto, por meio do conhecimento do Tempo da Onda Ultra-Sônica, do Tipo de Cimento, do Tipo de Agregado, da Solução, da Idade e da Resistência Ideal, sendo que para isso seja necessário identificar a influência de cada uma delas.

TABELA 5.1: Descrição das Variáveis Utilizadas na Análise Estatística.

Resistência Real	Medida em MPa
Resistência Ideal	20 MPa e 50 MPa
Tempo da Onda Ultra-Sônica	Medida em μ s
Tipo de Cimento	CPII E 32 (II), CPIII 32 RS (III), CP IV 32 (IV)
Tipo de Agregado	GN, CD,CC
Solução	S0, S10, S50
Idade	28 dias, 90 dias, 180 dias
Máquina	James, Pundit
Transdutor	James: 54 kHz, 150 kHz Pundit: 37 kHz, 54 kHz
Ponto de Medição	Topo, Meio, Base

5.2.2 Variável Resposta – Resistência Real (MPa)

Na FIG. 5.3, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Resistência Real para os três Tipos de Cimento, levando em consideração os níveis da Resistência ideal – 20 MPa e 50 MPa.

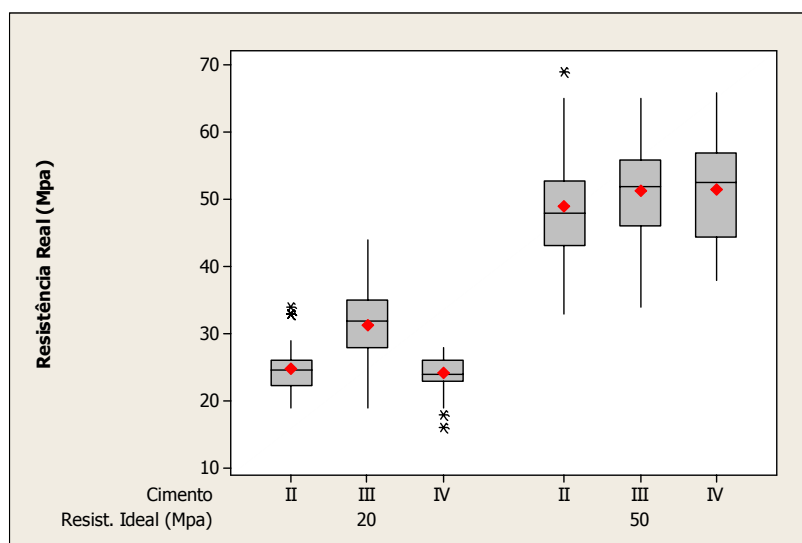


FIGURA 5.3: *Boxplots* para a Resistência Real (MPa) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.2 as medidas descritivas para a Resistência Real (MPa), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Cimento.

TABELA 5.2: Medidas Descritivas para a Resistência Real (MPa) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Cimento	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	II	24,78	24,50	3,91	19	34
	III	31,33	32,00	6,57	19	44
	IV	24,14	24,00	2,74	16	28
50	II	49,00	48,00	8,61	33	69
	III	51,31	52,00	7,16	34	65
	IV	51,50	52,50	7,58	38	66

Na FIG. 5.4, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Resistência Real para os três Tipos de Agregado, levando em consideração os níveis da Resistência

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

ideal – 20 MPa e 50 MPa.

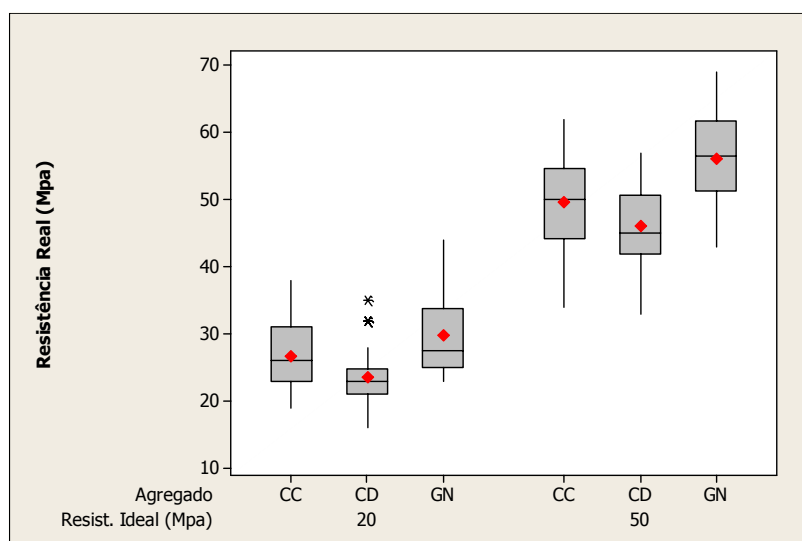


FIGURA 5.4: *Boxplots* para Resistência Real (MPa) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.3 as medidas descritivas para a Resistência Real (MPa), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Agregado.

TABELA 5.3: Medidas Descritivas para a Resistência Real (MPa) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Agregado	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	CC	26,78	26,00	5,00	19	38
	CD	23,61	23,00	4,22	16	35
	GN	29,86	27,50	5,98	23	44
50	CC	49,69	50,00	7,23	34	62
	CD	46,03	45,00	6,13	33	57
	GN	56,08	56,50	6,61	43	69

Na FIG. 5.5, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Resistência Real para as três Soluções, levando em consideração as Idades – 28 dias, 90 dias e 180 dias para uma Resistência Ideal de 20 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

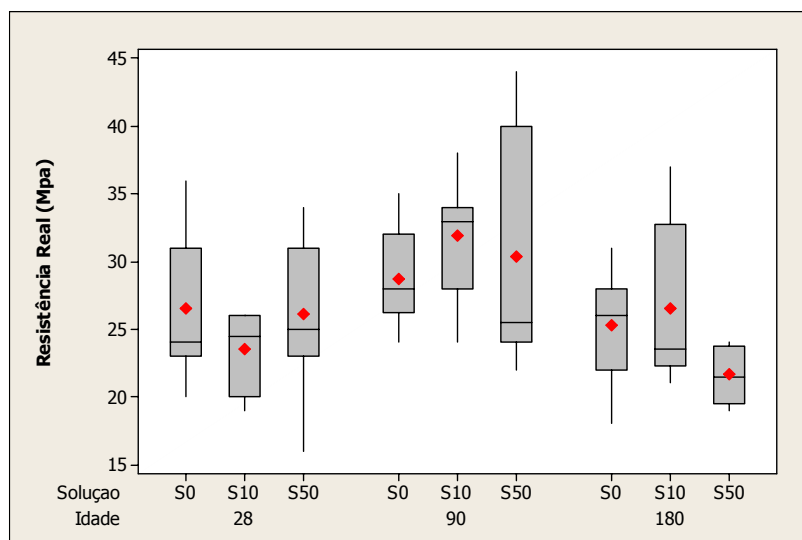


FIGURA 5.5: *Boxplots* para a Resistência Real (MPa) Estratificado por Idade e Solução (Resistência Ideal igual a 20 MPa).

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.4 as medidas descritivas para a Resistência Real (MPa), discriminando-se a Idade (dias) e a Solução para a Resistência Ideal de 20 MPa.

TABELA 5.4: Medidas Descritivas para a Resistência Real (MPa) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 20 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	26,58	24,00	5,25	20	36
	S10	23,50	24,50	3,00	19	26
	S50	26,17	25,00	5,22	16	34
90	S0	28,75	28,00	3,33	24	35
	S10	31,92	33,00	4,23	24	38
	S50	30,33	25,50	8,62	22	44
180	S0	25,25	26,00	4,25	18	31
	S10	26,58	23,50	5,88	21	37
	S50	21,67	21,50	1,97	19	24

Na FIG. 5.6, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Resistência Real para as três Soluções, levando em consideração as Idades – 28 dias, 90 dias e 180 dias para uma Resistência Ideal de 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

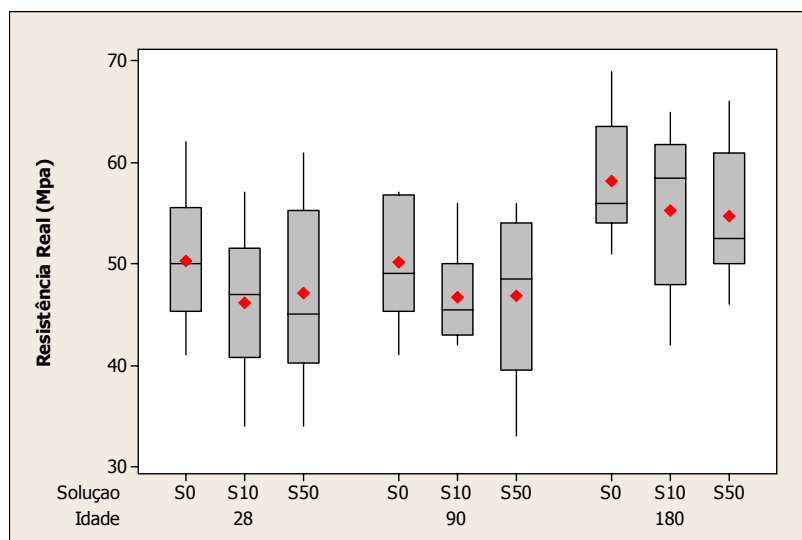


FIGURA 5.6: *Boxplots* para a Resistência Real (MPa) Estratificado por Idade e Solução (Resistência Ideal igual a 50 MPa).

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.5 as medidas descritivas para a Resistência Real (MPa), discriminando-se a Idade (dias) e a Solução para a Resistência Ideal de 50 MPa.

TABELA 5.5: Medidas Descritivas para a Resistência Real (MPa) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 50MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	50,25	50,00	6,15	41	62
	S10	46,17	47,00	6,62	34	57
	S50	47,08	45,00	8,96	34	61
90	S0	50,17	49,00	5,97	41	57
	S10	46,75	45,50	4,49	42	56
	S50	46,83	48,50	8,53	33	56
180	S0	58,17	56,00	5,97	51	69
	S10	55,33	58,50	7,55	42	65
	S50	54,67	52,50	6,30	46	66

5.2.3 Variável Resposta – Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s)

Na FIG. 5.7, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para os três Tipos de Cimento, levando em consideração as

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa.

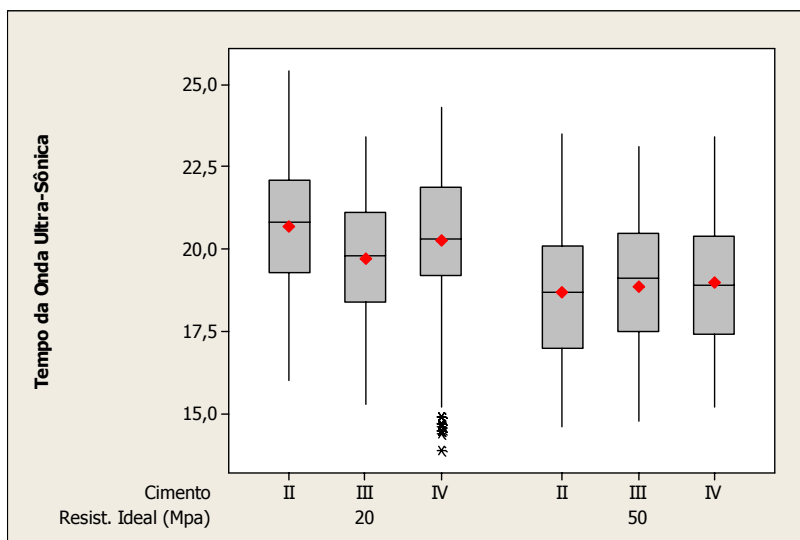


FIGURA 5.7: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.6 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Cimento.

TABELA 5.6: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Cimento	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	II	20,67	20,80	1,85	16,0	25,4
	III	19,72	19,80	1,78	15,3	23,4
	IV	20,27	20,30	1,96	13,9	24,3
50	II	18,67	18,70	1,90	14,6	23,5
	III	18,87	19,10	1,97	14,8	23,1
	IV	19,00	18,90	1,87	15,2	23,4

Na FIG. 5.8, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para os três Tipos de Agregado, levando em consideração as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

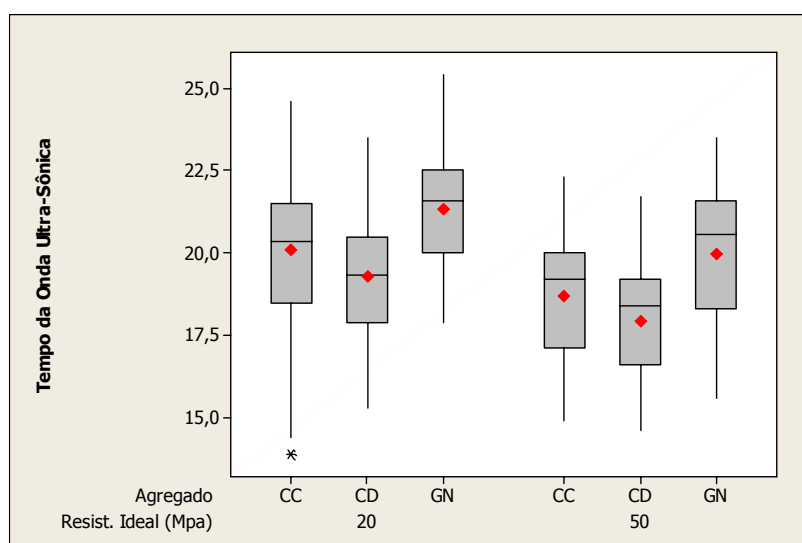


FIGURA 5.8: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.7 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Agregado.

TABELA 5.7: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Agregado	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	CC	20,09	20,35	1,94	13,9	24,6
	CD	19,28	19,35	1,63	15,3	23,5
	GN	21,32	21,60	1,54	17,9	25,4
50	CC	18,68	19,20	1,70	14,9	22,3
	CD	17,92	18,40	1,59	14,6	21,7
	GN	19,95	20,55	1,87	15,6	23,5

Na FIG. 5.9, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para as três Soluções, levando em consideração as Idades – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para uma Resistência Ideal de 20 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

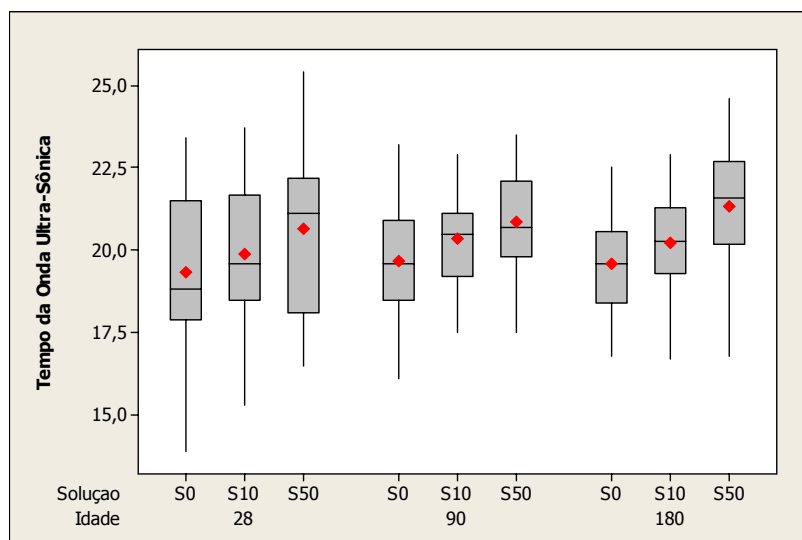


FIGURA 5.9: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Solução e Idade (Resistência Ideal igual a 20 MPa).

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.8 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Solução e a Idade para a Resistência Ideal de 20 MPa.

TABELA 5.8: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 20 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	19,32	18,80	2,30	13,9	23,4
	S10	19,89	19,60	1,98	15,3	23,7
	S50	20,66	21,10	2,33	16,5	25,4
90	S0	19,66	19,60	1,81	16,1	23,2
	S10	20,33	20,50	1,37	17,5	22,9
	S50	20,85	20,70	1,45	17,5	23,5
180	S0	19,59	19,60	1,47	16,8	22,5
	S10	20,23	20,25	1,42	16,7	22,9
	S50	21,33	21,60	1,85	16,8	24,6

Na FIG. 5.10, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para as três Soluções, levando em consideração as Idades – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para uma Resistência Ideal de 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

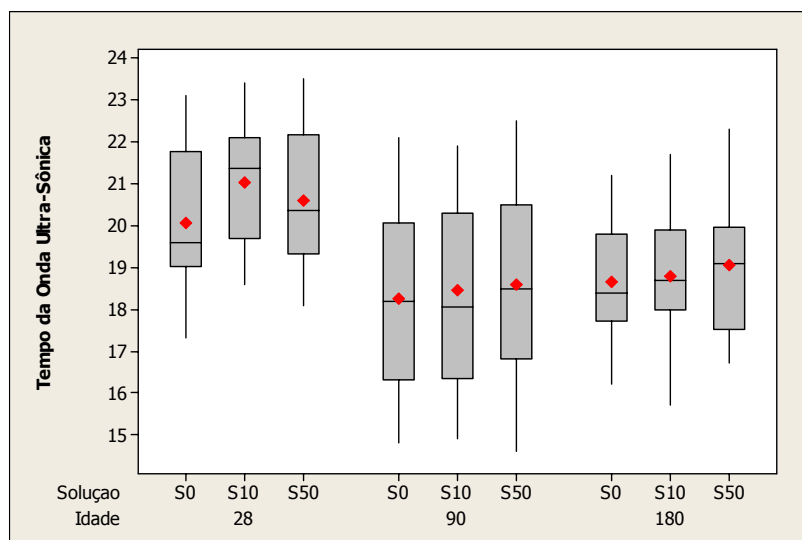


FIGURA 5.10: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Solução e Idade (Resistência Ideal igual a 50 MPa).

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.9 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Solução e a Idade para a Resistência Ideal de 50 MPa.

TABELA 5.9: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 50 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	20,07	19,60	1,46	17,3	23,1
	S10	21,04	21,35	1,33	18,6	23,4
	S50	20,58	20,35	1,57	18,1	23,5
90	S0	18,26	18,20	2,18	14,8	22,1
	S10	18,45	18,05	2,12	14,9	21,9
	S50	18,59	18,50	2,19	14,6	22,5
180	S0	18,67	18,40	1,27	16,2	21,2
	S10	18,80	18,70	1,49	15,7	21,7
	S50	19,04	19,10	1,56	16,7	22,3

Na FIG. 5.11, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para os quatro Transdutores, levando em consideração as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

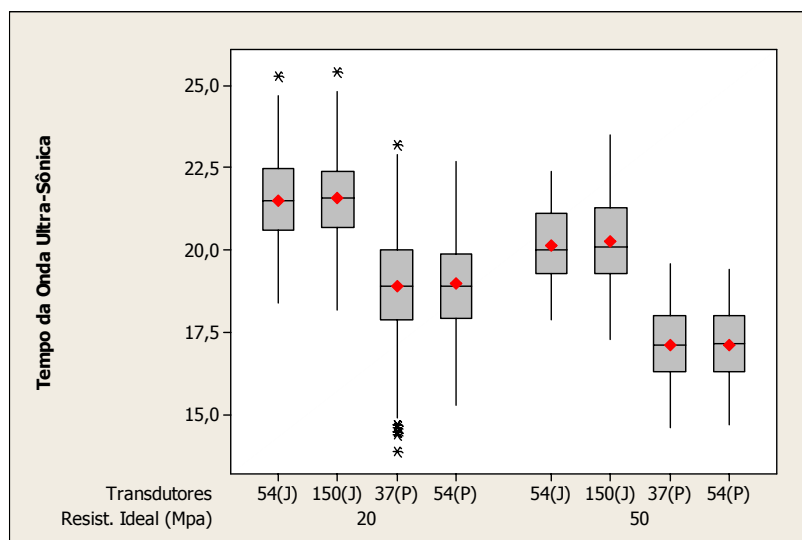


FIGURA 5.11: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Transdutores.

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.10 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal e a Frequência do Transdutor.

TABELA 5.10: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Frequência do Transdutor.

Resist. Ideal (MPa)	Transdutor	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	54 (JAMES)	21,49	21,50	1,29	18,4	25,3
	150 (JAMES)	21,57	21,60	1,28	18,2	25,4
	37 (PUNDIT)	18,93	18,90	1,61	13,9	23,2
	54 (PUNDIT)	18,98	18,90	1,40	15,3	22,7
50	54 (JAMES)	20,15	20,00	1,07	17,9	22,4
	150 (JAMES)	20,27	20,10	1,25	17,3	23,5
	37 (PUNDIT)	17,14	17,10	1,10	14,6	19,6
	54 (PUNDIT)	17,13	17,15	1,10	14,7	19,4

Na FIG. 5.12, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para as duas Máquinas – PUNDIT e JAMES, levando em consideração as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

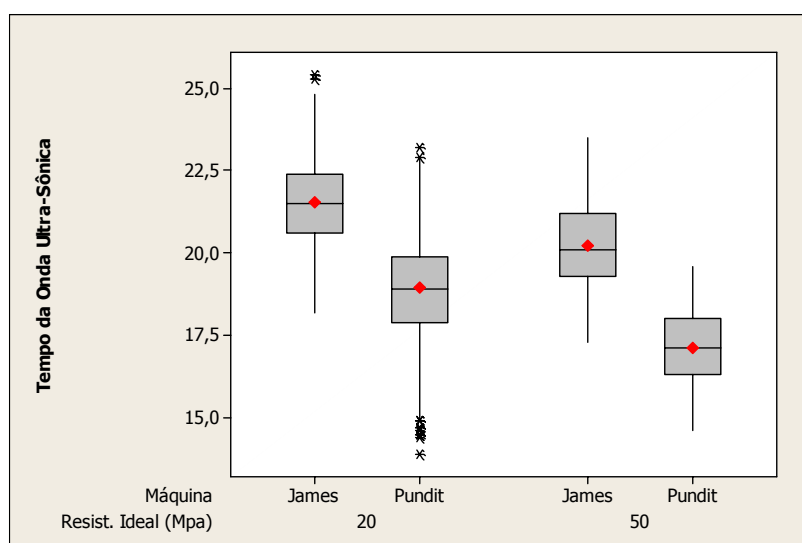


FIGURA 5.12: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Máquina.

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.11 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal e a Máquina.

TABELA 5.11: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Máquina.

Resist. Ideal (MPa)	Máquina	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	JAMES	21,53	21,50	1,28	18,2	25,4
	PUNDIT	18,95	18,90	1,51	13,9	23,2
50	JAMES	20,22	20,10	1,18	17,3	23,5
	PUNDIT	17,13	17,10	1,10	14,6	19,6

Na FIG. 5.13, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-Sônica para os três Pontos de Medição, levando em consideração as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

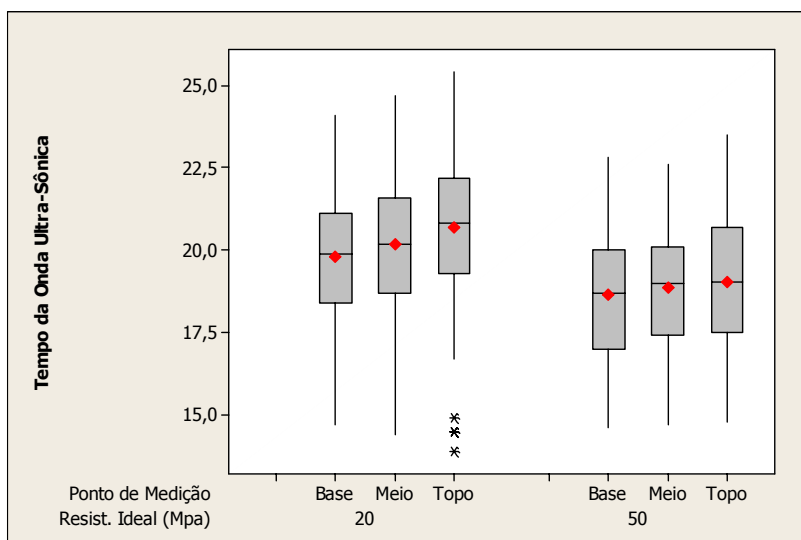


FIGURA 5.13: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Ponto de Medição.

Complementarmente são apresentadas na TAB.5.12 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal e o Ponto de Medição.

TABELA 5.12: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Ponto de Medição.

Resist. Ideal (MPa)	Ponto de Medição	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	Base	19,80	19,90	1,86	14,7	24,1
	Meio	20,18	20,20	1,88	14,4	24,7
	Topo	20,67	20,80	1,87	13,9	25,4
50	Base	18,65	18,70	1,93	14,6	22,8
	Meio	18,86	19,00	1,84	14,7	22,6
	Topo	19,03	19,05	1,97	14,8	23,5

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = "outliers" (valores discrepantes).

5.2.4 Análise de Variância – Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica

A análise de variância é uma ferramenta estatística que permite concluir, com um grau de confiança pré-determinado se existem ou não diferenças entre as médias de mais de duas populações. Essa 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): pelo menos uma média é diferente das demais.

Uma das formas de concluir esse teste é por meio da probabilidade de significância (*p-valor*). Esta mede 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% ($\alpha = 0,05$). Isto representa a probabilidade de se rejeitar H_0 quando ela é verdadeira. Sendo assim, utiliza-se a seguinte regra de decisão:

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

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

Logo, o nível de confiança associado ao teste é de 95%.

A TAB. 5.13 mostra a análise de variância para as medidas de tempo da onda ultra-sônica (μ s) dos corpos-de-prova considerando Resistência Ideal de 20 MPa. Analisando os dados, verifica-se que com exceção do Transdutor (máquina) (*p-valor* = 0,295), todos as outras variáveis tiveram um *p-valor* menor que 0,05. Isto significa que não há diferença significativa entre os transdutores dentro de cada máquina, ou seja, utilizando-se o transdutor de 54 kHz ou de 150 kHz para o aparelho JAMES, não há diferença significativa da leitura do aparelho. O mesmo raciocínio se aplica para o aparelho PUNDIT, isto é, não há diferença significativa da leitura do tempo da onda ultra-sônica entre os transdutores de 37 kHz ou 54 kHz, como é visto na FIG. 5.11.

TABELA 5.13: Análise de Variância para as Medidas de Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F_0	p -valor
Cimento	2	203,01	101,50	165,65	0,000
Agregado	2	921,77	460,88	752,16	0,000
Solução	2	410,39	205,19	334,88	0,000
Idade	2	22,56	11,28	18,41	0,000
Máquina	1	2107,34	2107,34	3439,18	0,000
Transdutor (Máquina)	2	1,50	0,75	1,22	0,295
Ponto de Medição	2	161,65	80,82	131,91	0,000
Erro	1258	770,83	0,61		
Total	1271				

O tipo de cimento, o tipo de agregado, a concentração da solução de sulfato, a idade de ensaio, a máquina empregada (aparelho de ultra-sonografia) e o ponto de medição, apresentaram um p -valor menor que 0,05, indicando que influenciam no tempo da onda ultra-sônica.

Com o objetivo de verificar como ocorrem essas diferenças foi utilizado o Teste de Tukey. Esse procedimento é utilizado para comparar todos os pares de médias mantendo um nível de significância conjunto pré-estabelecido. Para cada variável as seguintes hipóteses são testadas:

Hipótese Nula (H_0): não existe diferença entre a resposta média para dois níveis específicos da variável.

Hipótese Alternativa (H_1): existe diferença entre a resposta média para dois níveis específicos da variável.

Os resultados desses testes são apresentados no Anexo D. Com base nesses resultados conclui-se que os três Tipos de Cimento diferem significativamente entre si, uma vez que para todos os testes o p -valor foi menor que 0,05. O mesmo acontece com as outras variáveis, com exceção da variável Idade, onde o teste não detectou uma diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica para as idades de 90 e 180 dias.

O fato de a máquina influenciar o tempo da onda ultra-sônica, significa que as leituras realizadas pelo aparelho JAMES não são iguais às do PUNDIT e vice-versa, o que é mostrado na FIG. 5.12. No caso do ponto de medição, significa dizer que houve diferença entre os pontos medidos no corpo de prova – topo, meio e base, representado graficamente na FIG. 5.13.

A TAB. 5.14 mostra a análise de variância para as medidas do Tempo da Onda Ultra-Sônica para os corpos-de-prova cuja Resistência Ideal é de 50MPa. Novamente, constata-se que a variável Transdutor ($p\text{-valor} = 0,894$) apresentou um valor superior a 0,05, indicando que não há diferença significativa entre os transdutores de uma mesma máquina. Contudo, há diferença significativa entre as máquinas – JAMES e PUNDIT. Isto quer dizer que não ocorrem diferenças na leitura do tempo da onda ultra-sônica quando são usados transdutores diferentes para o mesmo aparelho, mas estas acontecem, quando são usados transdutores iguais em aparelhos diferentes, como por exemplo, dois transdutores de 54 kHz fornecerem resultados distintos se um deles pertencer ao aparelho PUNDIT e o outro ao JAMES.

TABELA 5.14: Análise de Variância para as Medidas de Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 50 MPa.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F ₀	<i>p-valor</i>
Cimento	2	17,59	8,80	17,49	0,000
Agregado	2	680,97	340,49	677,19	0,000
Solução	2	23,47	11,73	23,34	0,000
Idade	2	49,75	24,87	49,47	0,000
Máquina	1	944,90	1944,90	3868,19	0,000
Transdutor (Máquina)	2	0,11	0,06	0,11	0,894
Ponto de Medição	2	23,50	11,75	23,37	0,000
Erro	958	481,68	0,50		
Total	971				

Os resultados do Teste de Tukey apresentados no Anexo D, indicaram que não existe diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica apenas entre os Cimentos III e IV. Já para a variável Agregado, detectou-se que os três tipos diferem entre si. No caso da variável Solução, os testes indicaram que não existe diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica para as Soluções S10 e S50.

Para o restante das variáveis, foram detectadas diferenças significativas entre todos os níveis.

Sendo assim, um fato que merece destaque é que os pontos de medição não oferecem o mesmo resultado. Isto quer dizer que há diferença significativa quando a leitura é feita no topo, no meio e na base do corpo-de-prova, indicando que ocorre um desgaste diferenciado ao longo deste, ou que a leitura do UPV pode ser influenciada pela posição relativa dos transdutores.

5.2.5 Análise de Variância e Modelo de Regressão Linear – Variável Resposta Resistência Real

Estatisticamente, o objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático que estime a Resistência Real do concreto por meio do conhecimento das variáveis estudadas. Em virtude do fato de que, na seção anterior, os transdutores não apresentaram diferenças significativas por máquina, serão tomadas as médias de 6 medidas, uma para cada aparelho.

Desta forma, será feita uma análise para cada máquina, considerando-se as duas Resistências Ideais de 20MPa e 50MPa conjuntamente para cada idade.

Para as variáveis categóricas incluídas no estudo, foram criadas variáveis indicadoras a serem utilizadas no modelo de regressão que serão apresentadas a seguir.

TABELA 5.15: Variáveis Categóricas Incluídas no Estudo.

Codificações		Representação
Cimento III 0 1 0	Cimento IV 0 0 1	Representação do Cimento II Representação do Cimento III Representação do Cimento IV
Agregado CD 0 1 0	Agregado CC 0 0 1	Representação do Agregado GN Representação do Agregado CD Representação do Agregado CC
Solução S0 0 1 0	Solução S10 0 0 1	Representação da Solução S50 Representação da Solução S0 Representação da Solução S10
Ponto Meio 0 1 0	Ponto Base 0 0 1	Representação do Topo Representação da Meio Representação da Base
Máquina PUNDIT 0 1		Representação da Máquina JAMES Representação da Máquina PUNDIT

Quando pelo menos uma variável indicadora é significativa para o modelo, todas as demais variáveis indicadoras referentes à variável explicativa devem ser incorporadas ao modelo.

O QUADRO 5.27 apresenta o modelo matemático para a determinação da Resistência Real (MPa) dos corpos-de-prova de concreto considerando as Resistências Ideais de 20MPa e 50MPa para a máquina JAMES, aos 28 dias. Este modelo apresenta um coeficiente de determinação de 86%, ou seja, o modelo ajustado explica cerca de 86% da variabilidade da Resistência Real dos corpos-de-prova.

QUADRO 5.27: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e idade de 28 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = 15,5 - 5,88*\text{Agregado CC} - 9,13*\text{Agregado CD} + 0,747*\text{Resistência Ideal (MPa)}$$

Na TAB. 5.16 é apresentada a análise de variância e as estimativas dos coeficientes do modelo de regressão linear para a Resistência Real (MPa) dos corpos-de-prova considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa e máquina JAMES, aos 28 dias.

TABELA 5.16: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e Idade de 28 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	<i>p-valor</i>
Constante	15,47200	1,67800	9,22	0,000
Agregado CC	-5,87500	1,41500	-4,15	0,000
Agregado CD	-9,12500	1,41500	-6,45	0,000
Resistência Ideal (MPa)	0,74722	0,03850	19,41	0,000

Nota-se que apenas o tipo de agregado influencia a Resistência Real, aos 28 dias, utilizando-se o aparelho de ultra-sonografia JAMES. O que significa dizer que nesta idade, o cimento e a solução onde os corpos-de-prova estavam inseridos não influenciam a Resistência Real.

No caso do aparelho PUNDIT, aos 28 dias, o modelo de regressão linear é diferente, como é mostrado no QUADRO 5.28 e na TAB. 5.17, apresentando um coeficiente de determinação de 68%.

QUADRO 5.28: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 28 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = 26,8 + 5,25*\text{Cimento III} + 0,25*\text{Cimento IV} - 1,42*\text{Agregado CC} - 6,08*\text{Agregado CD} + 0,42*\text{Solução S0} - 2,67*\text{Solução S10}$$

TABELA 5.17: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 28 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	<i>p</i> -valor
Constante	26,83300	1,28900	20,81	0,000
Cimento III	5,25000	1,19400	4,40	0,000
Cimento IV	0,25000	1,19400	0,21	0,836
Agregado CC	-1,41700	1,19400	-1,19	0,245
Agregado CD	-6,08300	1,19400	-5,10	0,000
Solução S0	0,41700	1,19400	0,35	0,730
Solução S10	-2,66700	1,19400	-2,23	0,033

No caso do aparelho PUNDIT, a Resistência Real do concreto, aos 28 dias, é sensível ao tipo de cimento, ao tipo de agregado e à solução em que estava inserido, uma vez que os valores dos *p*-valor são menores que 0,05.

Para a idade de 90 dias, utilizando-se o aparelho JAMES, nota-se que o cimento passa a ter uma significância sobre a Resistência Real, como é mostrado no QUADRO 5.29 e pela TAB. 5.18, apresentando um coeficiente de determinação de 82%.

QUADRO 5.29: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e Idade de 90 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = 18,6 + 7,83*\text{Cimento III} + 1,42*\text{Cimento IV} - 3,29*\text{Agregado CC} - 5,83*\text{Agregado CD} + 0,586*\text{Resistência Ideal (MPa)}$$

TABELA 5.18: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e Idade de 90 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	<i>p</i> -valor
Constante	18,56900	1,78800	10,39	0,000
Cimento III	7,83300	1,35500	5,78	0,000
Cimento IV	1,41700	1,35500	1,05	0,300
Agregado CC	-3,29200	1,35500	-2,43	0,018
Agregado CD	-5,83300	1,35500	-4,31	0,000
Resistência Ideal (MPa)	0,58611	0,03687	15,89	0,000

O fato do Cimento IV apresentar um valor superior a 0,05 e ainda assim estar presente no modelo de regressão linear tem a mesma justificativa citada anteriormente.

Para o aparelho PUNDIT, aos 90 dias, assim como para o JAMES, o tipo de cimento também é significativo na Resistência Real do concreto. Entretanto, o tempo médio da onda ultra-sônica e o tipo de solução à qual o concreto esteve exposto também são significativos para a Resistência Real, utilizando-se o aparelho PUNDIT. Uma diferença em relação ao modelo sugerido, quando se utiliza o aparelho JAMES, é o fato do tipo de agregado não ser significativo para a resistência quando o aparelho é o PUNDIT, como mostra o QUADRO 5.30 e na TAB. 5.19, com um coeficiente de determinação de 84%.

QUADRO 5.30: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 90 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = -50,2 + 3,05 * \text{Tempo Médio da Onda US} + 9,30 * \text{Cimento III} + 0,94 * \text{Cimento IV} + 3,56 * \text{Solução S0} + 1,66 * \text{Solução S10} + 0,850 * \text{Resistência Ideal (MPa)}$$

TABELA 5.19: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 90 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	p-valor
Constante	-50,23	13,52	-3,71	0,000
Tempo Médio da Onda US	3,05190	0,62750	4,86	0,000
Cimento III	9,30000	1,35400	6,87	0,000
Cimento IV	0,94400	1,32400	0,71	0,478
Solução S0	3,56400	1,43100	2,49	0,015
Solução S10	1,66100	1,33300	1,25	0,217
Resistência Ideal (MPa)	0,84952	0,06499	13,07	0,000

Na idade de 180 dias, utilizando o aparelho JAMES, o modelo de regressão linear é mais completo que os dois anteriores, como pode ser visto no QUADRO 5.31 e na TAB. 5.20, apresentando um coeficiente de determinação de 95%.

QUADRO 5.31: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e Idade de 180 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = 52,6 - 1,97*\text{Tempo Médio da Onda US} + 2,81*\text{Cimento III} + 2,21*\text{Cimento IV} - 7,08*\text{Agregado CC} - 13,2*\text{Agregado CD} + 0,957*\text{Resistência Ideal (MPa)}$$

TABELA 5.20: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina JAMES e Idade de 180 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	p-valor
Constante	52,59	14,6800	3,58	0,001
Tempo Médio da Onda US	-1,9683	0,6235	-3,16	0,002
Cimento III	2,8060	1,1150	2,52	0,014
Cimento IV	2,2150	1,1040	2,01	0,049
Agregado CC	-7,0820	1,2790	-5,54	0,000
Agregado CD	-13,1950	1,6090	-8,20	0,000
Resistência Ideal (MPa)	0,95654	0,04259	22,46	0,000

O modelo de regressão linear, para o aparelho PUNDIT, aos 180 dias, tem os mesmos coeficientes de influência sobre a Resistência Real do concreto que o aparelho JAMES, inclusive apresentando o mesmo coeficiente de determinação de 95%. Tal semelhança pode ser vista no QUADRO 5.32 e na TAB. 5.21.

QUADRO 5.32: Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 180 dias.

$$\text{Resistência Real(MPa)} = 49,0 - 1,99*\text{Tempo Médio da Onda US} + 2,86*\text{Cimento III} + 2,78*\text{Cimento IV} - 6,80*\text{Agregado CC} - 13,3*\text{Agregado CD} + 0,943*\text{Resistência Ideal (MPa)}$$

TABELA 5.21: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para a Resistência Real (MPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, Máquina PUNDIT e Idade de 180 dias.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	<i>p</i> -valor
Constante	49,04000	13,16000	3,73	0,000
Tempo Médio da Onda US	-1,99210	0,61230	-3,25	0,002
Cimento III	2,86000	1,10700	2,58	0,012
Cimento IV	2,78100	1,11500	2,49	0,015
Agregado CC	-6,79700	1,22500	-5,55	0,000
Agregado CD	-13,30200	1,60400	-8,29	0,000
Resistência Ideal (MPa)	0,94262	0,04497	20,96	0,000

5.3 Análise Estatística do Módulo de Elasticidade Dinâmico dos Corpos-de-Prova

5.3.1 Comparações Gráficas Utilizando Gráficos *Boxplot*

Assim como descrito na seção 5.2, os gráficos *boxplot* têm o objetivo de comparar graficamente os níveis dos fatores, fornecendo as medidas descritivas para as variáveis resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico e Tempo da Onda Ultra-sônica. A descrição das variáveis utilizadas nesta análise é apresentada na TAB. 5.22.

TABELA 5.22: Descrição das Variáveis Utilizadas na Análise Estatística.

Módulo de Elasticidade Dinâmico	Medida em GPa
Tempo da onda ultra-sônica	Medida em μ s
Tipo de cimento	CPII E 32 (II), CPIII 32 RS (III), CP IV 32 (IV)
Tipo de agregado	GN, CD,CC
Solução	S0, S10, S50
Idade	28 dias, 90 dias, 180 dias
Máquina	James, Pundit
Transdutor	James: 54 kHz, 150 kHz Pundit: 37 kHz, 54 kHz
Ponto de Medição	Topo, Meio, Base
Resistência Ideal	20 MPa, 50 MPa

5.3.2 Variável Resposta – Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)

Na FIG. 5.14, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico para os três Tipos de Cimento, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

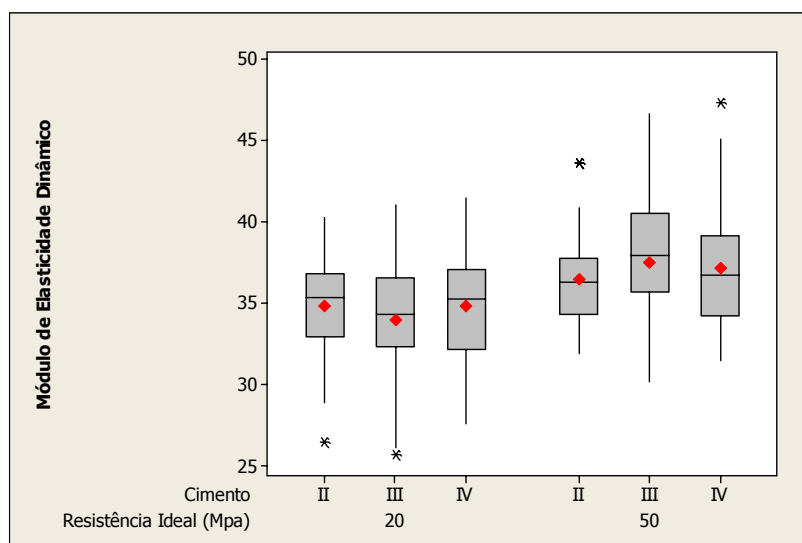


FIGURA 5.14: *Boxplots* para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.23 as medidas descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Cimento.

TABELA 5.23: Medidas Descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Cimento	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	II	34,83	35,35	3,11	26,50	40,30
	III	33,99	34,35	3,63	25,70	41,00
	IV	34,79	35,25	3,51	27,60	41,50
50	II	36,51	36,30	2,85	31,90	43,60
	III	37,51	37,90	3,85	30,20	46,60
	IV	37,16	36,75	3,80	31,50	47,30

Na FIG. 5.15, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Módulo

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

de Elasticidade Dinâmica para os três Tipos de Agregado, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

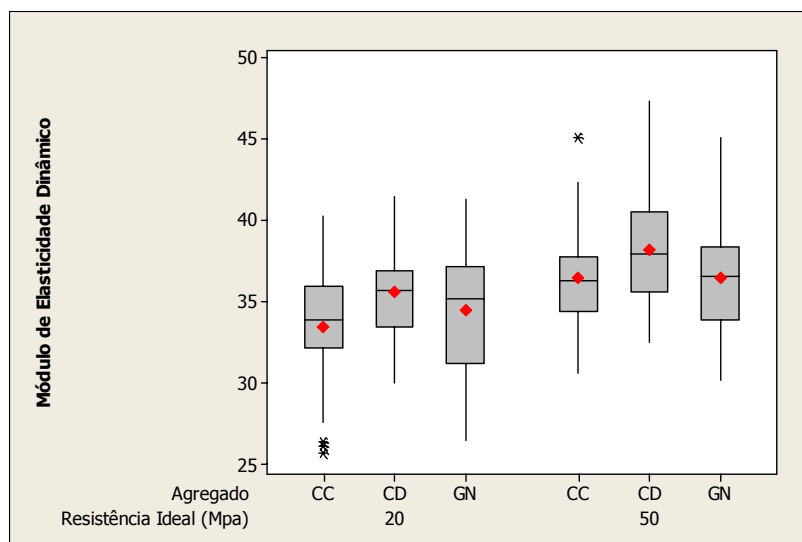


FIGURA 5.15: *Boxplots* para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.24 as medidas descritivas para a Resistência Real (MPa), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Agregado.

TABELA 5.24: Medidas Descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Agregado	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	CC	33,48	33,90	3,61	25,70	40,30
	CD	35,64	35,70	2,81	30,00	41,50
	GN	34,49	35,15	3,51	26,50	41,30
50	CC	36,45	36,30	3,24	30,60	45,10
	CD	38,24	37,95	3,74	32,50	47,30
	GN	36,50	36,55	3,36	30,20	45,10

Na FIG. 5.16, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico para as três Soluções, levando em consideração os níveis da Idade – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para os corpos-de-prova com Resistência Ideal de 20 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

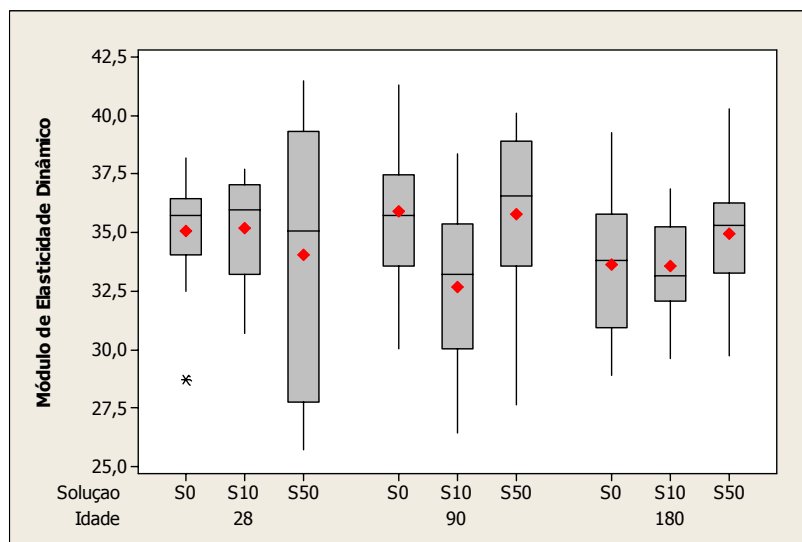


FIGURA 5.16: *Boxplots* para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificado por Idade e Solução (Resistência Ideal igual a 20 MPa).

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.25 as medidas descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa), discriminando-se a Solução e a Idade para a Resistência Ideal de 20 MPa.

TABELA 5.25: Medidas Descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificadas por Idade e Solução (Resistência Ideal igual a 20 MPa).

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	35,07	35,75	2,48	28,7	38,2
	S10	35,19	36,00	2,28	30,7	37,7
	S50	34,05	35,10	5,64	25,7	41,5
90	S0	35,89	35,75	3,22	30,0	41,3
	S10	32,68	33,20	3,67	26,4	38,4
	S50	35,79	36,55	3,64	27,6	40,1
180	S0	33,63	33,80	3,10	28,9	39,3
	S10	33,56	33,15	2,17	29,6	36,9
	S50	34,96	35,30	2,90	29,7	40,3

Na FIG. 5.17, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico e as três Soluções, levando em consideração os níveis da Idade – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para os corpos-de-prova com Resistência Ideal de 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

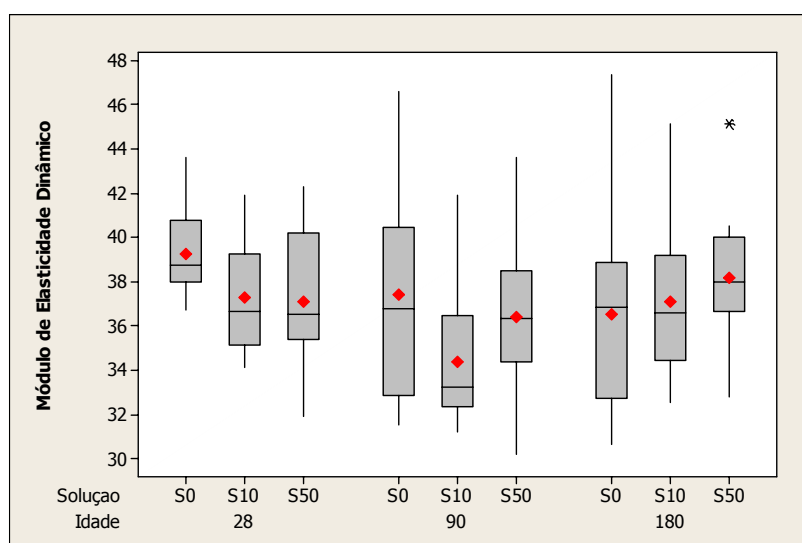


FIGURA 5.17: *Boxplots* para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificado por Idade e Solução (Resistência Ideal igual a 50 MPa).

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.26 as medidas descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa), discriminando-se a Solução e a Idade para a Resistência Ideal de 50 MPa.

TABELA 5.26: Medidas Descritivas para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 50 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	39,23	38,70	1,91	36,7	43,6
	S10	37,26	36,65	2,57	34,1	41,9
	S50	37,08	36,50	3,03	31,9	42,3
90	S0	37,39	36,75	4,71	31,5	46,6
	S10	34,39	33,25	3,07	31,2	41,9
	S50	36,41	36,30	3,46	30,2	43,6
180	S0	36,53	36,80	4,58	30,6	47,3
	S10	37,11	36,60	3,49	32,5	45,1
	S50	38,17	37,95	3,04	32,8	45,1

Os resultados médios apresentados para a solução S0, estão em conformidade com os valores obtidos por GARDNER (1990) para as mesmas resistências (20MPa e 50MPa).

5.3.3 Variável Resposta – Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s)

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

Na FIG. 5.18, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para os três Tipos de Cimento, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal (MPa) – 20 MPa e 50 MPa, para os 216 corpos-de-prova ensaiados simultaneamente para obtenção do E_d e UPV.

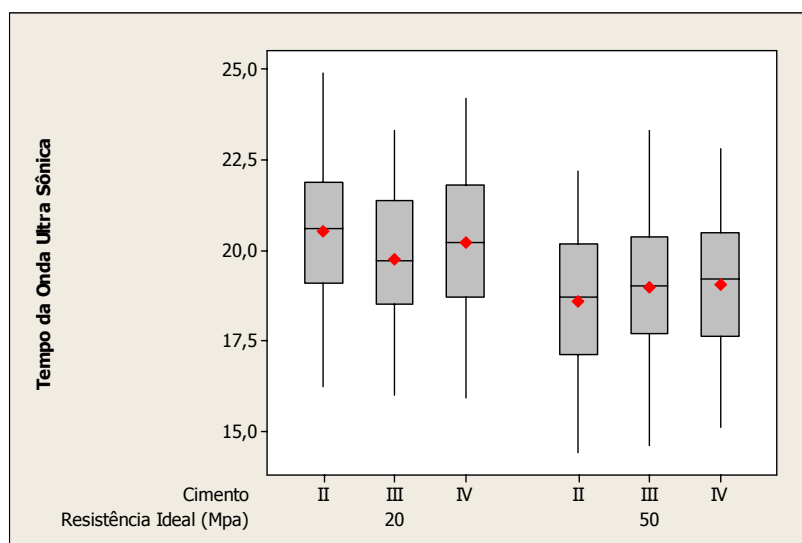


FIGURA 5.18: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.27 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s), discriminando-se a Resistência Ideal e o Tipo de Cimento.

TABELA 5.27: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Cimento.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Cimento	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	II	20,51	20,60	1,88	16,2	24,9
	III	19,73	19,70	1,77	16,0	23,3
	IV	20,20	20,20	1,95	15,9	24,2
50	II	18,57	18,70	1,87	14,4	22,2
	III	18,96	19,00	1,91	14,6	23,3
	IV	19,05	19,20	1,79	15,1	22,8

Na FIG. 5.19, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

Onda Ultra-sônica para os três Tipos de Agregado, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

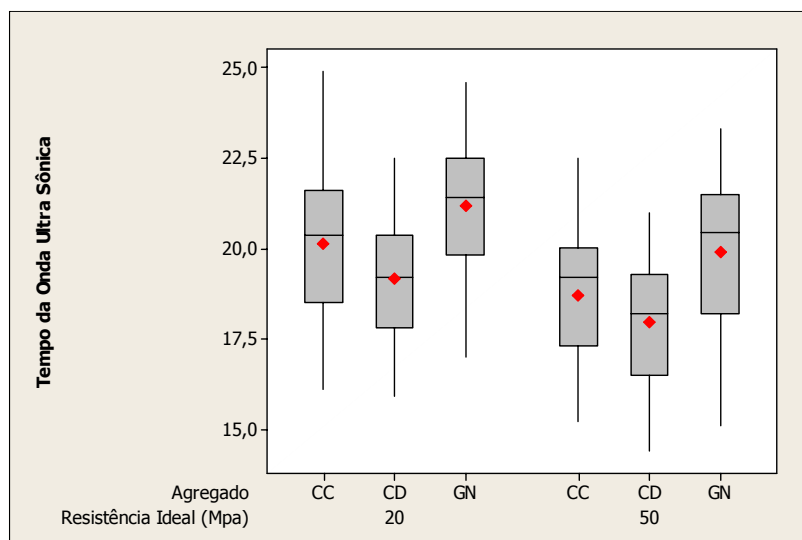


FIGURA 5.19: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.28 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Tipo de Agregado.

TABELA 5.28: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Tipo de Agregado.

Resist. Ideal (MPa)	Tipo de Agregado	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	CC	20,15	20,35	1,86	16,1	24,9
	CD	19,15	19,20	1,60	15,9	22,5
	GN	21,18	21,40	1,64	17,0	24,6
50	CC	18,70	19,20	1,62	15,2	22,5
	CD	17,97	18,20	1,60	14,4	21,0
	GN	19,91	20,45	1,83	15,1	23,3

Na FIG. 5.20, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para as três Soluções, levando em consideração os níveis da Idade (dias) – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para a Resistência Ideal de 20 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

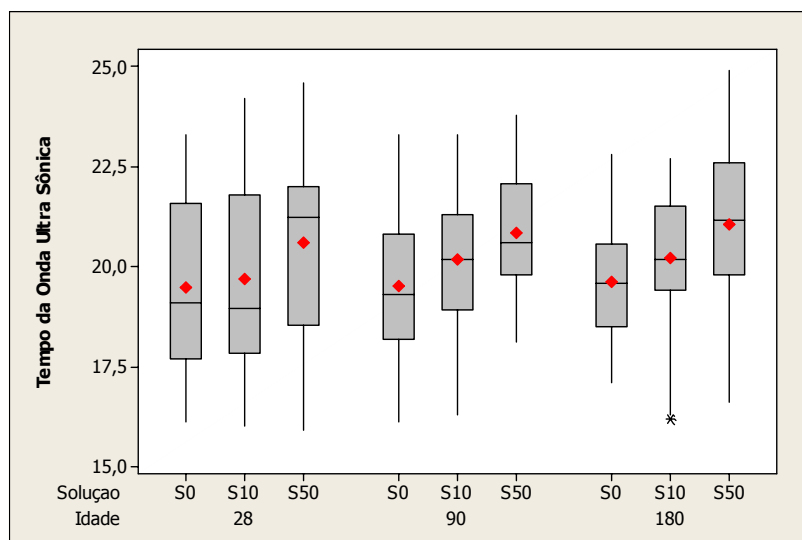


FIGURA 5.20: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Solução e Idade (Resistência Ideal igual a 20 MPa).

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.29 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Solução e a Idade para a Resistência Ideal de 20 MPa.

TABELA 5.29: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 20 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	19,48	19,10	2,16	16,1	23,3
	S10	19,70	18,95	2,22	16,0	24,2
	S50	20,61	21,25	2,29	15,9	24,6
90	S0	19,53	19,30	1,84	16,1	23,3
	S10	20,17	20,20	1,46	16,3	23,3
	S50	20,84	20,60	1,37	18,1	23,8
180	S0	19,64	19,60	1,46	17,1	22,8
	S10	20,23	20,20	1,45	16,2	22,7
	S50	21,05	21,15	1,85	16,6	24,9

Na FIG. 5.21, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para as três Soluções, levando em consideração os níveis da Idade (dias) – 28 dias, 90 dias e 180 dias, para a Resistência Ideal de 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

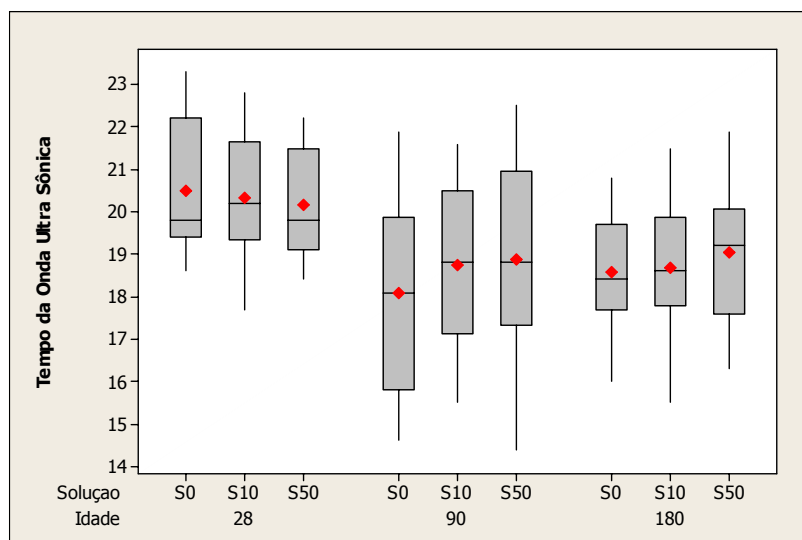


FIGURA 5.21: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Solução e Idade (Resistência Ideal igual a 50 MPa).

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.30 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Solução e Idade para a Resistência Ideal de 50 MPa.

TABELA 5.30: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Idade e Solução para a Resistência Ideal de 50 MPa.

Idade (dias)	Tipo de Solução	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
28	S0	20,51	19,80	1,47	18,6	23,3
	S10	20,35	20,20	1,41	17,7	22,8
	S50	20,18	19,80	1,25	18,4	22,2
90	S0	18,10	18,10	2,20	14,6	21,9
	S10	18,75	18,80	1,87	15,5	21,6
	S50	18,89	18,80	2,29	14,4	22,5
180	S0	18,58	18,40	1,27	16,0	20,8
	S10	18,69	18,60	1,54	15,5	21,5
	S50	19,05	19,20	1,51	16,3	21,9

Na FIG. 5.22, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para os quatro Transdutores, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

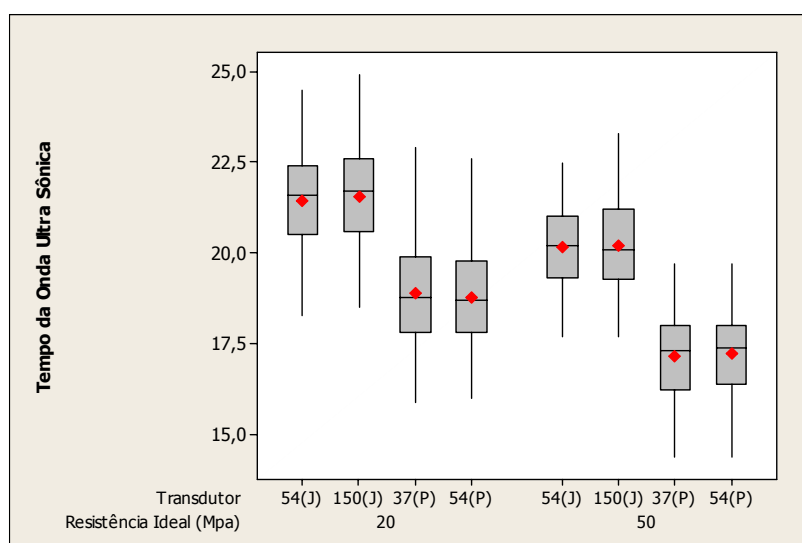


FIGURA 5.22: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Frequência dos Transdutores.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.31 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e a Frequência dos Transdutores.

TABELA 5.31: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Frequência dos Transdutores.

Resist. Ideal (MPa)	Transdutor	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	54 (JAMES)	21,43	21,60	1,27	18,3	24,5
	150 (JAMES)	21,57	21,70	1,34	18,5	24,9
	37 (PUNDIT)	18,89	18,80	1,39	15,9	22,9
	54 (PUNDIT)	18,79	18,70	1,38	16,0	22,6
50	54 (JAMES)	20,17	20,20	1,07	17,7	22,5
	150 (JAMES)	20,20	20,10	1,18	17,7	23,3
	37 (PUNDIT)	17,18	17,30	1,13	14,4	19,7
	54 (PUNDIT)	17,22	17,40	1,11	14,4	19,7

Na FIG. 5.23, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para as duas Máquinas, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

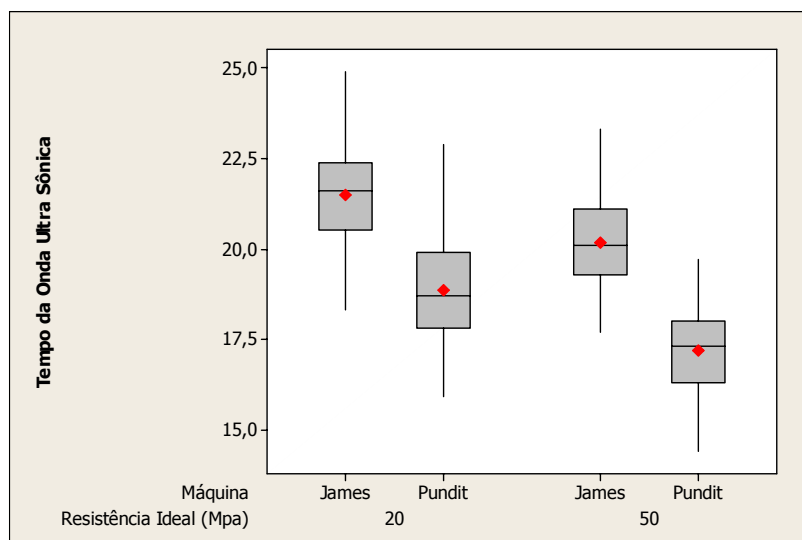


FIGURA 5.23: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Máquina.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.32 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e a Máquina.

TABELA 5.32: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Máquina.

Resist. Ideal (MPa)	Máquina	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	JAMES	21,50	21,60	1,31	18,3	24,9
	PUNDIT	18,84	18,70	1,38	15,9	22,9
50	JAMES	20,19	20,10	1,13	17,7	23,3
	PUNDIT	17,20	17,30	1,12	14,4	19,7

Na FIG. 5.24, os gráficos *boxplot* mostram a comparação da variável resposta Tempo da Onda Ultra-sônica para os três Pontos de Medição – base, meio e topo, levando em consideração os níveis da Resistência Ideal – 20 MPa e 50 MPa.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

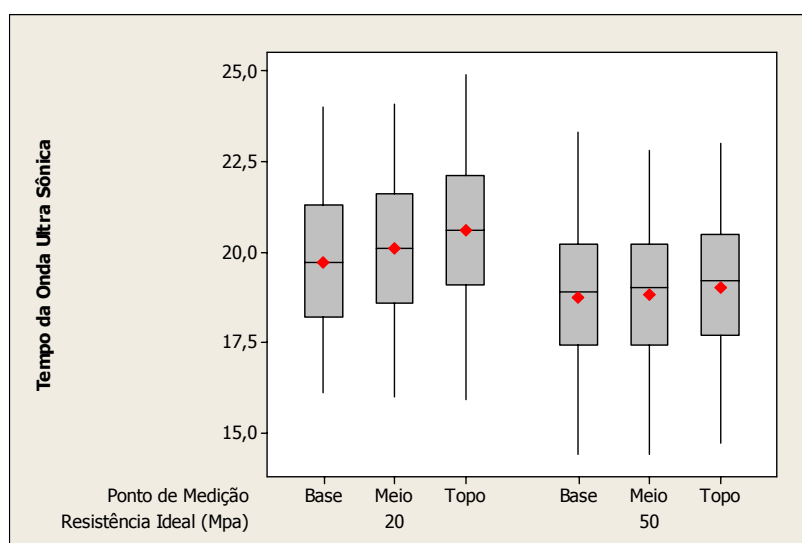


FIGURA 5.24: *Boxplots* para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificado por Resistência Ideal (MPa) e Ponto de Medição.

Complementarmente, são apresentadas na TAB.5.33 as medidas descritivas para o Tempo da Onda Ultra-sônica (μs), discriminando-se a Resistência Ideal (MPa) e o Ponto de Medição.

TABELA 5.33: Medidas Descritivas para o Tempo da Onda Ultra-Sônica (μs) Estratificadas por Resistência Ideal (MPa) e Ponto de Medição.

Resist. Ideal (MPa)	Ponto de Medição	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
20	Base	19,72	19,70	1,87	16,1	24,0
	Meio	20,12	20,10	1,86	16,0	24,1
	Topo	20,61	20,60	1,85	15,9	24,9
50	Base	18,74	18,90	1,84	14,4	23,3
	Meio	18,82	19,00	1,87	14,4	22,8
	Topo	19,03	19,20	1,87	14,7	23,0

5.3.4 Análise de Variância – Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica

Assim como os estudos da análise de variância para os corpos-de-prova utilizados para o ensaio de resistência à compressão, nesta seção realizou-se o mesmo procedimento, todavia, para os corpos-de-prova destinados ao ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico.

◆ = Média dos valores.

— = Mediana dos valores.

* = “outliers” (valores discrepantes).

As TAB. 5.34 e 5.35 apresentam a análise de variância para as medidas de Tempo da Onda Ultra-Sônica dos corpos-de-prova, considerando a Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa, respectivamente.

TABELA 5.34: Análise de Variância para as Medidas de Tempo da Onda Ultra-Sônica (μ s) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F0	<i>p</i> -valor
Cimento	2	139,12	69,56	119,35	0,000
Agregado	2	903,44	451,72	775,01	0,000
Solução	2	335,20	167,60	287,54	0,000
Idade	2	14,53	7,27	12,47	0,000
Máquina	1	2249,96	2249,96	3860,21	0,000
Transdutor (Máquina)	2	4,16	2,08	3,57	0,028
Ponto de Medição	2	170,82	85,41	146,53	0,000
Erro	1258	733,24	0,58		
Total	1271				

Observa-se que todos os *p*-valores são menores que 0,05. Dessa forma, conclui-se que todas as variáveis são significativas, ou seja, influenciam o Tempo da Onda Ultra-sônica.

O Anexo D apresenta os resultados dos testes de Tukey que tem como objetivo comparar os níveis dos fatores estudados. Com base nesses resultados conclui-se que os três Tipos de Cimento diferem significativamente entre si, uma vez que para todos os testes o *p*-valor foi menor que 0,05. O mesmo acontece com as outras variáveis, com exceção da variável Transdutor (Máquina), onde o teste não detectou uma diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica para os Transdutores 54(J) e 150(J), bem como para os Transdutores 37(P) e 54(P). Além do teste de Tukey não ter detectado diferença na média dos Transdutores utilizados em uma mesma máquina, a diferença entre essas médias pode ser considerada não significativa na prática visto que são inferiores a 0,2 μ s.

TABELA 5.35: Análise de Variância para as Medidas de Tempo da Onda Ultra-Sônica (μ s) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 50 MPa.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F0	<i>p</i> -valor
Cimento	2	43,26	21,63	41,56	0,000
Agregado	2	619,43	309,72	595,02	0,000
Solução	2	45,79	22,89	43,98	0,000
Idade	2	11,13	5,56	10,69	0,000
Máquina	1	1881,22	1881,22	3614,13	0,000
Transdutor (Máquina)	2	0,36	0,18	0,34	0,710
Ponto de Medição	2	14,04	7,02	13,49	0,000
Erro	958	498,66	0,52		
Total	971				

Observando os *p*-valores, conclui-se que todas as variáveis são significativas, exceto Transdutor (Máquina). Isso indica que todas as variáveis influenciam no Tempo da Onda Ultra-Sônica, com exceção do Transdutor (Máquina).

Os resultados do Teste de Tukey apresentados no Anexo D, indicaram que não existe diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica apenas entre os Cimentos III e IV. No caso da variável Idade, os testes indicaram que não existe diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica para as Idades de 28 e 180 dias. Também não houve diferença significativa entre o Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica para os Pontos de Medição Meio e Base. Para o restante das variáveis, foram detectadas diferenças significativas entre todos os níveis

Desta forma conclui-se que, assim como para os corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência à compressão, os destinados ao ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, também apresentaram o transdutor como fator que não influencia a medida do Tempo da Onda Ultra-Sônica, para concretos de 20 MPa e 50 MPa. Isto quer dizer que, assim como mostra a FIG. 5.22, alternando-se os transdutores do mesmo aparelho não há variações na leitura do tempo da onda ultra-sônica. No entanto, outro dado que é notório neste gráfico, é o fato de que os aparelhos (máquinas) apresentam leituras diferentes entre si, mesmo utilizando transdutores de mesma frequência, como é o caso do transdutor de 54 kHz.

5.3.5 Análise de Variância e Modelo de Regressão Linear – Variável Resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico

No QUADRO 5.33 é apresentado o Modelo de Regressão Linear para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa conjuntamente com a Máquina JAMES. Vale salientar que, contrariando o que ocorrera para os corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência à compressão, na situação atual os fatores Solução, Idade e Tempo da Onda Ultra-Sônica não contribuem para explicar a variabilidade do Módulo de Elasticidade Dinâmico e, sendo assim, não aparecem no modelo proposto.

QUADRO 5.33: Modelo de Regressão Linear para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos Corpos-de-Prova Considerando as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa e a Máquina JAMES.

$$\begin{aligned} \text{Módulo de Elasticidade Dinâmico} = & 31,2 + 1,91*\text{CimentoIII} + 2,17*\text{CimentoIV} + \\ & + 1,57*\text{AgregadoCC} + 3,02*\text{AgregadoCD} + 0,0842*\text{Resistência Ideal (MPa)} - \\ & - 3,83*\text{CimentoIII}*\text{AgregadoCC} - 1,65*\text{Cimento III}*\text{AgregadoCD} - 2,50*\text{CimentoIV}*\text{AgregadoCC} - \\ & - 3,07*\text{CimentoIV}*\text{AgregadoCD} \end{aligned}$$

A TAB. 5.36 apresenta a Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa e Máquina JAMES.

TABELA 5.36: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa e Máquina JAMES.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	p-valor
Constante	31,1906	0,86200	36,18	0,000
Cimento III	1,9125	0,96230	1,99	0,048
Cimento IV	2,1667	0,96230	2,25	0,025
Agregado CC	1,5750	0,96230	1,64	0,103
Agregado CD	3,0167	0,96230	3,13	0,002
Resistência Ideal	0,0842	0,01512	5,57	0,000
Cimento III*Agregado CC	-3,8290	1,36100	-2,81	0,005
Cimento III*Agregado CD	-1,6540	1,36100	-1,22	0,226
Cimento IV*Agregado CC	-2,5040	1,36100	-1,84	0,067
Cimento IV*Agregado CD	-3,0710	1,36100	-2,26	0,025

Outro fator que chama a atenção neste modelo, é o fato do seu coeficiente de determinação ser de apenas 18,2%, inviabilizando sua utilização.

No QUADRO 5.34, as particularidades do Modelo de Regressão Linear, para o aparelho PUNDIT se repetem, mas com uma redução no coeficiente de determinação. Este é apenas de 15,4%, inviabilizando sua utilização.

QUADRO 5.34: Modelo de Regressão Linear para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos Corpos-de-Prova Considerando as Resistências Ideais de 20 MPa e 50 MPa e a Máquina PUNDIT.

$$\begin{aligned} \text{Módulo de Elasticidade Dinâmico} = & 31,8 + 1,44*\text{CimentoIII} + 1,93*\text{CimentoIV} + \\ & + 1,73*\text{AgregadoCC} + 2,40*\text{AgregadoCD} + 0,0710*\text{Resistência Ideal (MPa)} - \\ & - 4,53*\text{CimentoIII}*\text{AgregadoCC} - 0,70*\text{Cimento III}*\text{AgregadoCD} - 2,90*\text{CimentoIV}*\text{AgregadoCC} - \\ & - 2,36*\text{CimentoIV}*\text{AgregadoCD} \end{aligned}$$

A TAB. 5.37 apresenta a Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos corpos-de-prova considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa e Máquina PUNDIT.

TABELA 5.37: Análise de Variância e Estimativas dos Coeficientes do Modelo de Regressão para o Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa) dos Corpos-de-Prova Considerando Resistência Ideal de 20 MPa e 50 MPa e Máquina PUNDIT.

Coeficiente	Estimativa	Desvio Padrão	T ₀	<i>p-valor</i>
Constante	31,77890	0,94750	33,54	0,000
Cimento III	1,44000	1,08400	1,33	0,186
Cimento IV	1,93000	1,08400	1,78	0,077
Agregado CC	1,73500	1,08400	1,60	0,111
Agregado CD	2,40500	1,08400	2,22	0,028
Resistência Ideal	0,07097	0,01739	4,08	0,000
Cimento III*Agregado CC	-4,53000	1,53400	-2,95	0,004
Cimento III*Agregado CD	-0,70000	1,53400	-0,46	0,649
Cimento IV*Agregado CC	-2,90000	1,53400	-1,89	0,060
Cimento IV*Agregado CD	-2,36000	1,53400	-1,54	0,126

A adequação dos modelos de Análise de Variância e Regressão foi verificada utilizando gráficos de probabilidade normal para os resíduos, gráfico de resíduos versus valores ajustados e histograma para os resíduos. Esses gráficos são apresentados no Anexo D.

De modo geral, na análise dos gráficos de resíduos não foram encontradas indicações de falta de adequação dos modelos de Análise de Variância e Regressão.

5.4 Considerações Finais

Após a discussão dos resultados, algumas considerações podem ser feitas. A primeira abordagem, qualitativa, foi realizada no item 5.1. A análise quantitativa dos resultados, baseados nos gráficos *boxplot*, será feita a seguir.

5.4.1 Análise Quantitativa dos Gráficos Boxplot para os Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Resistência à Compressão

5.4.1.1 Variável Resposta Resistência Real (MPa)

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.2, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, a Resistência Real média obtida para o concreto produzido com cimento CP III 32 RS é 30% e 26% maior que os produzidos com cimentos CP IV 32 e CP II E 32, respectivamente.

Para o concreto de 50 MPa, a TAB. 5.2 mostra que a Resistência Real média do concreto produzido com cimento CP IV 32 é 5% maior que a do concreto produzido com cimento CP II E 32 e equivalente à do concreto produzido com cimento CP III 32 RS.

Analisando-se o fator tipo de agregado, TAB. 5.3, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, a Resistência Real média obtida para o concreto produzido com agregado graúdo GN é 12% e 26% maior que os produzidos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Para o concreto de 50 MPa, na TAB. 5.3, nota-se que a Resistência Real média obtida para o concreto produzido com agregado graúdo GN é 13% e 22% maior que os produzidos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.4, nota-se que para uma resistência ideal de 20 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 28 dias à solução S0 é 13% e 2% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

Novamente para uma resistência ideal de 20 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 90 dias à solução S10 é 11% e 5% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S0 e S50, respectivamente.

Ainda para uma Resistência Ideal de 20 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 180 dias à solução S10 é 5% e 23% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S0 e S50, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.5, nota-se que para uma resistência ideal de 50 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 28 dias à solução S0 é 9% e 7% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

Novamente para uma Resistência Ideal de 50 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 90 dias à solução S0 é 7% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S10 e S50.

Ainda para uma Resistência Ideal de 50 MPa, a Resistência Real média obtida para os concretos submetidos por 180 dias à solução S0 é 5% e 6% maior que aquelas dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

5.4.1.2 Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s)

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.6, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto feito com cimento CP II E 32 é 5% e 2% maior que aqueles dos concretos feitos com cimentos CP III 32 RS e CP IV 32, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.6, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto feito com cimento CP IV 32 é 2% e 1% maior que aqueles dos concretos feitos com cimentos CP II E 32 e CP III 32 RS, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado, TAB. 5.7, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto feito com agregado graúdo GN é 6% e 11% maior que aqueles dos concretos feitos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado, TAB. 5.7, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto feito com agregado graúdo GN é 7% e 11% maior que aqueles dos concretos feitos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.8, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, aos 28 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S50 é 7% e 4% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.8, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, aos 90 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S50 é 6% e 3% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.8, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, aos 180 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S50 é 9% e 5% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.9, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, aos 28 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S10 é 5% e 2% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S50, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.9, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, aos 90 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S50 é 2% e 1% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.9, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, aos 180 dias, o tempo médio da onda ultra-sônica do concreto submetido à solução S50 é 2% e 1% maior em relação àqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Analisando-se a TAB. 5.10 constata-se que existe diferença na leitura do tempo da onda ultra-sônica entre os aparelhos JAMES e PUNDIT. No entanto, entre os transdutores do mesmo aparelho, não há diferença significativa de leitura, mesmo sendo de frequências diferentes. A TAB. 5.11 corrobora a afirmação referente ao tipo de máquina.

A TAB. 5.12 revela que o tempo da onda ultra-sônica aumenta da base para o topo do corpo-de-prova, indicando que o ponto de medição influencia a leitura do tempo da onda ultra-sônica, tanto para o concreto com resistência ideal de 20 MPa como para os de 50 MPa.

5.4.2 Análise Quantitativa dos Gráficos *Boxplot* para os Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico.

5.4.2.1 Variável Resposta Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.23, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto

com cimento CP II E 32 é 2% maior que o do concreto feito com cimento CP III 32 RS e equivalente àquele feito com cimento CP IV 32.

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.23, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto com cimento CP III 32 RS é 3% e 1% maior que aqueles feitos com cimento CP II E 32 e CP IV 32, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado graúdo, TAB. 5.24, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto com agregado graúdo CD é 6% e 3% maior que aqueles feitos com agregados graúdos CC e GN, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado graúdo, TAB. 5.24, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto com agregado graúdo CD é 5% maior que aqueles feitos com agregados graúdos CC e GN.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.25, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S10, por 28 dias, é 3% maior que aquele do concreto submetido à solução S50 e equivalente ao daquele submetido à solução S0.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.25, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S0, por 90 dias, é 10% maior que aquele do concreto submetido à solução S10 e equivalente ao daquele submetido à solução S50.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.25, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S50, por 180 dias, é 4% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.26, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S0, por 28 dias, é 5% e 6% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.26, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S0, por 90 dias, é 9% e 3% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.26, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o módulo de elasticidade dinâmico médio do concreto submetido à solução S50, por 180 dias, é 4% e 3% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

5.4.2.2 Variável Resposta Tempo da Onda Ultra-sônica (μ s)

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.27, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto feito com cimento CP II E 32 é 4% e 2% maior que naqueles com cimentos CP III 32 RS e CP IV 32, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de cimento, TAB. 5.27, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto feito com cimento CP IV 32 é 3% maior que aquele do concreto com cimento CP II E 32 e equivalente àquele do concreto com cimento CP III 32 RS.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado graúdo, TAB. 5.28, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto feito com agregado graúdo GN é 5% e 11% maior que aqueles nos concretos feitos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de agregado graúdo, TAB. 5.28, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto feito com agregado graúdo GN é 6% e 11% maior que aqueles nos concretos feitos com agregados graúdos CC e CD, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.29, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S50, por 28 dias, é 6% e 5% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.29, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S50, por 90 dias, é 7% e 3% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.29, nota-se que para uma Resistência Ideal de 20 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S50, por 180 dias, é 7% e 4% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.30, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S0, por 28 dias, é 1% e 2% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S10 e S50, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.30, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S50, por 90 dias, é 4% e 1% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Quando o fator analisado é o tipo de solução, TAB. 5.30, nota-se que para uma Resistência Ideal de 50 MPa, o tempo médio da onda ultra-sônica no concreto submetido à solução S50, por 180 dias, é 3% e 2% maior que aqueles dos concretos submetidos às soluções S0 e S10, respectivamente.

Tanto os dados gerados pelos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão, como aqueles gerados pelos cps destinados ao ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, convergiram para o fato de que, em um mesmo aparelho, a troca de transdutores, de diferentes frequências não altera a leitura do tempo da onda ultra-sônica. Todavia, há diferenças entre transdutores de mesma frequência, mas de aparelhos distintos.

A TAB. 5.32 revela que há diferença nas leituras dos tempos das ondas ultra-sônicas entre os aparelhos JAMES e PUNDIT, isto é, as leituras são distintas nos mesmos pontos.

A TAB. 5.33 revela que há diferenças nas leituras dos tempos da onda ultra-sônica na base, no meio e no topo do corpo-de-prova. Além disso, pode ser visto que os valores do tempo da onda ultra-sônica são crescentes da base para o topo.

5.4.3 Resumo dos Resultados dos Gráficos *Boxplot*

Todos os resultados médios apresentados nos gráficos *Boxplot* estão resumidos na TAB.5.38 a seguir:

TABELA 5.38: Comparativo dos Resultados Médios dos Gráficos *Boxplot* para os Ensaio de Resistência à Compressão, Módulo de Elasticidade Dinâmico e UPV.

Ensaio	Cimento		Agregado		Solução e Idade					
	20 MPa	50 MPa	20 MPa	50 MPa	20 MPa			50 MPa		
					28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias
Grupo dos Corpos-de-prova Destinados ao Ensaio de Resistência à Compressão (f_c)	CPIII > 30% CPIV	CPIV > 5% CPII	GN > 12% CC	GN > 13% CC	S0 > 13% S10	S10 > 11% S0	S10 > 5% S0	S0 > 9% S10	S0 > 7% S10	S0 > 5% S10
	CPIII > 26% CPII	CPIV \equiv CPIII	GN > 26% CD	GN > 22% CD	S0 > 2% S50	S10 > 5% S50	S10 > 23% S50	S0 > 7% S50	S0 > 7% S50	S0 > 6% S50
Ensaio de UPV nos Corpos-de-prova Destinados ao Ensaio de f_c	CPII > 5% CPIII	CPIV > 2% CPII	GN > 6% CC	GN > 7% CC	S50 > 7% S0	S50 > 6% S0	S50 > 9% S0	S10 > 5% S0	S50 > 2% S0	S50 > 2% S0
	CPII > 2% CPIV	CPIV > 1% CPIII	GN > 11% CD	GN > 11% CD	S50 > 4% S10	S50 > 3% S10	S50 > 5% S10	S10 > 2% S50	S50 > 1% S10	S50 > 1% S10
Grupo dos Corpos-de-prova Destinados ao Ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d)	CPII > 2% CPIII	CPIII > 3% CPII	CD > 6% CC	CD > 5% CC	S10 > 3% S50	S0 > 10% S10	S50 > 4% S0	S0 > 5% S10	S0 > 9% S10	S50 > 4% S0
	CPII \equiv CPIV	CPIII > 1% CPIV	CD > 3% GN	CD > 5% GN	S10 \equiv S0	S0 \equiv S50	S50 > 4% S10	S0 > 6% S50	S0 > 3% S50	S50 > 3% S10
Ensaio de UPV nos Corpos-de-prova Destinados ao Ensaio de E_d	CPII > 4% CPIII	CPIV > 3% CPII	GN > 5% CC	GN > 6% CC	S50 > 6% S0	S50 > 7% S0	S50 > 7% S0	S0 > 1% S10	S50 > 4% S0	S50 > 3% S0
	CPII > 2% CPIV	CPIV \equiv CPIII	GN > 11% CD	GN > 11% CD	S50 > 5% S10	S50 > 3% S10	S50 > 4% S10	S0 > 2% S50	S50 > 1% S10	S50 > 2% S10

6

CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo do material concreto, ao determinar importantes propriedades mecânicas de misturas produzidas para duas classes de resistência à compressão, três tipos de cimento, três tipos de agregado e submetidas a três tipos de soluções em três idades distintas.

Para a realização do trabalho foram moldados no total aproximadamente 1000 corpos-de-prova entre aqueles usados efetivamente nos ensaios, no projeto piloto e alguns reservas.

Foram utilizados ensaios destrutivos tais como resistência à compressão, porosimetria de mercúrio, microscopia eletrônica de varredura, análise química e difração de raios-X, este último sendo realizado no pó depositado no fundo das caixas d'água. Além desses, dois ensaios não destrutivos foram realizados como a medição do tempo da onda ultra-sônica e determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

A partir da análise dos resultados os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico (variáveis resposta do trabalho) foram correlacionados de forma qualitativa e quantitativa com o tempo da onda ultra-sônica e demais fatores influentes, sendo possível por meio da análise de variância e da regressão linear obter modelos matemáticos.

Em função do grande número de variáveis envolvidas procurou-se evidenciar a seguir, as conclusões mais representativas e as pretensas contribuições deste trabalho.

- Para as misturas relativas a um concreto com $f_{ck} = 20\text{MPa}$ e não submetidas ao ataque de sulfatos, conclui-se que a que obteve o melhor desempenho (correlação entre os resultados dos ensaios da resistência à compressão do concreto, porosimetria de mercúrio e ultra-sonografia) foi aquela produzida com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo CD, seguida daquelas com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo GN e cimento CP III 32 RS e agregado graúdo CC. Quando submetidas ao ataque de uma solução de sulfato de magnésio com concentração de 10g/L o concreto que apresentou o melhor desempenho foi aquele produzido com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo GN, seguido daqueles com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo CC e cimento CP II E 32 e agregado graúdo GN. Para a concentração de 50g/L de sulfato de magnésio, o concreto com melhor desempenho foi aquele com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo GN, seguido daquele com cimento CP IV 32 e agregado graúdo CC.
- Analogamente para as misturas relativas a um concreto com $f_{ck} = 50\text{MPa}$, quando não submetidos ao ataque de sulfatos, conclui-se que o concreto com o melhor desempenho foi aquele com cimento CP II E 32 e agregado graúdo GN, seguido daqueles com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo CD e cimento CP III 32 RS e agregado graúdo CC. Quando submetidos ao ataque de uma solução de sulfato de magnésio com concentração de 10g/L, o concreto que obteve o melhor desempenho foi aquele com cimento CP IV 32 e agregado graúdo CC, seguido daqueles com cimento CP III 32 RS e agregado graúdo GN e cimento CP II E 32 e agregado graúdo CD. Para a concentração de 50g/L de sulfato de magnésio, o concreto com o melhor desempenho foi aquele com cimento CP IV 32 e agregado graúdo GN, seguido daqueles com cimento CP II E 32 e agregado graúdo CC e cimento CP IV 32 e agregado graúdo CC.
- Independente da classe de resistência à compressão, o tempo da onda ultra-sônica é maior para o agregado graúdo gnaisse, seguido dos calcários calcítico e dolomítico.

Embora apresente valores distintos de tempos para as duas resistências, as relações entre os mesmos foram praticamente constantes.

- O tempo de transmissão da onda ultra-sônica foi influenciado pela localização dos transdutores no corpo-de-prova.
- O tempo de transmissão da onda ultra-sônica apresentou resultados distintos, dependendo do tipo de máquina (PUNDIT ou JAMES), para a mesma localização dos transdutores.
- O tempo de transmissão da onda ultra-sônica passa a ter influência significativa no modelo estatístico da determinação da resistência à compressão a partir de 90 dias.
- Os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico estão em conformidade com os obtidos na bibliografia internacional. Embora não tenha sido possível determinar experimentalmente o módulo de elasticidade estático, o mesmo pode ser obtido indiretamente relacionando-o com o módulo de elasticidade dinâmico obtido, como descrito em NEVILLE (1997).
- O comportamento à compressão dos concretos com $f_{ck} = 50\text{MPa}$ correspondeu ao esperado, ou seja, as maiores resistências foram para aqueles inseridos na solução S0. Já para a resistência $f_{ck} = 20\text{MPa}$, o mesmo não ocorreu, mostrando claramente que o ataque de sulfato é muito mais sensível para classes de resistências mais baixas.
- As análises químicas em nada contribuíram, uma vez que a técnica para obtenção das amostras revelou-se imprópria. Esta consistiu no corte de fatias de concretos utilizando-se uma serra diamantada, cujo resfriamento, sendo a água, promoveu a lavagem das amostras. Em seguida, as fatias foram moídas em um moinho de bola, sendo que, ao fim destes dois processos, perdia-se parte do sulfato presente na amostra, inviabilizando os resultados.

- Foram desenvolvidos modelos estatísticos capazes de determinar a resistência à compressão do concreto pelo conhecimento prévio do tipo de cimento, do tipo de agregado graúdo, do tipo de ambiente onde esteve inserido, do tempo médio da onda ultra-sônica, da idade e da resistência de projeto. Os modelos matemáticos correspondentes ao módulo de elasticidade dinâmico, embora possíveis, não são recomendados devido ao baixo coeficiente de determinação.
- Utilização do mesmo aparelho (PUNDIT ou JAMES) para todos os ensaios de uma mesma estrutura, independentemente da frequência do transdutor, ou seja, durante o ensaio poderão ser utilizados transdutores de frequências distintas.
- Propor que a colocação dos transdutores, nos ensaios de campo, tenha a mesma posição relativa para diferentes peças com a mesma função estrutural, uma vez que se detectou a influência do ponto de medição nos resultados do UPV.

A seguir são propostos alguns temas para trabalhos futuros:

- Adotar procedimento similar para a determinação do módulo de elasticidade estático.
- Adotar procedimento análogo ao deste trabalho para corpos-de-prova que contenham armadura e, neste caso, também submetidos ao ataque de cloretos.
- Realizar procedimento análogo ao deste trabalho utilizando sulfatos, agregados graúdos e cimentos diferentes, variando também o agregado miúdo.
- Realizar procedimento similar ao deste trabalho estudando o comportamento do concreto em idades mais avançadas.

7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AKHRAS; AL-QADI, I. L. Using ultrasonic waves to detect basic properties of portland cement concrete. **The Indian Concrete Journal**, Irbid, p.33-37, Jan. 1998.

ALMEIDA, I. R. DE A influência dos agregados: influência dos agregados na qualidade dos concretos de alto desempenho. **Ibracon**, Belo Horizonte, n.9, ago./set.1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R-01**: sumário. ACI Committee 201: New York, sep. 2000. 41p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 33-03**: standard specification for concrete aggregates. 2003. 11p.

_____, **ASTM C 88-99a**: standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. 1999. 5p.

_____, **ASTM C 150-04**: standard specification for Portland cement. 2004. 8p.

_____, **ASTM C 452-95**: standard test method for potencial expansion of portland-cement mortars exposed to sulfate. 1995. 3p.

_____, **ASTM C597-02**: standard test method for pulse velocity through concrete. Apr. 2002. 4p.

_____, **ASTM C 618-03**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. 2003. 3p.

_____, **ASTM C 1012-04**: standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. 2004. 6p.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultra-som: manual de aspectos básicos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos, 2002. 77p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 45:95**: agregados – determinação da massa unitária e dos espaços vazios. ABNT: Belo Horizonte, mar. 1996. 7p.

_____, **NM 33:1998**: concreto – amostragem de concreto fresco. ABNT: Rio de Janeiro, fev. 1998. 5p.

_____, **NBR 8522:1984**: concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão-deformação. ABNT: Rio de Janeiro, mai. 1984. 9p.

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

_____, **NBR 5732:1991**: cimento portland comum. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1991. 5p.

_____, **NBR 5733:1991**: cimento portland de alta resistência inicial. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1991. 5p.

_____, **NBR 5735:1991**: cimento portland de alto forno. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1991. 5p.

_____, **NBR 5736:1991**: cimento portland pozolânico. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1991. 5p.

_____, **NBR 5737:1992**: cimentos portland resistentes a sulfatos. ABNT: Rio de Janeiro, jun. 1992. 4p.

_____, **NBR 5739:1980**: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, nov. 1980. 3p.

_____, **NBR NM 248:2001**: agregados – determinação da composição granulométrica. ABNT: Rio de Janeiro, abr. 2001. 6p.

_____, **NBR 7218:1987**: agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. ABNT: Rio de Janeiro, ago. 1987. 2p.

_____, **NBR NM 46:2003**: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 2003. 6p.

_____, **NBR NM 49:2001**: agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. ABNT: Rio de Janeiro, nov. 2001. 3p.

_____, **NBR NM 52:2003**: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 2003. 6p.

_____, **NBR 7251:1982**: agregado em estado solto – determinação da massa unitária. ABNT: Rio de Janeiro, abr. 1982. 4p.

_____, **NBR 7810:1983**: agregado em estado compactado e seco – determinação da massa unitária. ABNT: Rio de Janeiro, mar. 1983, 4p.

_____, **NBR 11578:1991**: cimento portland composto. ABNT: Rio de Janeiro, jul. 1991. 5p.

_____, **NBR 12655:1992**: preparo, controle e recebimento de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, jun. 1992. 7p.

_____, **NBR 6118:2003**: projeto de estruturas de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, ago. 2003. 180p.

BALAGURU, P.N.; RAMAKRISHNAN, V. Criteria for estimating the required average strength f'_{cr} to comply with the specified compressive strength f'_c . **ACI Materials Journal**, New York, p.35- 41, Jan./Feb.1987.

BATTAGIN, A.F. Consolidação do emprego de cimento com adições no Brasil. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, p.1-10, 1995.

BENTUR, A.; COHEN, M. Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions. **ACI Materials Journal**, p.148-157, May/June 1988.

BEN-ZEITUN, A. E. Use of pulse velocity to predict compressive strength of concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v.8, n.1, p.51-59, Fev. 1986.

BOCCA, P. The application of pull-out test to high strength concrete estimation. **Matériaux et Constructions**, v.17, n.99, p.211-216.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881: Part 203: 1986**: recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. BS: London, 1986. 16p.

CHANG, Y. P.; WANG, C. Y.; HSIEH, C. H. Feseability of detecting embedded cracks in concrete structures by reflection seismology. **NDT & E International**, n.34, p.39-48, May 2001.

- COSTA, R. M. **Estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DATIR, U. D.; CHAUHAN, N. L.; SHAH, D.R. Correlation between pull-out force, pulse velocity and compressive strength of concrete. **The Indian Concrete Journal**, p.703-705, Dec. 1995.
- ESPINOSA, M. M. **Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira.** 2001. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da EESC, IFSC, IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- FERREIRA, A. P.; CASTRO, P. F. The application of ndt to concrete strength estimation. In: 15° WORLD CONGRESS ON NDT, 5, 2000, Rome.
- GALAN, A. **Combined ultrasound methods of concrete testing.** Bratislava: Elsevier, 1990. 344p.
- GARDNER, N. J. Effect of temperature on the early-age properties of type I, type III, and type I/fly ash concretes. **ACI Materials Journal**, p.68-78, jan./feb. 1990.
- GOMES, A. M. **Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. N°17. Vienna: IAEA, 2002. 231p.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GUDRA, T.; STAWISKI, B. Non-destructive strength characterization of concrete using surface waves. **NDT & E INTERNATIONAL**, p.1-6, may 1999.
- HAMASSAKI, L. T. **Aspectos da aplicabilidade do ensino de ultra-som em concreto:** boletim técnico. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1987. 7p.
- HANSEN, W. Static and dynamic elastic modulus of concrete as affected by mix composition and compressive strength. **American Concrete Institute**, p.117-139, mar. 1986.
- HEMALATHA, G.; ARUL, M. Inclined crack study using NDT techniques. **The Indian Concrete Journal**, p.90-92, feb. 2000.

HERNANDEZ, M.G. et al. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. **Ultrasonics**, v.38, p.531-533, 2000.

HOBBS, D.W.; TAYLOR, M.G. Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.529-533, 2000.

ISMAIL, M.P.; YUSOF, K.M.; IBRAHIM, A.N. A combined ultrasonic method on the estimation of compressive strength. **Insight**, v.38, n.11, p.781-785, nov. 1996.

JÁUREGUI, D. Uma reseña de ensayos de carga no destructivos usados para la evaluación de puentes. **Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, p. 157-164.

KAPLAN, M. F. The relation between ultrasonic pulse velocity and the compressive strength of concretes having the same workability but different mix proportions. **Concrete Research**, v.12, n.34, p.3-8, mar.1960.

KAUSHIK, S. K.; JAISINGH, L.; JAISINGH, M. P. Ultrasonic testing of concrete. **The Indian Concrete Journal**, p.687-693, dec. 1995.

KHEDER, G. F. A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. **Materiaux et Constructions**, v.32, p.410-417, jul. 1999.

KNAZE, P.; BENO, P. The use of combined non-destructive testing methods to determine the compressive strength of concrete. **Materiaux et Constructions**, vol.17, n.99, p.207-216.

KOMLOS, K. et al. Comparison of five standards on ultrasonic pulse velocity testing of concrete. **American Society for Testing and Materials**, p.42-48, 1996.

KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. Colônia: McGraw-Hill, 1983. 661p.

LANGE, Y.V. et al. Non-destructive testing of multilayer structures and concrete. **Insight**, vol.40, n.6, p.400-403, jun. 1998.

LESHCHINSKY, A. M. Non-destructive testing of concrete strength: statistical control. **Materials and Structures**, v.25, p.70-78, 1992.

LEW, H. S. et al. In-place methods for determination of strength of concrete. **ACI Materials Journal**, p.446-471, set./oct. 1988.

LUDWIG FILHO, U. **A homogeneidade do concreto na estrutura de edifícios**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico da Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

LYDON, F. D.; IACOVOU, M. Some factors affecting the dynamic modulus of elasticity of high strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.6, p.1246-1256, may 1995.

MALHOTRA, V.M.; CARINO, N. J. **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**. Boca Raton: CRC Press, 1991. 343p.

MARCHAND, J. et al. Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.24, p.317-329, 2002.

MBESSA, M.; PÉRA, J. Durability of high-strength concrete in ammonium sulfate solution. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1227-1231, 2001.

MENEGHETTI, L.C. **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MIKULIC, D.; PAUSE, Z.; UKRAINCIIK, V. Determination of concrete quality in a structure by combination of destructive and non-destructive methods. **Materials and Structures**, v.25, p.65-69, 1992.

MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P. K. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

NASSER, K.W.; AL-MANASSER, A. A. Comparison of nondestructive testers of hardened concrete. **ACI Materials Journal**, p.374-380, set./oct. 1987.

NAZARIAN, S.; BAKER, M.; CRAIN, K. Assessing quality of concrete with wave propagation techniques. **ACI Materials Journal**, p.296-305, jul./aug. 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NIELSEN, A.U.; AITCIN, P.C. Static modulus of elasticity of high-strength concrete from pulse velocity tests. **American Society for Testing and Materials**, p.64-66, 1992.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE. **Ultrasonics**, v.38, p.546-552, 2000.

PAPADAKIS, M.; VENUAT, M. **Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones**. 1.ed. Bilbao: Urmo, 1966. 381p.

PARK, Y. et al. Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment. **Cement and Concrete Research**, v.29, p.1397-1402, 1999.

QASRAWI, H.Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.739-746, jan. 2000.

QIXIAN, L.; BUNGEY, J. H. Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. **Elsevier**, p.237-242, jan./feb. 1996.

RILEM DRAFT RECOMMENDATION. **43-CND**. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. RILEM: Vicenza, jul. 1993, 7p.

ROY, D. M. Hydration of blended cements containing slag, fly ash, or silica fume. In: Proc. of Meeting Institute of Concrete Technology, 29, 1987, Coventry.

SCHICKERT, G. Critical reflections on non-destructive testing of concrete. **Matériaux et Constructions**, v.17, n.99, p.217-223.

SELLECK, S. F. et al. Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. **ACI Materials Journal**, p.27-36, jan./feb. 1998.

SHANNAG, M. J.; SHAIA A. H. Sulfate resistance of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.25, p.363-369, 2003.

TASKER, C.G.; MILNE, J. M.; SMITH, R. L. Recent work at the national NDT centre on concrete inspection. **British Journal of NDT**, v.32, n.7, p.335-359, jul. 1990.

TAYLOR, H. F.W. **Cement chemistry**. 2nd. ed. Trowbridge: Thomas Telford, 1997. 459p.

TULLIANI, J. et al. Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.843-849, jul. 2002.

VERGARA, L. et al. NDE ultrasonic methods to characterize the porosity of mortar. **NDT & E International**, p.557-562, feb. 2001.

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

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

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S.; DRUMOND, F. B. **Análise de variância: comparação de várias situações.** 1.ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996, vol.6. 303p. il.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Análise de regressão: como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo.** 1.ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996, vol.7. 311p. il.

ANEXO A

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.



FOTO A.1: Areia de Lagoa da Prata.



FOTO A.2: Aditivo Plastificante Mastermix 322 NT.



FOTO A.3: Brita 1 de Gnaisse.



FOTO A.4: Caixas D'água de 1000 L.



FOTO A.5: Exemplos dos Cimentos Utilizados.



FOTO A.6: Sílica Silmix Utilizada nos Concretos de 50 MPa.



FOTO A.7: Sulfato de Magnésio em Pó Utilizado nas Soluções.

ANEXO B

APARELHOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS E MISTURAS USADAS PARA A
FABRICAÇÃO DOS CONCRETOS.



FOTO B.1: Laboratório para as Análises Químicas.



FOTO B.2: Prensa para o Ensaio de Resistência à Compressão.



FOTO B.3: Aparelho Utilizado para a Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico.



FOTO B.4: Microscópio Eletrônico de Varredura.



FOTO B.5: Microscópio Eletrônico de Varredura.



FOTO B.6: Porosímetro de Mercúrio.



FOTO B.7: Aparelho de Ultra-sonografia Modelo PUNDIT.



FOTO B.8: Aparelho de Ultra-sonografia Modelo JAMES e Acoplante.

TABELA B.1: Composição da mistura para concretos com $f_{ck} = 20$ MPa.

Composição da Mistura para Concretos $f_{ck} = 20\text{MPa}$	
Componentes	Quantidade
Brita (B1) (kg/m^3)	890
Areia (seca) (kg/m^3)	920
Cimento (kg/m^3)	330
Sílica (kg/m^3)	-
Água (L/m^3)	220
Aditivo (ml/m^3)	945
a/c	0,67

TABELA B.2: Composição da mistura para concretos com $f_{ck} = 50$ MPa.

Composição da Mistura para Concretos $f_{ck} = 50\text{MPa}$	
Componentes	Quantidade
Brita (B1) (kg/m^3)	1155
Areia (seca) (kg/m^3)	617
Cimento (kg/m^3)	499,5
Sílica (kg/m^3)	55,5
Água (L/m^3)	200
Aditivo (ml/m^3)	1940
a/c	0,42

ANEXO C

**RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO
DE VARREDURA.**

TABELA C.1: Resistência Real Média tendo como Variantes o Tipo de Cimento, o Tipo de Agregado e a Solução para Concretos de 20 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Resistência Média (MPa)
II	CC	S0	27,25
II	CC	S10	23,50
II	CC	S50	20,00
II	CD	S0	22,75
II	CD	S10	22,00
II	CD	S50	23,75
II	GN	S0	26,00
II	GN	S10	33,25
II	GN	S50	24,50
III	CC	S0	29,50
III	CC	S10	35,75
III	CC	S50	32,25
III	CD	S0	32,75
III	CD	S10	21,00
III	CD	S50	21,50
III	GN	S0	33,25
III	GN	S10	34,25
III	GN	S50	41,75
IV	CC	S0	23,75
IV	CC	S10	23,50
IV	CC	S50	25,50
IV	CD	S0	20,25
IV	CD	S10	26,75
IV	CD	S50	21,75
IV	GN	S0	26,25
IV	GN	S10	26,00
IV	GN	S50	23,50

TABELA C.2: Resistência Real Média tendo como Variantes o Tipo de Cimento, o Tipo de Agregado e a Solução para Concretos de 50 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Resistência Média (MPa)
II	CC	S0	45,75
II	CC	S10	43,75
II	CC	S50	51,50
II	CD	S0	46,50
II	CD	S10	46,25
II	CD	S50	38,00
II	GN	S0	65,00
II	GN	S10	48,25
II	GN	S50	56,00
III	CC	S0	55,75
III	CC	S10	48,25
III	CC	S50	44,25
III	CD	S0	53,00
III	CD	S10	42,00
III	CD	S50	50,00
III	GN	S0	57,25
III	GN	S10	59,50
III	GN	S50	51,75
IV	CC	S0	47,00
IV	CC	S10	60,25
IV	CC	S50	50,75
IV	CD	S0	53,75
IV	CD	S10	43,75
IV	CD	S50	41,00
IV	GN	S0	51,75
IV	GN	S10	52,75
IV	GN	S50	62,50

TABELA C.3: Tempo Médio da Onda Ultra-sônica tendo como Variantes o Tipo de Cimento, o Tipo de Agregado e a Solução para Concretos de 20 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Tempo da Onda Ultra-sônica (μs)
II	CC	S0	19,81
II	CC	S10	20,39
II	CC	S50	22,29
II	CD	S0	19,17
II	CD	S10	19,29
II	CD	S50	20,03
II	GN	S0	20,84
II	GN	S10	21,43
II	GN	S50	22,80
III	CC	S0	18,91
III	CC	S10	19,68
III	CC	S50	19,57
III	CD	S0	18,20
III	CD	S10	18,81
III	CD	S50	19,51
III	GN	S0	20,30
III	GN	S10	20,86
III	GN	S50	21,60
IV	CC	S0	18,20
IV	CC	S10	20,53
IV	CC	S50	20,92
IV	CD	S0	19,03
IV	CD	S10	19,89
IV	CD	S50	19,60
IV	GN	S0	20,96
IV	GN	S10	20,68
IV	GN	S50	22,21

TABELA C.4: Tempo Médio da Onda Ultra-sônica tendo como Variantes o Tipo de Cimento, o Tipo de Agregado e a Solução para Concretos de 50 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Tempo da Onda Ultra-Sônica (μ s)
II	CC	S0	18,28
II	CC	S10	21,23
II	CC	S50	18,33
II	CD	S0	18,84
II	CD	S10	17,69
II	CD	S50	17,32
II	GN	S0	19,36
II	GN	S10	19,44
II	GN	S50	22,43
III	CC	S0	18,71
III	CC	S10	18,07
III	CC	S50	19,83
III	CD	S0	17,16
III	CD	S10	19,49
III	CD	S50	18,56
III	GN	S0	21,91
III	GN	S10	19,86
III	GN	S50	19,74
IV	CC	S0	19,48
IV	CC	S10	18,85
IV	CC	S50	18,72
IV	CD	S0	17,94
IV	CD	S10	17,84
IV	CD	S50	19,49
IV	GN	S0	19,33
IV	GN	S10	22,41
IV	GN	S50	20,24

TABELA C.5: Porosidade do Concreto tendo como Variantes o Tipo de Cimento, Tipo de Agregado, Solução e Idade para Concretos de 20 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Idade (dias)	Porosidade (nm)
II	GN	S0	180	28,00
II	GN	S10	90	30,90
II	GN	S50	28	35,50
III	GN	S0	28	22,80
III	GN	S10	180	24,80
III	GN	S50	90	25,60
IV	GN	S0	90	61,90
IV	GN	S10	28	28,50
IV	GN	S50	180	25,30
II	CD	S0	28	29,40
II	CD	S10	180	31,10
II	CD	S50	90	49,30
III	CD	S0	90	16,10
III	CD	S10	28	23,60
III	CD	S50	180	35,80
IV	CD	S0	180	48,80
IV	CD	S10	90	21,40
IV	CD	S50	28	27,60
II	CC	S0	90	18,40
II	CC	S10	28	28,10
II	CC	S50	180	37,00
III	CC	S0	180	18,60
III	CC	S10	90	20,00
III	CC	S50	28	24,90
IV	CC	S0	28	36,50
IV	CC	S10	180	20,60
IV	CC	S50	90	22,20

TABELA C.6: Porosidade do Concreto tendo como Variantes o Tipo de Cimento, Tipo de Agregado, Solução e Idade para Concretos de 50 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Idade (dias)	Porosidade (nm)
II	GN	S0	180	15,70
II	GN	S10	90	27,70
II	GN	S50	28	33,50
III	GN	S0	28	21,90
III	GN	S10	180	20,80
III	GN	S50	90	24,30
IV	GN	S0	90	24,30
IV	GN	S10	28	24,10
IV	GN	S50	180	28,30
II	CD	S0	28	33,00
II	CD	S10	180	23,60
II	CD	S50	90	42,40
III	CD	S0	90	14,50
III	CD	S10	28	28,90
III	CD	S50	180	48,30
IV	CD	S0	180	23,70
IV	CD	S10	90	20,00
IV	CD	S50	28	32,40
II	CC	S0	90	23,40
II	CC	S10	28	26,40
II	CC	S50	180	31,40
III	CC	S0	180	18,10
III	CC	S10	90	23,90
III	CC	S50	28	27,10
IV	CC	S0	28	23,80
IV	CC	S10	180	17,20
IV	CC	S50	90	18,70

TABELA C.7: Resistência Real Média, aos 270 dias, tendo como Variantes o Tipo de Cimento, o Tipo de Agregado e a Solução para Concretos de 20 MPa.

Tipo de Cimento	Tipo de Agregado	Solução	Resistência Média (MPa)
II	GN	S0	36,15
III	GN	S10	31,00
IV	GN	S50	22,54
II	CD	S10	29,35
III	CD	S50	32,00
IV	CD	S0	16,87
II	CC	S50	17,07
III	CC	S0	37,25
IV	CC	S10	20,25

FOTOS E ANÁLISES DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

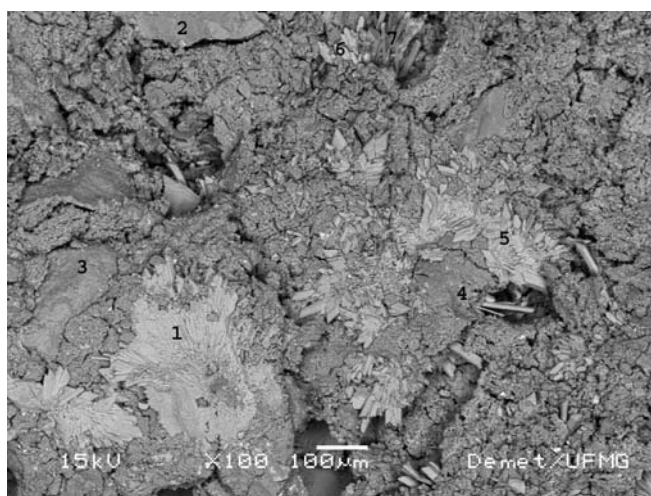


FOTO C.1: Vista com Aumento de 100X de Região da Amostra T24.

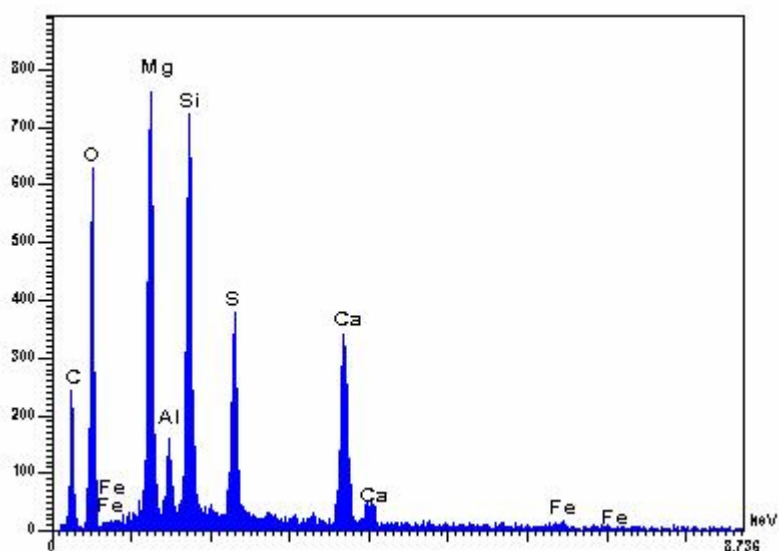


FIGURA C.1: Relatório de Espectros da Análise Geral da Foto C.1.

TABELA C.8: Resultados e Medidas Referentes à Análise Geral da Foto C.1.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						46.09	61.42	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	4.7	0.3964	0.0052	0.0021	0.43	0.40	2.0203	Na ₂ O	0.58	0.05
Mg	Ka	216.7	2.6875	0.2316	0.0935	14.43	12.65	1.5428	MgO	23.92	1.65
Al	Ka	41.8	1.1798	0.0446	0.0180	2.83	2.24	1.5737	Al ₂ O ₃	5.35	0.29
Si	Ka	210.4	2.6481	0.2369	0.0957	13.03	9.89	1.3618	SiO ₂	27.87	1.29
P	Ka	6.9	0.4792	0.0088	0.0035	0.50	0.34	1.4023	P ₂ O ₅	1.14	0.04
S	Ka	117.0	1.9749	0.1679	0.0678	8.54	5.68	1.2593	SO ₃	21.32	0.74
K	Ka	3.5	0.3394	0.0068	0.0027	0.32	0.17	1.1719	K ₂ O	0.39	0.02
Ca	Ka	126.0	2.0493	0.2762	0.1115	12.74	6.77	1.1419	CaO	17.82	0.88
Ti	Ka	1.2	0.2004	0.0034	0.0014	0.17	0.08	1.2564	TiO ₂	0.29	0.01
Fe	Ka	3.4	0.3374	0.0187	0.0075	0.93	0.36	1.2370	Fe ₂ O ₃	1.33	0.05
				1.0000	0.4038	100.00	100.00			100.00	5.02

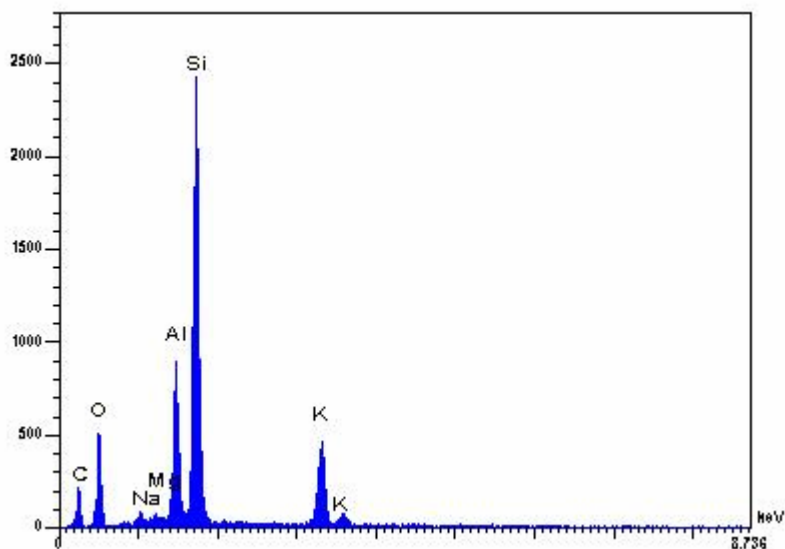


FIGURA C.2: Relatório de Espectros Referentes à Área 1 da Foto C.1.

TABELA C.9: Resultados e Medidas Referentes à Área 1 da Foto C.1.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						47.41	66.59	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	5.6	0.4302	0.0040	0.0018	0.42	0.41	2.2690	Na2O	0.56	0.05
Mg	Ka	13.3	0.6657	0.0092	0.0042	0.71	0.66	1.6736	MgO	1.18	0.08
Al	Ka	10.1	0.5795	0.0069	0.0032	0.46	0.38	1.4358	Al2O3	0.87	0.05
Si	Ka	12.0	0.6326	0.0087	0.0040	0.50	0.40	1.2331	SiO2	1.07	0.05
P	Ka	10.9	0.6021	0.0089	0.0041	0.49	0.35	1.1736	P2O5	1.11	0.04
S	Ka	482.9	4.0119	0.4467	0.2071	22.97	16.10	1.1093	SO3	57.35	1.93
K	Ka	2.1	0.2620	0.0026	0.0012	0.14	0.08	1.1379	K2O	0.17	0.01
Ca	Ka	358.1	3.4552	0.5063	0.2347	26.52	14.87	1.1301	CaO	37.11	1.79
Ti	Ka	1.1	0.1945	0.0020	0.0009	0.12	0.06	1.2809	TiO2	0.20	0.01
Fe	Ka	1.3	0.2092	0.0046	0.0021	0.27	0.11	1.2376	Fe2O3	0.38	0.01
				1.0000	0.4635	100.00	100.00			100.00	4.01

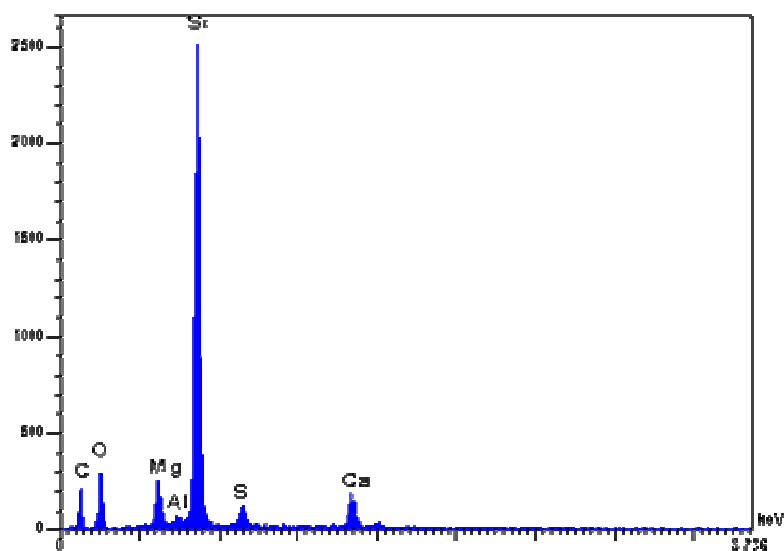


FIGURA C.3: Relatório de Espectros Referentes à Área 2 da Foto C.1.

TABELA C.10: Resultados e Medidas Referentes à Área 2 da Foto C.1.

Elt	XRy	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						50.78	65.11	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	0.7	0.1512	0.0007	0.0003	0.05	0.05	1.9818	Na ₂ O	0.07	0.01
Mg	Ka	64.4	1.4648	0.0625	0.0246	3.72	3.14	1.5099	MgO	6.17	0.39
Al	Ka	11.8	0.6282	0.0115	0.0045	0.62	0.47	1.3787	Al ₂ O ₃	1.18	0.06
Si	Ka	738.9	4.9628	0.7559	0.2981	36.64	26.76	1.2290	SiO ₂	78.38	3.29
P	Ka	1.9	0.2539	0.0022	0.0009	0.14	0.09	1.5583	P ₂ O ₅	0.32	0.01
S	Ka	34.1	1.0655	0.0444	0.0175	2.39	1.53	1.3630	SO ₃	5.96	0.19
K	Ka	1.4	0.2143	0.0025	0.0010	0.12	0.06	1.2088	K ₂ O	0.14	0.01
Ca	Ka	57.2	1.3810	0.1139	0.0449	5.22	2.67	1.1617	CaO	7.30	0.33
Ti	Ka	0.9	0.1742	0.0023	0.0009	0.11	0.05	1.2547	TiO ₂	0.19	0.01
Fe	Ka	0.8	0.1671	0.0042	0.0016	0.20	0.07	1.2444	Fe ₂ O ₃	0.29	0.01
				1.0000	0.3944	100.00	100.00			100.00	4.29

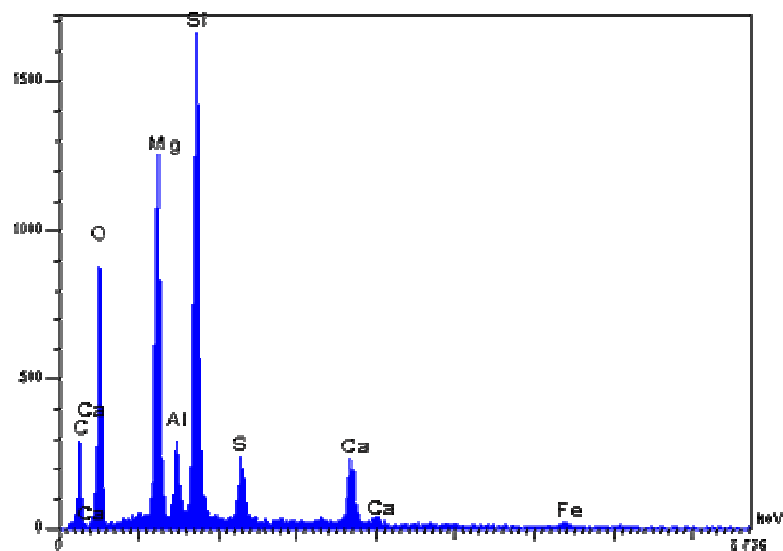


FIGURA C.4: Relatório de Espectros Referentes à Área 3 da Foto C.1.

TABELA C.11: Resultados e Medidas Referentes à Área 3 da Foto C.1.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						47.39	61.30	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	9.5	0.5638	0.0078	0.0030	0.57	0.51	1.9290	Na ₂ O	0.77	0.07
Mg	Ka	346.2	3.3972	0.2722	0.1030	15.41	13.11	1.4957	MgO	25.55	1.71
Al	Ka	87.8	1.7108	0.0690	0.0261	4.08	3.13	1.5613	Al ₂ O ₃	7.70	0.41
Si	Ka	495.2	4.0629	0.4104	0.1553	21.37	15.74	1.3760	SiO ₂	45.71	2.05
P	Ka	7.1	0.4869	0.0067	0.0025	0.38	0.25	1.5060	P ₂ O ₅	0.87	0.03
S	Ka	73.6	1.5664	0.0777	0.0294	3.91	2.52	1.3287	SO ₃	9.75	0.33
K	Ka	5.9	0.4419	0.0084	0.0032	0.38	0.20	1.1970	K ₂ O	0.46	0.03
Ca	Ka	78.8	1.6203	0.1271	0.0481	5.54	2.86	1.1533	CaO	7.76	0.37
Ti	Ka	1.6	0.2315	0.0033	0.0013	0.16	0.07	1.2477	TiO ₂	0.26	0.01
Fe	Ka	4.3	0.3797	0.0174	0.0066	0.82	0.30	1.2390	Fe ₂ O ₃	1.17	0.04
				1.0000	0.3784	100.00	100.00			100.00	5.05

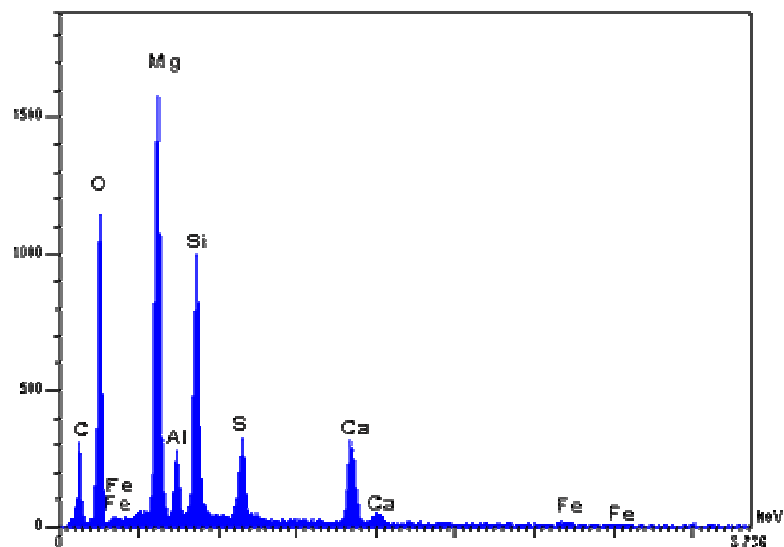


FIGURA C.5: Relatório de Espectros Referentes à Área 4 da Foto C.1.

TABELA C.12: Resultados e Medidas Referentes à Área 4 da Foto C.1.

Elt	XRy	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						45.56	59.66	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	11.4	0.6161	0.0092	0.0036	0.69	0.63	1.9334	Na ₂ O	0.94	0.08
Mg	Ka	448.1	3.8646	0.3488	0.1358	20.40	17.58	1.5023	MgO	33.82	2.36
Al	Ka	79.4	1.6265	0.0617	0.0240	3.96	3.08	1.6484	Al ₂ O ₃	7.48	0.41
Si	Ka	301.2	3.1686	0.2471	0.0962	13.71	10.23	1.4251	SiO ₂	29.33	1.37
P	Ka	8.0	0.5167	0.0074	0.0029	0.42	0.29	1.4586	P ₂ O ₅	0.97	0.04
S	Ka	104.9	1.8696	0.1096	0.0427	5.53	3.61	1.2965	SO ₃	13.81	0.48
K	Ka	2.8	0.3066	0.0040	0.0016	0.19	0.10	1.1836	K ₂ O	0.22	0.01
Ca	Ka	117.9	1.9825	0.1883	0.0733	8.40	4.39	1.1456	CaO	11.75	0.59
Ti	Ka	1.9	0.2540	0.0039	0.0015	0.19	0.08	1.2487	TiO ₂	0.32	0.01
Fe	Ka	5.0	0.4073	0.0198	0.0077	0.95	0.36	1.2369	Fe ₂ O ₃	1.36	0.05
				1.0000	0.3893	100.00	100.00			100.00	5.41

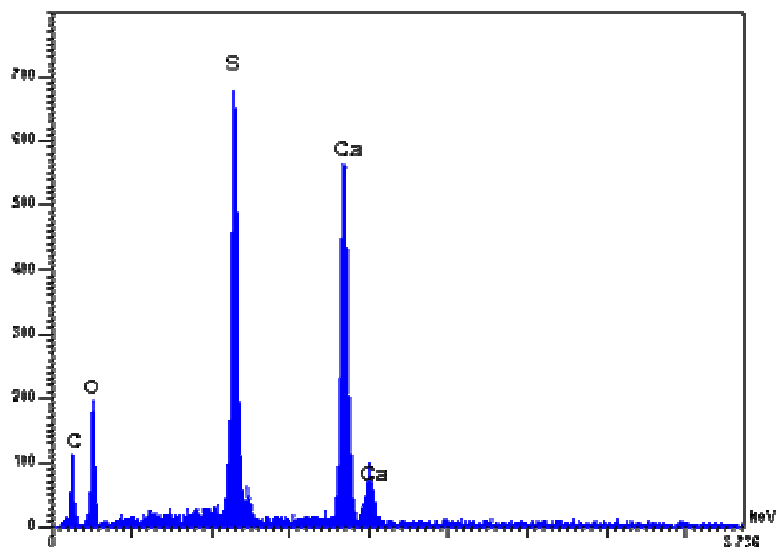


FIGURA C.6: Relatório de Espectros Referentes à Área 5 da Foto C.1.

TABELA C.13: Resultados e Medidas Referentes à Área 5 da Foto C.1.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						45.56	65.47	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	1.2	0.1975	0.0016	0.0008	0.17	0.17	2.3027	Na2O	0.24	0.02
Mg	Ka	3.2	0.3268	0.0041	0.0020	0.34	0.32	1.6865	MgO	0.56	0.04
Al	Ka	2.2	0.2699	0.0028	0.0014	0.20	0.17	1.4369	Al2O3	0.37	0.02
Si	Ka	2.5	0.2899	0.0034	0.0017	0.20	0.17	1.2296	SiO2	0.43	0.02
P	Ka	4.6	0.3923	0.0070	0.0034	0.40	0.30	1.1673	P2O5	0.92	0.04
S	Ka	229.3	2.7644	0.3937	0.1914	21.07	15.11	1.1007	SO3	52.61	1.85
K	Ka	1.7	0.2396	0.0040	0.0020	0.22	0.13	1.1169	K2O	0.26	0.02
Ca	Ka	218.2	2.6970	0.5726	0.2784	31.19	17.89	1.1201	CaO	43.64	2.19
Ti	Ka	0.8	0.1602	0.0026	0.0013	0.16	0.08	1.2841	TiO2	0.27	0.01
Fe	Ka	1.3	0.2051	0.0082	0.0040	0.50	0.20	1.2353	Fe2O3	0.71	0.02
				1.0000	0.4863	100.00	100.00			100.00	4.22

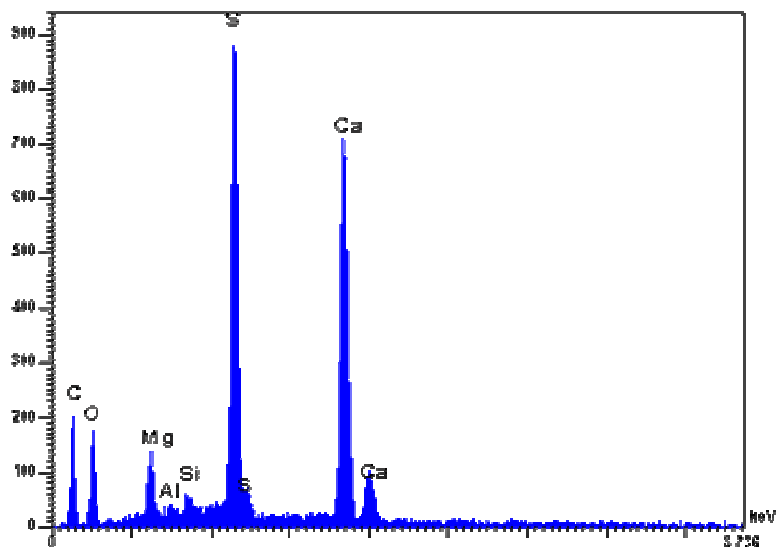


FIGURA C.7: Relatório de Espectros Referentes à Área 6 da Foto C.1.

TABELA C.14: Resultados e Medidas Referentes à Área 6 da Foto C.1.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						45.89	65.11	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	1.7	0.2345	0.0017	0.0008	0.18	0.18	2.2612	Na ₂ O	0.24	0.02
Mg	Ka	34.0	1.0640	0.0329	0.0155	2.59	2.41	1.6649	MgO	4.29	0.30
Al	Ka	6.8	0.4773	0.0066	0.0031	0.46	0.38	1.4589	Al ₂ O ₃	0.86	0.05
Si	Ka	13.4	0.6683	0.0137	0.0065	0.81	0.65	1.2480	SiO ₂	1.72	0.08
P	Ka	8.0	0.5176	0.0093	0.0044	0.52	0.38	1.1878	P ₂ O ₅	1.19	0.05
S	Ka	296.9	3.1461	0.3863	0.1823	20.35	14.40	1.1160	SO ₃	50.80	1.77
K	Ka	2.9	0.3085	0.0051	0.0024	0.27	0.16	1.1264	K ₂ O	0.32	0.02
Ca	Ka	269.7	2.9981	0.5360	0.2530	28.45	16.11	1.1244	CaO	39.80	1.98
Ti	Ka	1.4	0.2123	0.0034	0.0016	0.21	0.10	1.2812	TiO ₂	0.35	0.01
Fe	Ka	1.0	0.1846	0.0051	0.0024	0.30	0.12	1.2362	Fe ₂ O ₃	0.42	0.01
				1.0000	0.4720	100.00	100.00			100.00	4.29

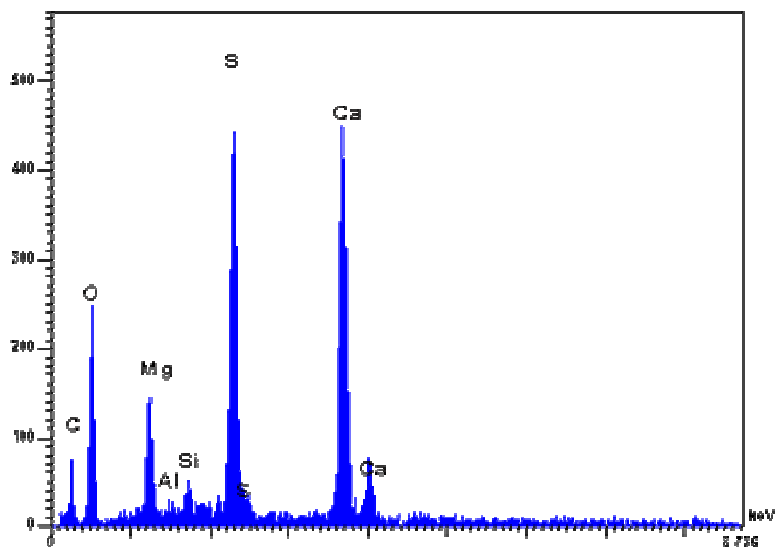


FIGURA C.8: Relatório de Espectros Referentes à Área 7 da Foto C.1.

TABELA C.15: Resultados e Medidas Referentes à Área 7 da Foto C.1.

Elt	XRy	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						44.53	63.53	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	1.1	0.1950	0.0020	0.0009	0.21	0.21	2.2475	Na ₂ O	0.29	0.03
Mg	Ka	39.5	1.1472	0.0659	0.0313	5.20	4.88	1.6589	MgO	8.62	0.61
Al	Ka	3.6	0.3460	0.0060	0.0028	0.43	0.36	1.4956	Al ₂ O ₃	0.80	0.05
Si	Ka	11.3	0.6129	0.0198	0.0094	1.20	0.97	1.2715	SiO ₂	2.56	0.12
P	Ka	1.7	0.2413	0.0035	0.0017	0.20	0.15	1.2089	P ₂ O ₅	0.46	0.02
S	Ka	149.8	2.2346	0.3358	0.1596	17.97	12.79	1.1256	SO ₃	44.86	1.61
K	Ka	1.0	0.1840	0.0031	0.0015	0.17	0.10	1.1189	K ₂ O	0.20	0.01
Ca	Ka	159.9	2.3085	0.5476	0.2603	29.14	16.60	1.1196	CaO	40.78	2.09
Ti	Ka	0.9	0.1759	0.0041	0.0019	0.25	0.12	1.2789	TiO ₂	0.41	0.01
Fe	Ka	1.4	0.2181	0.0122	0.0058	0.71	0.29	1.2345	Fe ₂ O ₃	1.02	0.04
				1.0000	0.4753	100.00	100.00			100.00	4.59

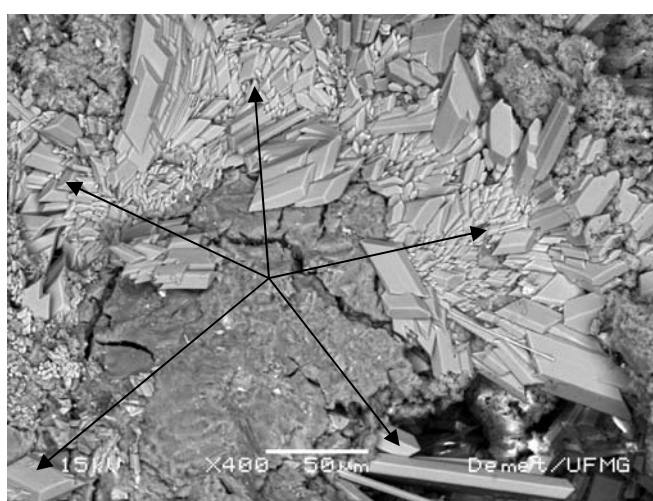


FOTO C.2: Gesso Formado nas Amostras de Concreto em Geral.

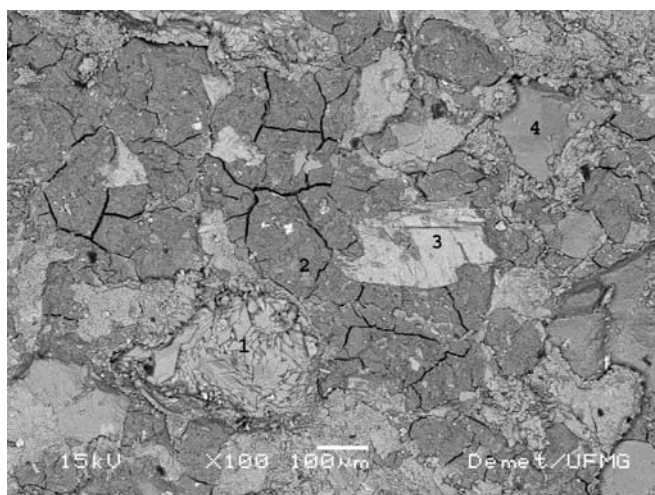


FOTO C.3: Vista com Aumento de 100X de Região da Amostra T53.

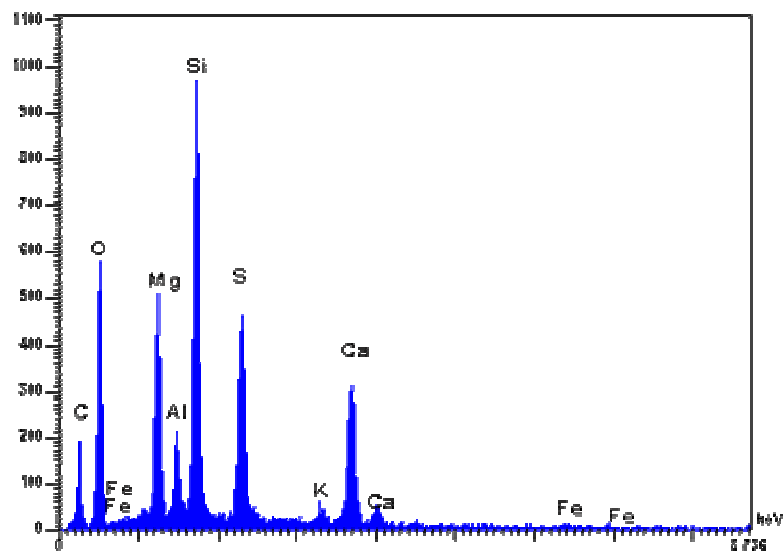


FIGURA C.9: Relatório de Espectros da Análise Geral da Foto C.3.

TABELA C.16: Resultados e Medidas Referentes à Análise Geral da Foto C.3.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						47.62	63.34	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	10.9	0.6028	0.0104	0.0042	0.86	0.79	2.0509	Na2O	1.15	0.10
Mg	Ka	145.6	2.2028	0.1339	0.0535	8.38	7.34	1.5654	MgO	13.90	0.93
Al	Ka	66.0	1.4831	0.0606	0.0243	3.62	2.85	1.4910	Al2O3	6.83	0.36
Si	Ka	291.9	3.1193	0.2829	0.1131	14.92	11.31	1.3187	SiO2	31.92	1.43
P	Ka	9.4	0.5584	0.0103	0.0041	0.57	0.39	1.3897	P2O5	1.31	0.05
S	Ka	167.3	2.3617	0.2066	0.0826	10.35	6.87	1.2526	SO3	25.84	0.87
K	Ka	15.2	0.7129	0.0257	0.0103	1.21	0.66	1.1789	K2O	1.46	0.08
Ca	Ka	129.5	2.0778	0.2444	0.0977	11.22	5.96	1.1479	CaO	15.70	0.75
Ti	Ka	3.4	0.3346	0.0081	0.0032	0.41	0.18	1.2566	TiO2	0.68	0.02
Fe	Ka	3.7	0.3489	0.0172	0.0069	0.85	0.32	1.2373	Fe2O3	1.21	0.04
				1.0000	0.3999	100.00	100.00			100.00	4.63

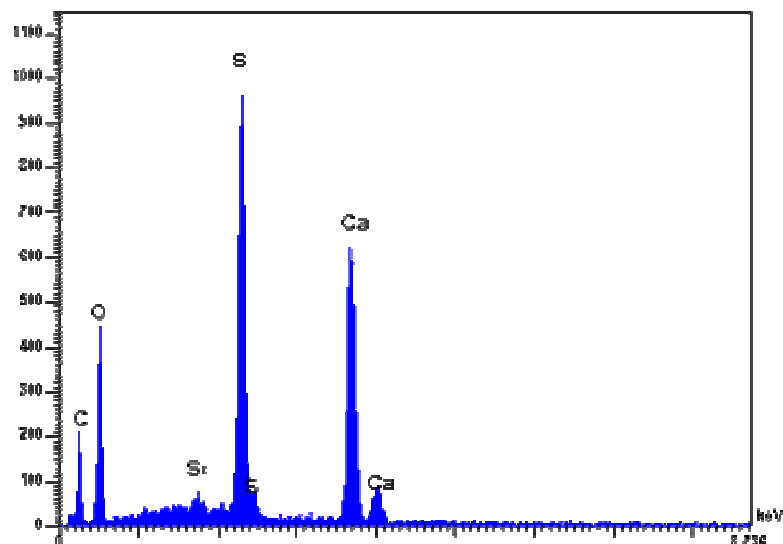


FIGURA C.10: Relatório de Espectros Referentes à Área 1 da Foto C.3.

TABELA C.17: Resultados e Medidas Referentes à Área 1 da Foto C.3.

Elt	XRy	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						47.37	66.39	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	6.9	0.4786	0.0069	0.0032	0.72	0.70	2.2575	Na ₂ O	0.97	0.08
Mg	Ka	8.5	0.5319	0.0082	0.0038	0.63	0.58	1.6731	MgO	1.05	0.07
Al	Ka	10.9	0.6020	0.0105	0.0048	0.69	0.58	1.4344	Al ₂ O ₃	1.31	0.07
Si	Ka	22.3	0.8630	0.0228	0.0105	1.30	1.03	1.2355	SiO ₂	2.77	0.12
P	Ka	12.0	0.6335	0.0139	0.0064	0.76	0.55	1.1839	P ₂ O ₅	1.73	0.07
S	Ka	330.5	3.3192	0.4301	0.1977	22.09	15.45	1.1176	SO ₃	55.16	1.86
K	Ka	3.9	0.3603	0.0069	0.0032	0.36	0.21	1.1398	K ₂ O	0.44	0.03
Ca	Ka	246.8	2.8684	0.4909	0.2256	25.51	14.27	1.1310	CaO	35.70	1.72
Ti	Ka	1.8	0.2463	0.0046	0.0021	0.27	0.13	1.2789	TiO ₂	0.45	0.02
Fe	Ka	1.0	0.1843	0.0051	0.0023	0.29	0.12	1.2372	Fe ₂ O ₃	0.41	0.01
				1.0000	0.4596	100.00	100.00			100.00	4.05

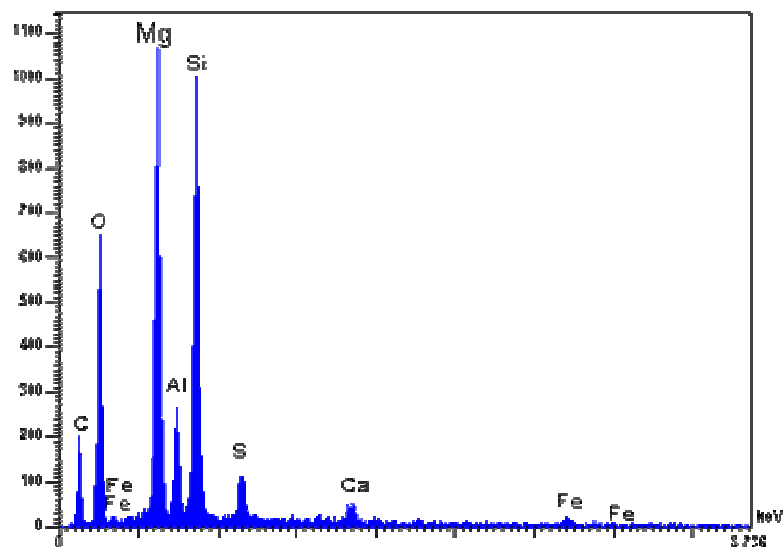


FIGURA C.11: Relatório de Espectros Referentes à Área 2 da Foto C.3.

TABELA C.18: Resultados e Medidas Referentes à Área 2 da Foto C.3.

Elt	XRy	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						47.04	60.48	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	4.0	0.3630	0.0052	0.0019	0.36	0.33	1.9086	Na ₂ O	0.49	0.04
Mg	Ka	279.3	3.0513	0.3521	0.1296	19.21	16.25	1.4823	MgO	31.84	2.15
Al	Ka	75.9	1.5903	0.0956	0.0352	5.69	4.34	1.6172	Al ₂ O ₃	10.75	0.57
Si	Ka	281.8	3.0651	0.3744	0.1378	19.71	14.44	1.4309	SiO ₂	42.17	1.91
P	Ka	2.4	0.2834	0.0036	0.0013	0.20	0.14	1.5300	P ₂ O ₅	0.47	0.02
S	Ka	35.7	1.0916	0.0605	0.0223	2.99	1.92	1.3432	SO ₃	7.47	0.25
K	Ka	3.2	0.3275	0.0074	0.0027	0.33	0.17	1.2036	K ₂ O	0.40	0.02
Ca	Ka	17.4	0.7614	0.0450	0.0166	1.91	0.98	1.1531	CaO	2.67	0.13
Ti	Ka	2.6	0.2935	0.0085	0.0031	0.39	0.17	1.2363	TiO ₂	0.65	0.02
Fe	Ka	7.4	0.4965	0.0476	0.0175	2.17	0.80	1.2357	Fe ₂ O ₃	3.10	0.11
				1.0000	0.3680	100.00	100.00			100.00	5.23

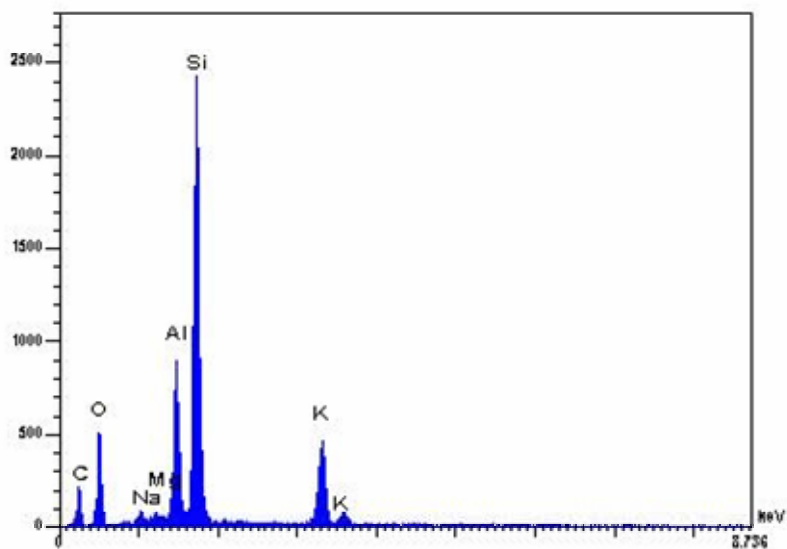


FIGURA C.12: Relatório de Espectros Referentes à Área 3 da Foto C.3.

TABELA C.19: Resultados e Medidas Referentes à Área 3 da Foto C.3.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						46.43	61.62	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	16.6	0.7429	0.0121	0.0050	0.98	0.90	1.9440	Na ₂ O	1.32	0.12
Mg	Ka	15.2	0.7119	0.0107	0.0044	0.67	0.58	1.5013	MgO	1.11	0.08
Al	Ka	262.2	2.9564	0.1840	0.0765	10.17	8.00	1.3293	Al ₂ O ₃	19.21	1.04
Si	Ka	730.8	4.9356	0.5410	0.2249	29.17	22.05	1.2972	SiO ₂	62.41	2.86
P	Ka	4.2	0.3760	0.0036	0.0015	0.23	0.15	1.5264	P ₂ O ₅	0.52	0.02
S	Ka	5.5	0.4278	0.0052	0.0022	0.29	0.19	1.3360	SO ₃	0.72	0.02
K	Ka	178.7	2.4406	0.2300	0.0956	11.40	6.19	1.1921	K ₂ O	13.73	0.80
Ca	Ka	3.9	0.3591	0.0056	0.0023	0.27	0.15	1.1818	CaO	0.38	0.02
Ti	Ka	1.4	0.2141	0.0025	0.0010	0.13	0.06	1.2485	TiO ₂	0.22	0.01
Fe	Ka	1.5	0.2223	0.0053	0.0022	0.27	0.10	1.2327	Fe ₂ O ₃	0.39	0.01
				1.0000	0.4157	100.00	100.00			100.00	4.98

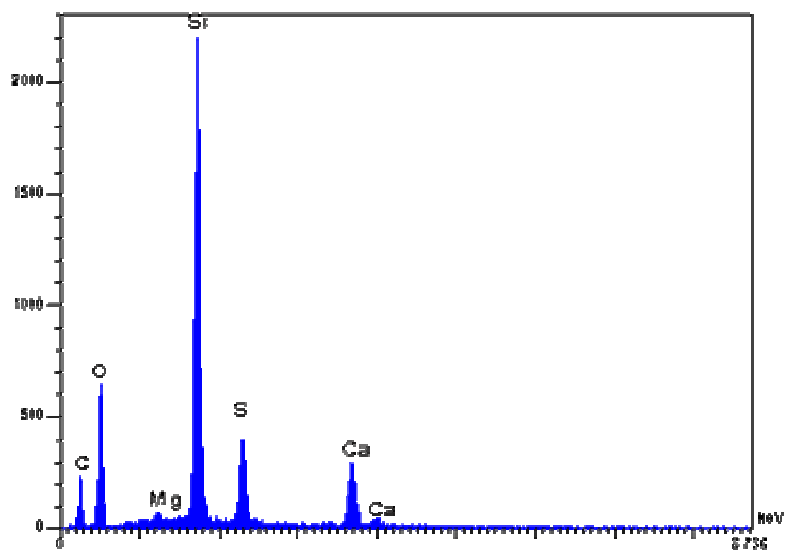


FIGURA C.13: Relatório de Espectros Referentes à Área 4 da Foto C.3.

TABELA C.20: Resultados e Medidas Referentes à Área 4 da Foto C.3.

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						51.07	66.55	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	4.9	0.4023	0.0044	0.0018	0.37	0.33	2.0627	Na ₂ O	0.49	0.04
Mg	Ka	10.5	0.5926	0.0093	0.0037	0.58	0.49	1.5596	MgO	0.96	0.06
Al	Ka	8.0	0.5169	0.0070	0.0028	0.38	0.30	1.3618	Al ₂ O ₃	0.72	0.04
Si	Ka	645.1	4.6373	0.5972	0.2388	28.87	21.43	1.2093	SiO ₂	61.77	2.58
P	Ka	7.7	0.5054	0.0080	0.0032	0.47	0.31	1.4547	P ₂ O ₅	1.07	0.04
S	Ka	140.3	2.1624	0.1654	0.0661	8.58	5.58	1.2977	SO ₃	21.43	0.67
K	Ka	1.7	0.2388	0.0028	0.0011	0.13	0.07	1.1982	K ₂ O	0.16	0.01
Ca	Ka	110.5	1.9191	0.1991	0.0796	9.22	4.79	1.1577	CaO	12.89	0.58
Ti	Ka	1.1	0.1907	0.0025	0.0010	0.13	0.06	1.2610	TiO ₂	0.21	0.01
Fe	Ka	0.9	0.1765	0.0042	0.0017	0.21	0.08	1.2436	Fe ₂ O ₃	0.30	0.01
				1.0000	0.3998	100.00	100.00			100.00	4.02



FOTO C.4: Amostra de concreto feito com cimento CP III 32 RS, agregado calcário dolomítico e submetido à solução S50 por 180 dias.

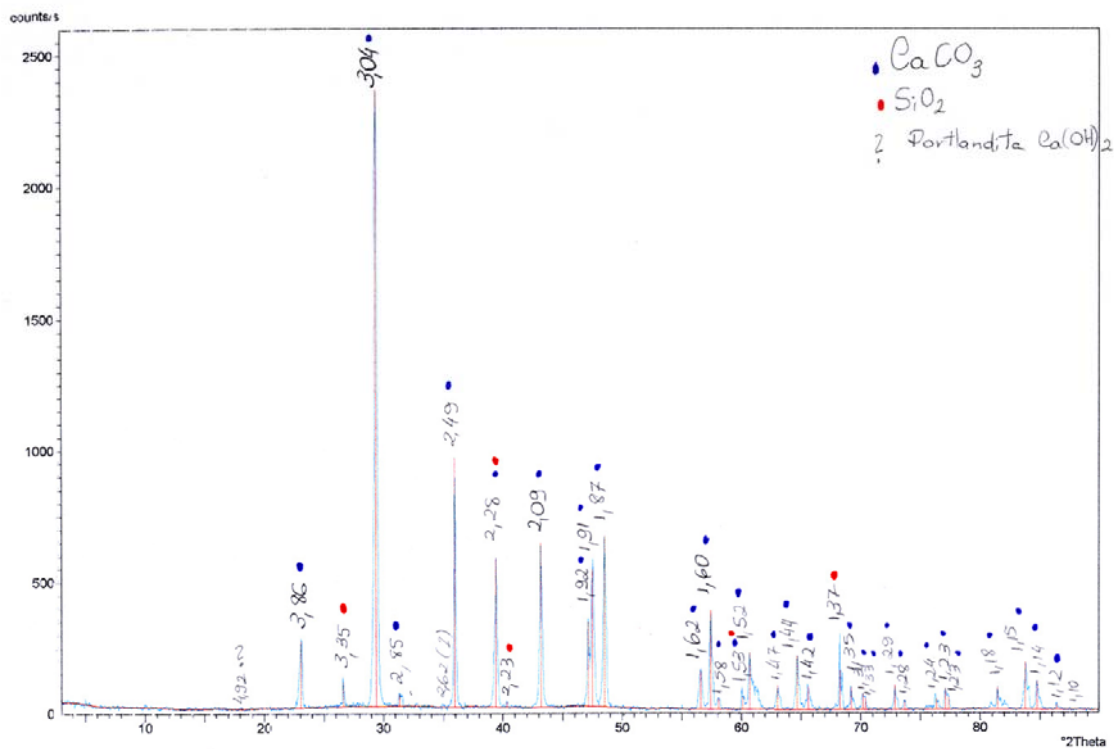


FIGURA C.14: Análise de Difração de Raios-X do Pó Acumulado no Fundo da Caixa D'água da Solução S0.

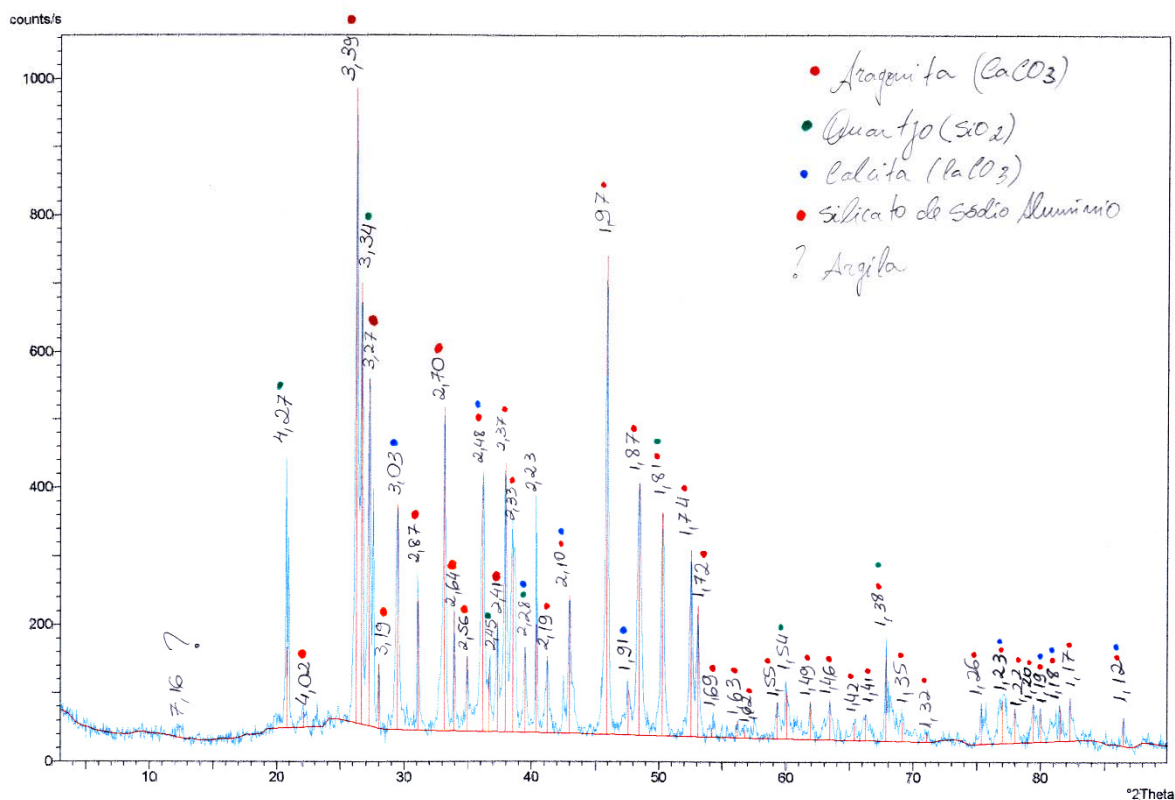


FIGURA C.15: Análise de Difração de Raios-X do Pó Acumulado no Fundo da Caixa D'água da Solução S10.

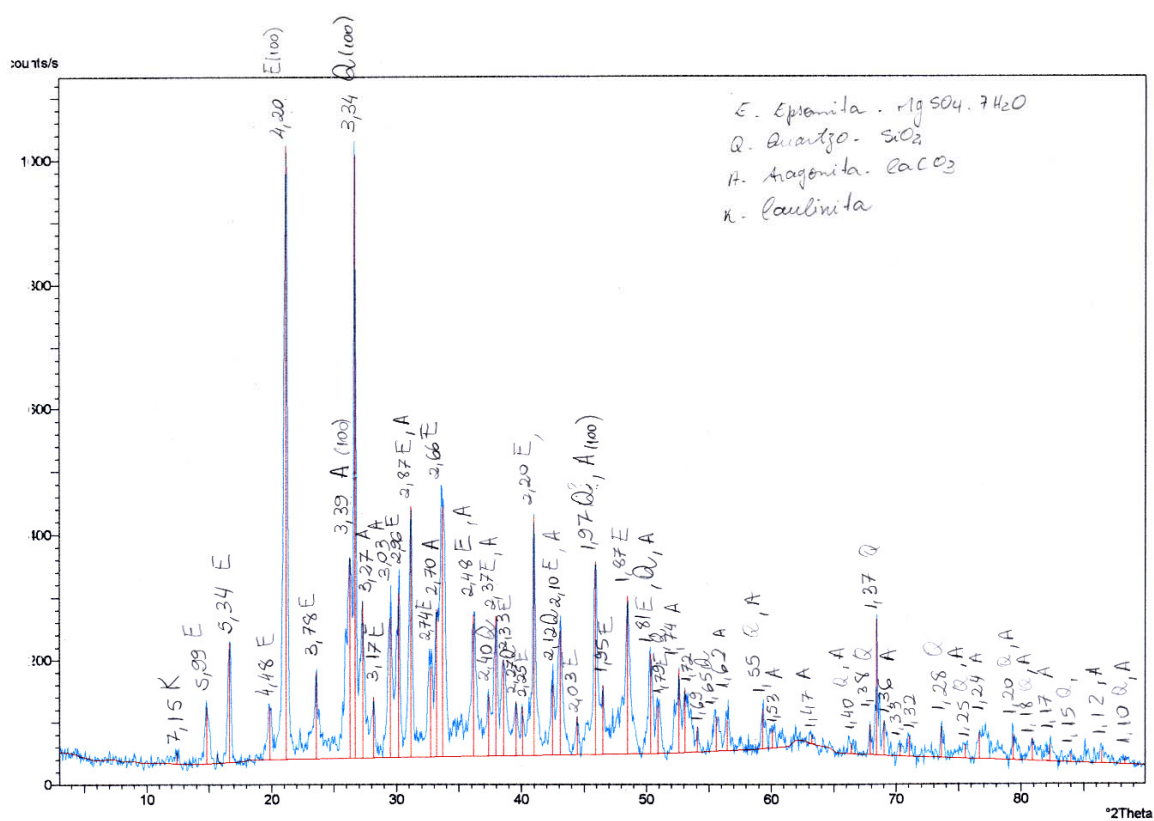


FIGURA C.16: Análise de Difração de Raios-X do Pó Acumulado no Fundo da Caixa D'água da Solução S50.



Companhia de Saneamento de Minas Gerais - Laboratório Metropolitano - BR 356,
 Km 4 - Trevo de Nova Lima - B.Hte., MG, Brasil. CEP.: 31950640 - FAX.: (0xx31)
 3250 2355. Fone: (0xx31) 3250 2365 - e.mail: labo@copasa.com.br
 CGC: 17.281.106/0001-03 - INSC.: 062.000139.0014

Belo Horizonte, 03 de dezembro de 2003

OFÍCIO N.º 039/2003

Ao Sr.
 Rodrigo Moisés Costa
 Universidade Federal de Minas Gerais

Conforme a sua solicitação informamos no quadro abaixo, os dados médios referentes às análises de pH e sulfatos da água distribuída pela COPASA, na região central de Belo Horizonte, onde se localiza a Escola de Engenharia da UFMG. Informamos que o ponto de coleta mais próximo, pertencente à nossa rede de amostragem do controle de qualidade da água distribuída em BH, se situa na Rua Rio de Janeiro, nº 109. Os dados são referentes ao período de 01/12/2001 a 02/12/2003.

Parâmetros:	pH	Sulfato:
média	8,17	9,21
máximo	9,0	14,25
mínimo	7,1	3,56
desvio padrão	0,579	3,29
total de amostras	10	11

Atenciosamente,

Mário César de Sá Horta - 08375-2
 DRMT/SPAC/DVLB
 COPASA

FIGURA C.17: Relatório da Companhia de Saneamento de Belo Horizonte (COPASA) Informando o pH da Água na Região Central da Cidade.

Laboratório de Análises Químicas	
Certificado nº: 427/03	Data: 16 de dezembro de 2003
Material: Solução de Sulfato de Magnésio	
Solicitante: Rodrigo Moyses Costa – Prof. Ney Amorim Silva – Doutorado	
Procedência: Depto Engenharia de Estruturas	



metallurgia e materiais

RESULTADOS

N.º Lab.	2887/03
Ref. da amostra	10 g/L
Mg (g/L)	2,52 g/L
MgSO₄ (g/L)	10,94 g/L
pH	8,65
N.º Lab.	2888/03
Ref. da amostra	50 g/L
Mg (g/L)	10,82 g/L
MgSO₄ (g/L)	53,58 g/L
pH	8,47

Obs.: 1- O presente resultado só é válido para as amostras enviadas.
2- Magnésio determinado por titulometria por complexação, com EDTA, utilizando como indicador Negro de Eriocromo T e Calcon. Ref.: Welcher, F.J., The Analytical Uses of Ethylenediamine Tetraacetic Acid, pag 103-142.



 Olívia Maria de Sousa Ribeiro Vasconcelos
 Engenheira Química – CRQ n.º 02300542 – 2ª. região

FIGURA C.18: Relatório Informando o pH das Soluções S10 e S50.

Laboratório de Análises Químicas	
Certificado nº: 440/03	Data: 16 de dezembro de 2003
Material: Água	
Solicitante: Rodrigo Moyses Costa – Prof. Ney Amorim Silva – Doutorado	
Procedência: Depto Engenharia de Estruturas	

metalurgia e materiais

RESULTADOS

N.º Lab.	2938/03
Ref. da amostra	Água
Mg (mg/L)	< 0,10 mg/L
pH	10,22

Obs.: 1- O presente resultado só é válido para as amostras enviadas.

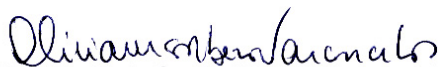

 Olívia Maria de Sousa Ribeiro Vasconcelos
 Engenheira Química – CRQ n.º 02300542 – 2ª. região

FIGURA C.19: Relatório Informando o pH da Solução S0.

ANEXO D

GRÁFICOS DA ANÁLISE DE RESÍDUOS E TESTE DE TUKEY.

D.1 Análise de Resíduos para o Tempo da Onda Ultra-Sônica – Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Resistência à Compressão

D.1.1 Resistência Ideal = 20 MPa

D.1.1.1 Gráficos de Resíduos para a Análise de Variância

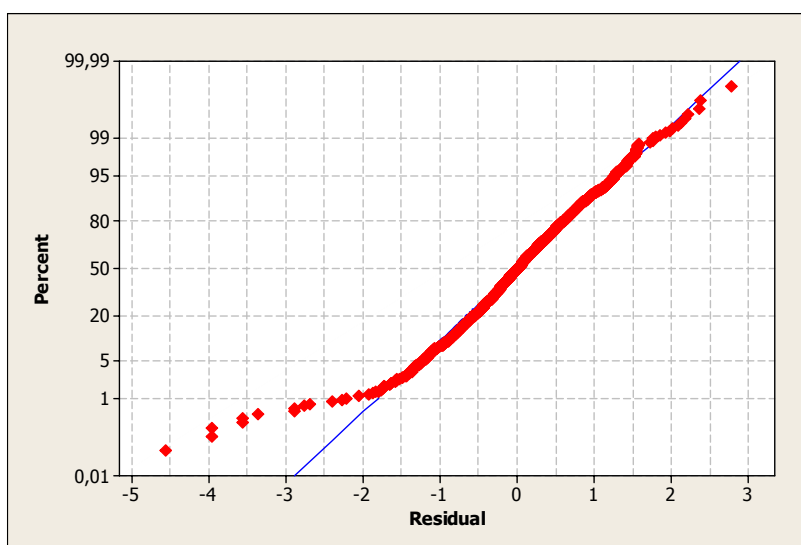


FIGURA D.1: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

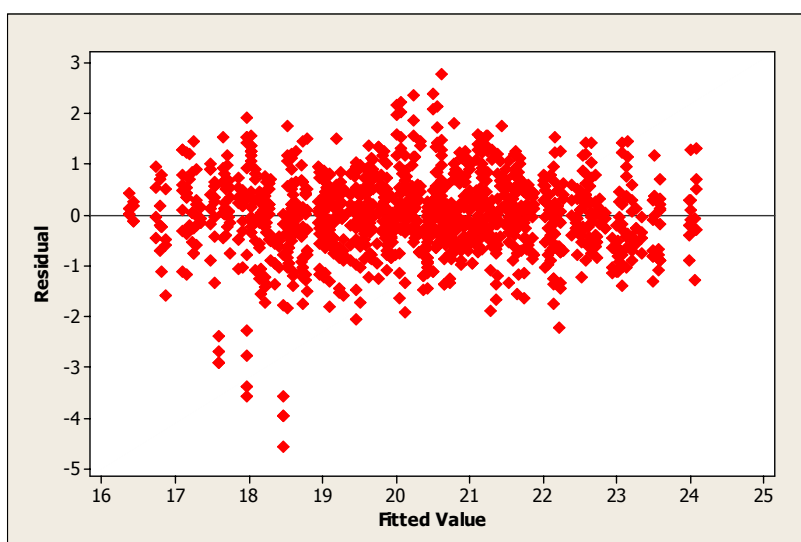


FIGURA D.2: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

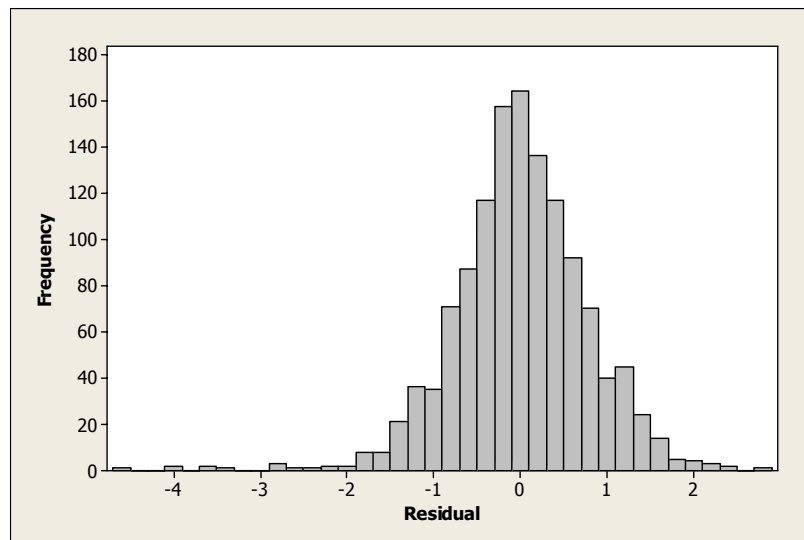


FIGURA D.3: Histograma para os Resíduos.

D.2 Resistência Ideal = 50 MPa

D.2.1 Gráficos de Resíduos para a Análise de Variância

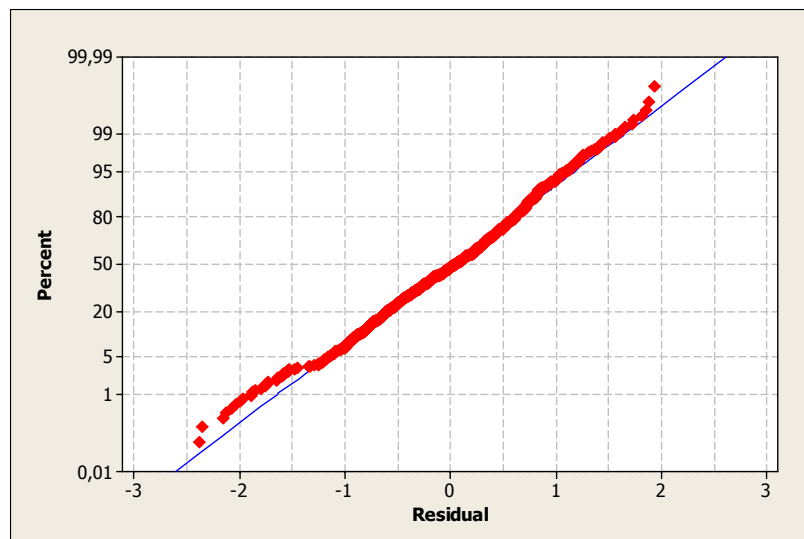


FIGURA D.4: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

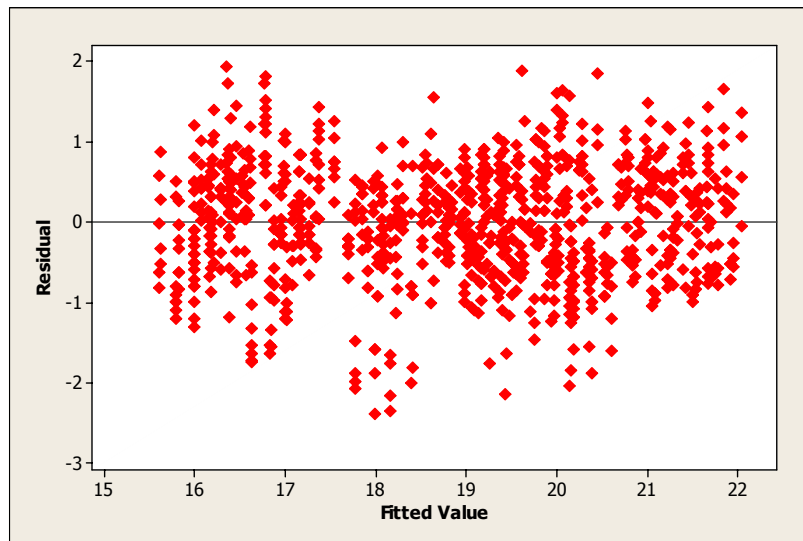


FIGURA D.5: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

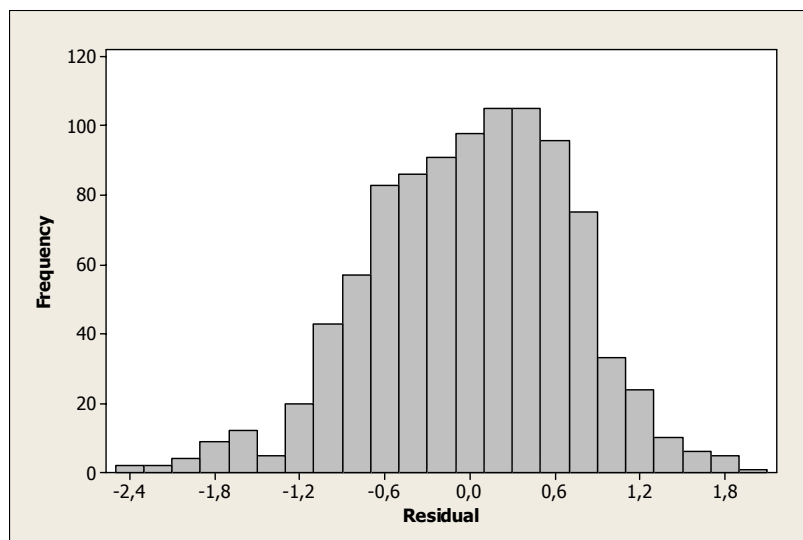


FIGURA D.6: Histograma para os Resíduos.

D.3 Gráficos de Resíduos para o Modelo de Regressão Linear para a Resistência Real

D.3.1 Resistência Ideal = 20 MPa e 50 MPa

D.3.2 Máquina James e Idade de 28 dias

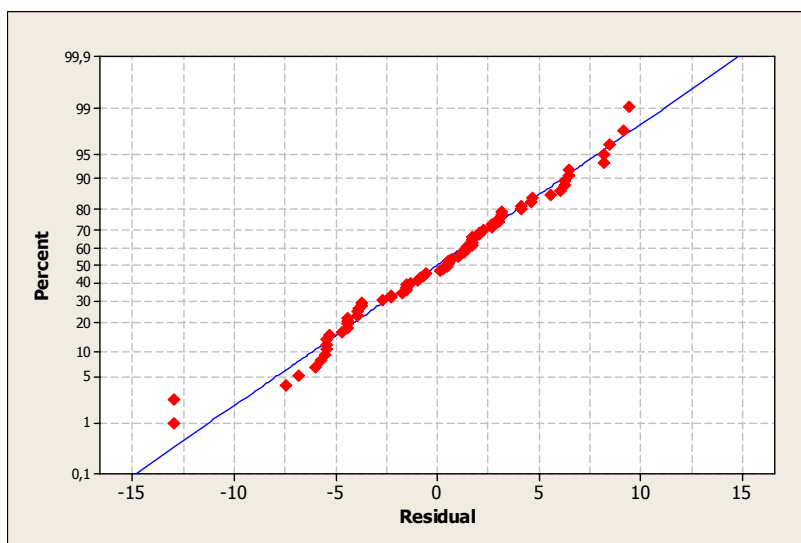


FIGURA D.7: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

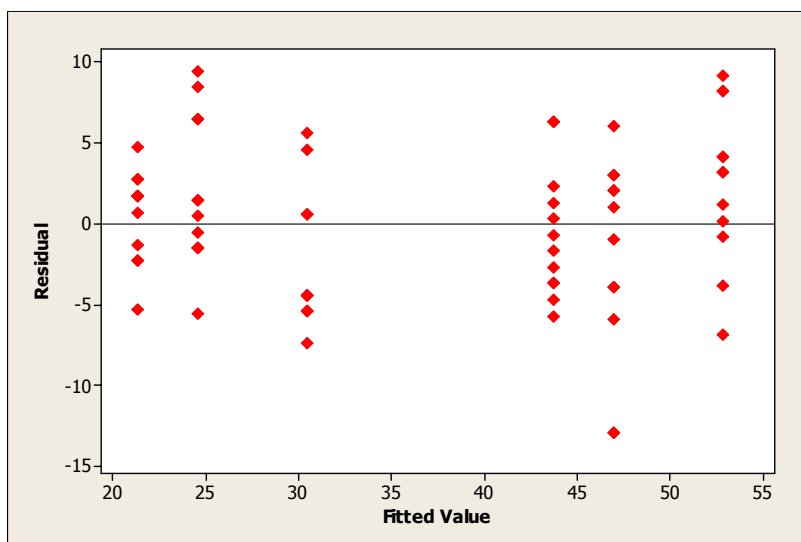


FIGURA D.8: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

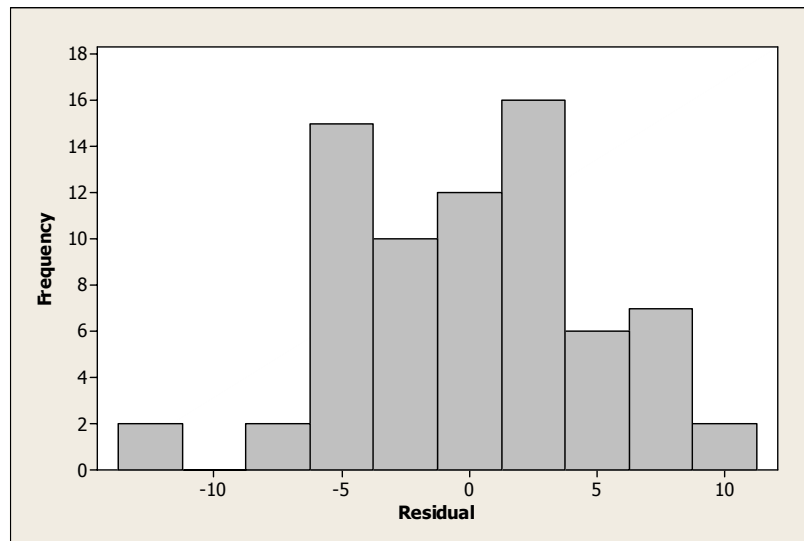


FIGURA D.9: Histograma para os Resíduos.

D.3.3 Máquina Pundit e Idade de 28 Dias

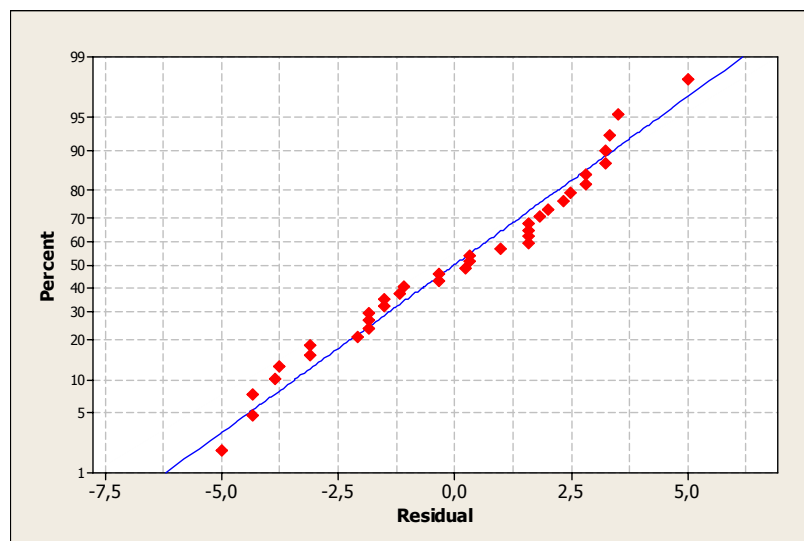


FIGURA D.10: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

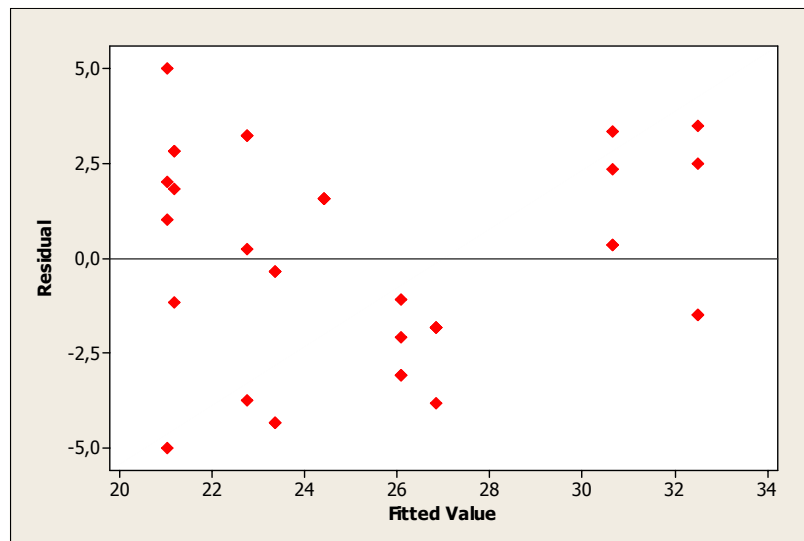


FIGURA D.11: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

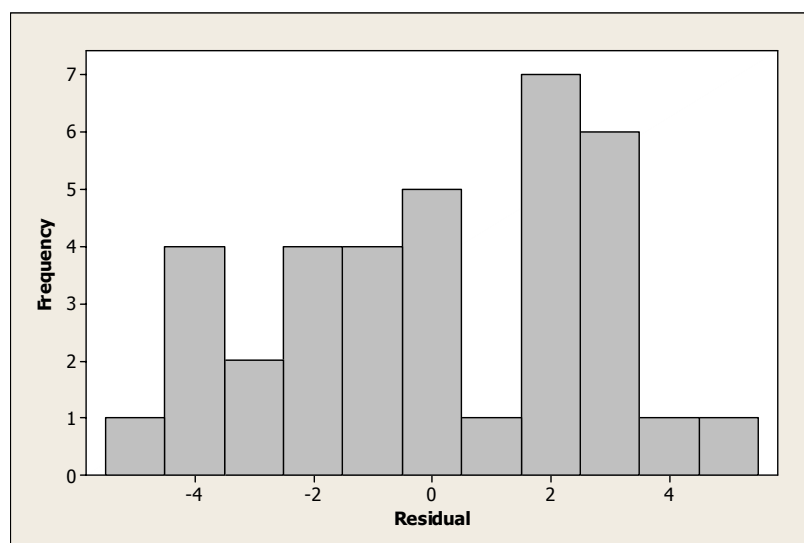


FIGURA D.12: Histograma para os Resíduos.

D.3.4 Máquina James e Idade de 90 Dias

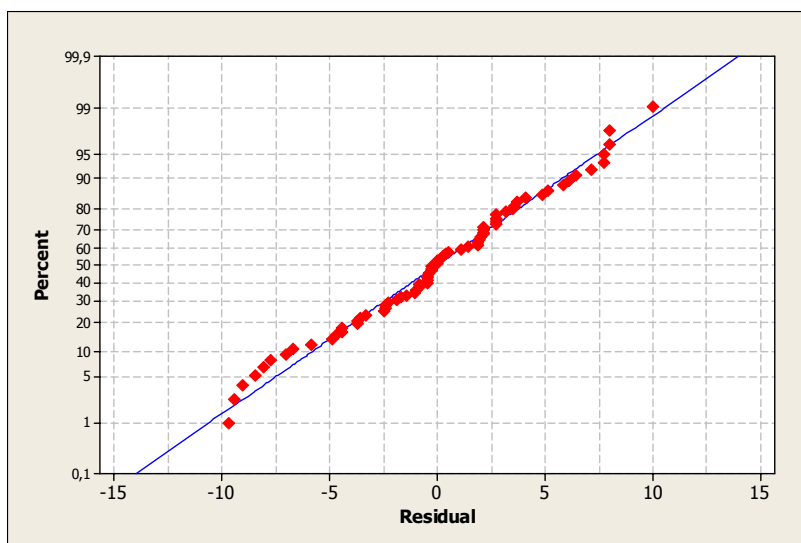


FIGURA D.13: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

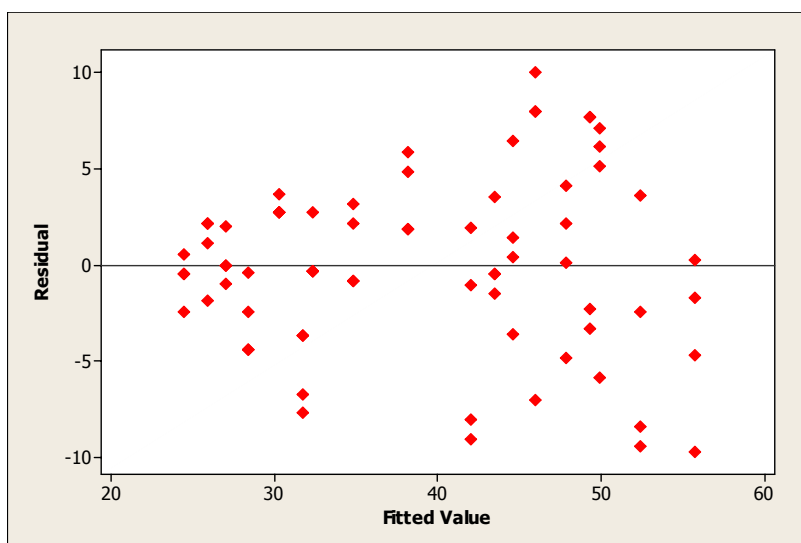


FIGURA D.14: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

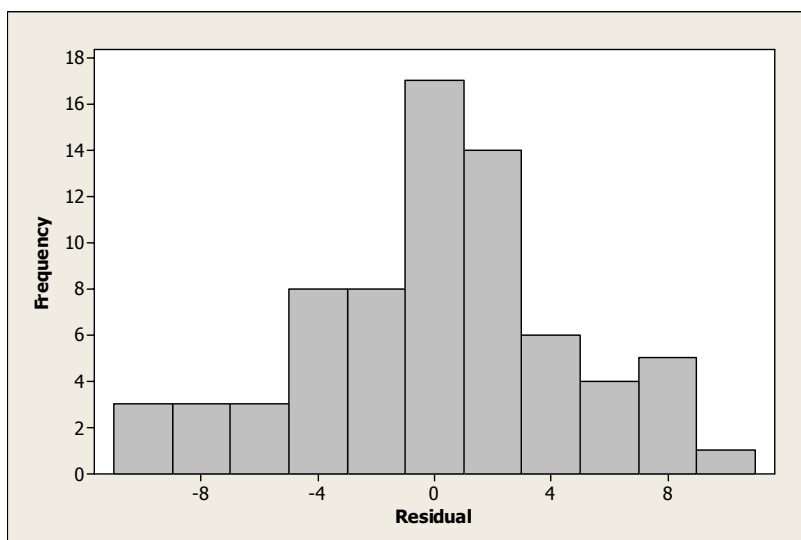


FIGURA D.15: Histograma para os Resíduos.

D.3.5 Máquina Pundit e Idade de 90 Dias

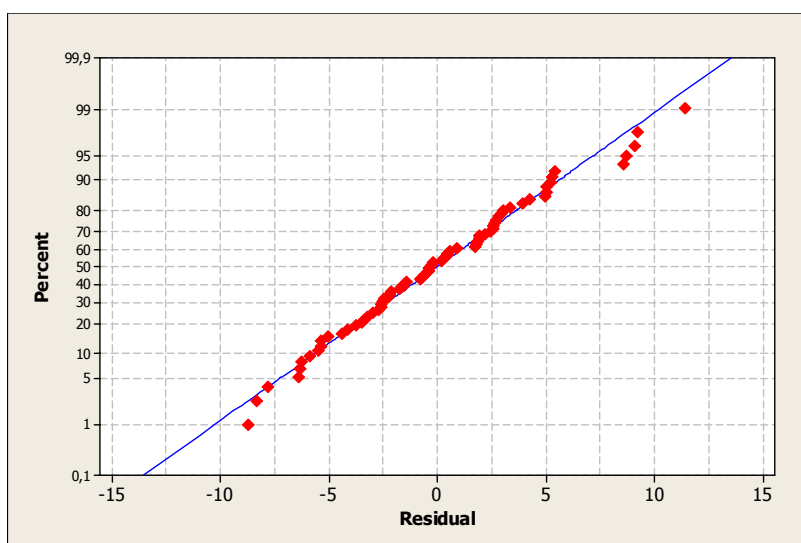


FIGURA D.16: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

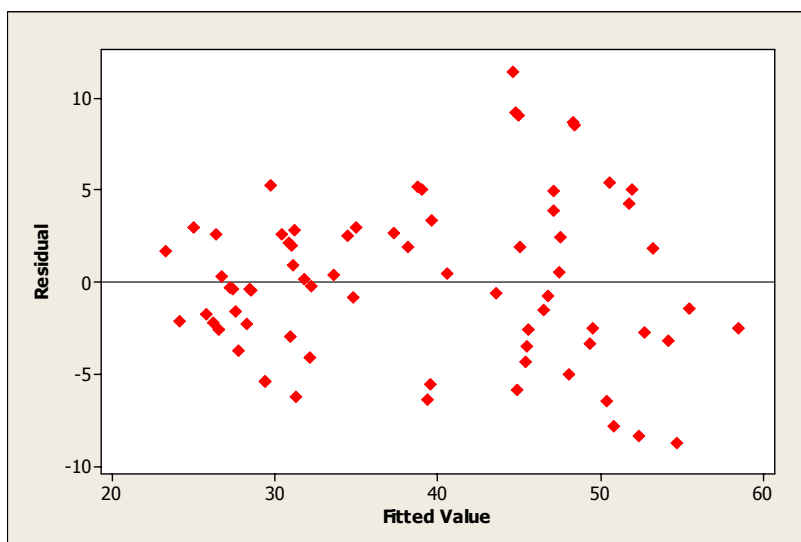


FIGURA D.17: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

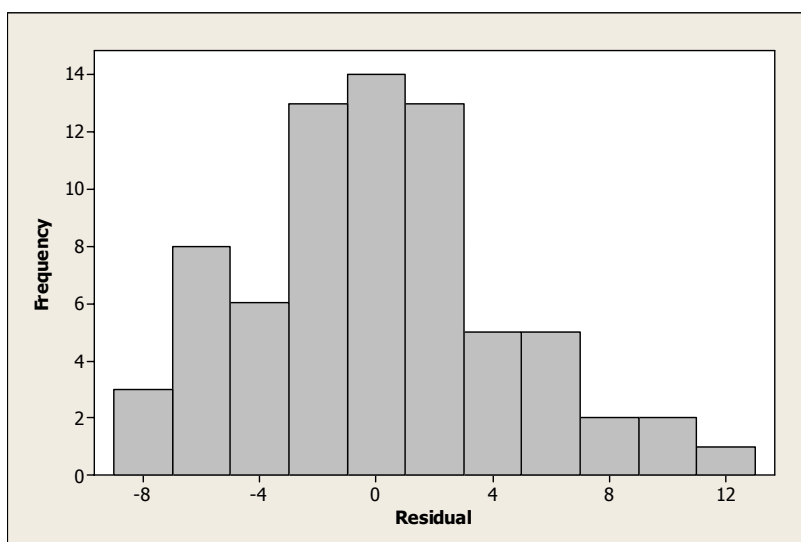


FIGURA D.18: Histograma para os Resíduos.

D.3.6 Máquina James e Idade de 180 Dias

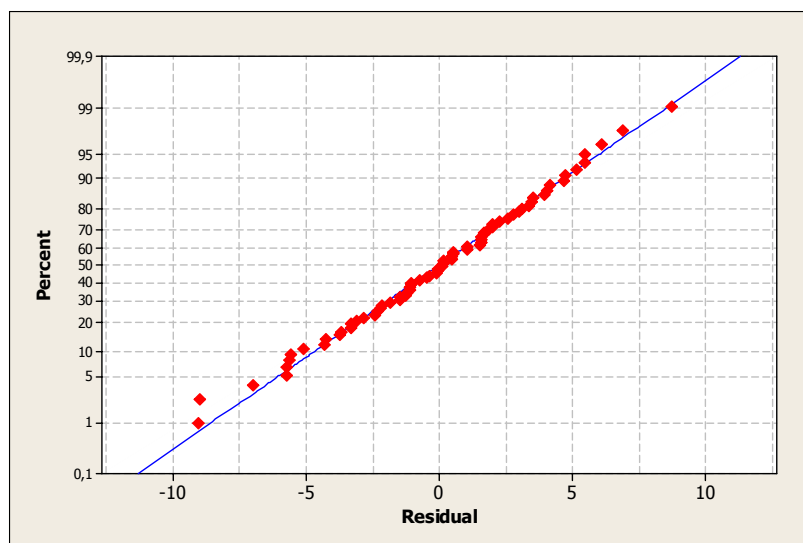


FIGURA D.19: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

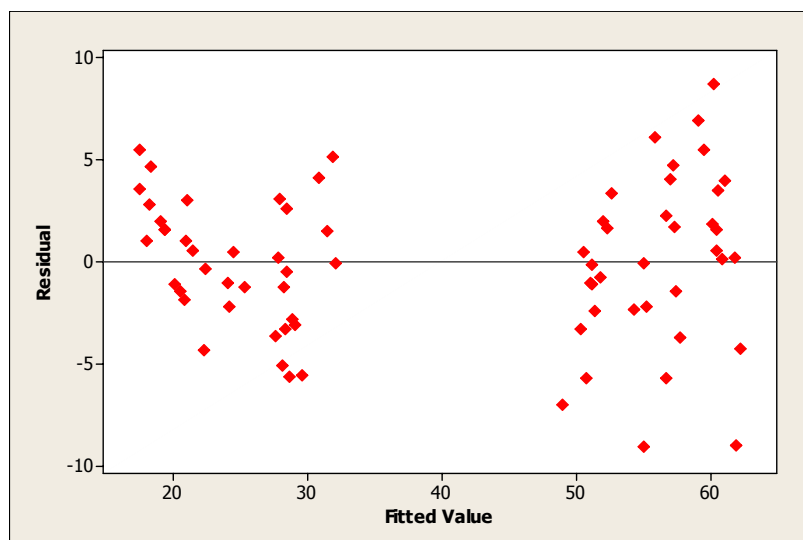


FIGURA D.20: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

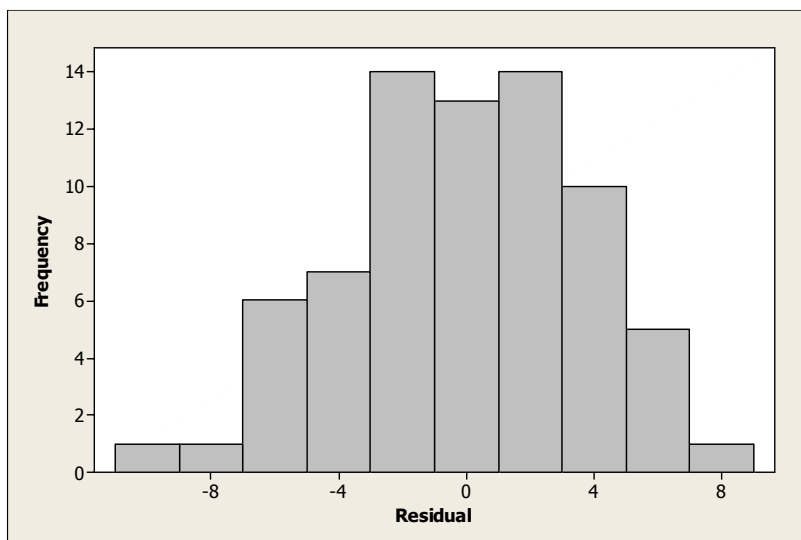


FIGURA D.21: Histograma para os Resíduos.

D.3.7 Máquina Pundit e Idade de 180 Dias

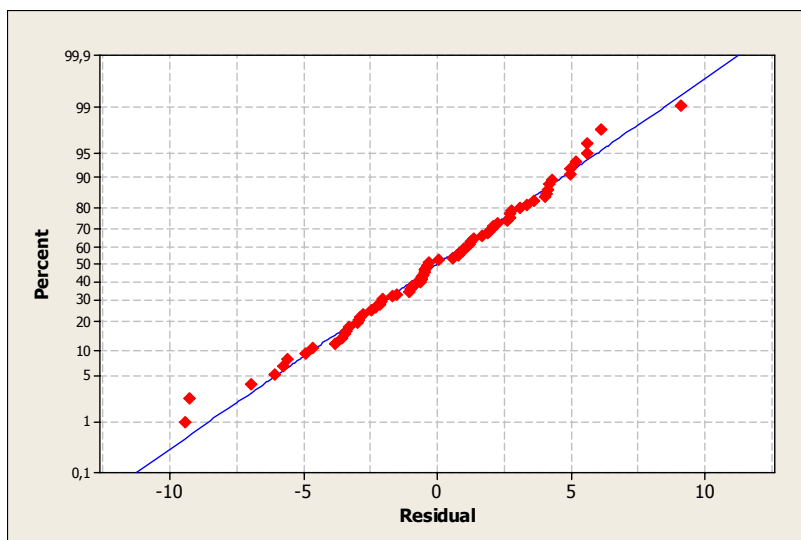


FIGURA D.22: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

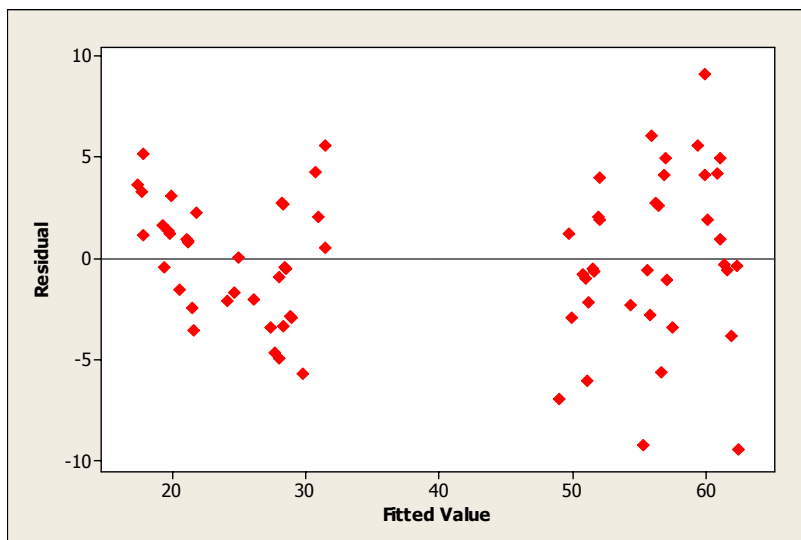


FIGURA D.23: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

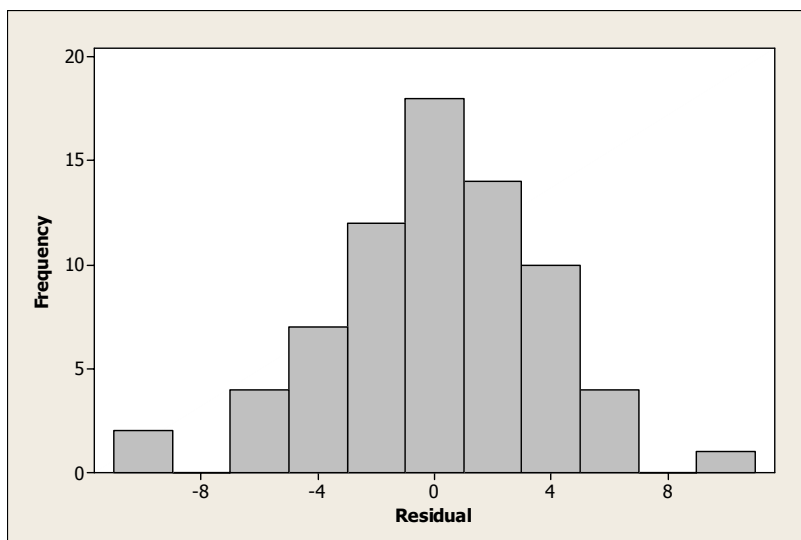


FIGURA D.24: Histograma para os Resíduos.

D.4 Teste de Tukey – Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Resistência à Compressão

D.4.1 Resistência Ideal de 20 MPa

QUADRO D.1: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Cimento.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Cimento				
Cimento = II subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
III	-0,9551	0,05326	-17,93	0,0000
IV	-0,3304	0,05414	-6,10	0,0000
Cimento = III subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
IV	0,6247	0,05414	11,54	0,0000

QUADRO D.2: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Agregado.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Agregado				
Agregado = CC subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
CD	-0,8185	0,05368	-15,25	0,0000
GN	1,2504	0,05404	23,14	0,0000
Agregado = CD subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
GN	2,069	0,05368	38,54	0,0000

QUADRO D.3: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Solução.

Tukey Simultaneous Tests
 Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica
 All Pairwise Comparisons among Levels of Solução
 Solução = S0 subtracted from:

Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S10	0,6650	0,05404	12,31	0,0000
S50	1,3884	0,05368	25,87	0,0000

Solução = S10 subtracted from:

Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S50	0,7234	0,05368	13,48	0,0000

QUADRO D.4: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Idades.

Tukey Simultaneous Tests
 Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica
 All Pairwise Comparisons among Levels of Idade
 Idade = 28 subtracted from:

Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
90	0,2172	0,05414	4,012	0,0002
180	0,3232	0,05414	5,970	0,0000

Idade = 90 subtracted from:

Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
180	0,1060	0,05326	1,991	0,1145

QUADRO D.5: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Máquinas.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Máquina				
Máquina = James subtracted from:				
Máquina	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	-2,578	0,04397	-58,64	0,0000

QUADRO D.6: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Pontos de Medição.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Ponto de Medição				
Ponto de Medição = Base subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Meio	0,3759	0,05376	6,993	0,0000
Topo	0,8705	0,05376	16,192	0,0000

Ponto de Medição = Meio subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Topo	0,4946	0,05376	9,199	0,0000

D.4.2 Resistência Ideal = 50 MPa

QUADRO D.7: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Cimento.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Cimento				
Cimento = II subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
III	0,1997	0,05571	3,584	0,0010
IV	0,3269	0,05571	5,867	0,0000
Cimento = III subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
IV	0,1272	0,05571	2,283	0,0583

QUADRO D.8: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Agregado.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Agregado				
Agregado = CC subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
CD	-0,7596	0,05571	-13,63	0,0000
GN	1,2694	0,05571	22,79	0,0000
Agregado = CD subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
GN	2,029	0,05571	36,42	0,0000

QUADRO D.9: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Solução.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Solução				
Solução = S0 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S10	0,2515	0,05571	4,515	0,0000
S50	0,3731	0,05571	6,698	0,0000
Solução = S10 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S50	0,1216	0,05571	2,183	0,0741

QUADRO D.10: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Idades.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Idade				
Idade = 28 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
90	-0,6487	0,08698	-7,459	0,0000
180	-0,2439	0,08698	-2,804	0,0140
Idade = 90 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
180	0,4049	0,04825	8,391	0,0000

QUADRO D.11: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Máquinas.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Máquina				
Máquina = James subtracted from:				
Máquina	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	-3,001	0,04825	-62,19	0,0000

QUADRO D.12: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Pontos de Medição.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo Médio da Onda Ultra-Sônica				
All Pairwise Comparisons among Levels of Ponto de Medição				
Ponto de Medição = Base subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Meio	0,2093	0,05571	3,756	0,0005
Topo	0,3802	0,05571	6,825	0,0000

Ponto de Medição = Meio subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Topo	0,1710	0,05571	3,069	0,0061

D.5 Análise de Resíduos para o Tempo da Onda Ultra-Sônica – Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

D.5.1 Resistência Ideal = 20 MPa

D.5.1.1 Gráficos de Resíduos para a Análise de Variância

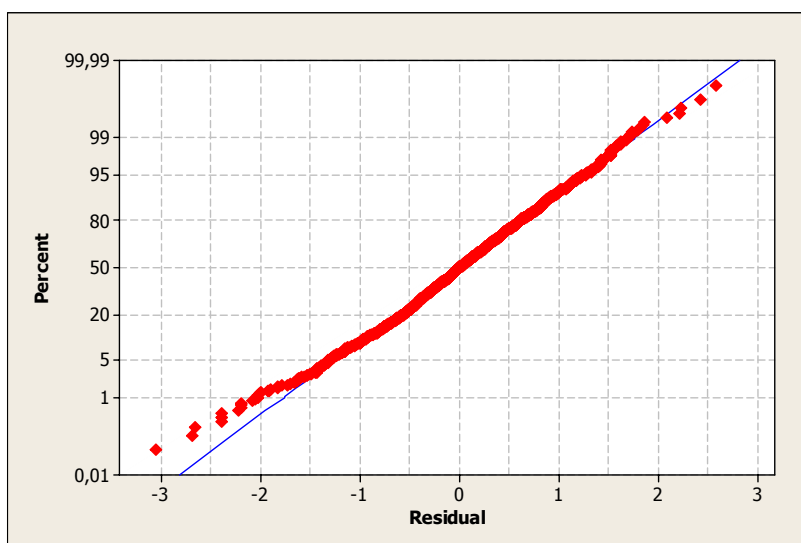


FIGURA D.25: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

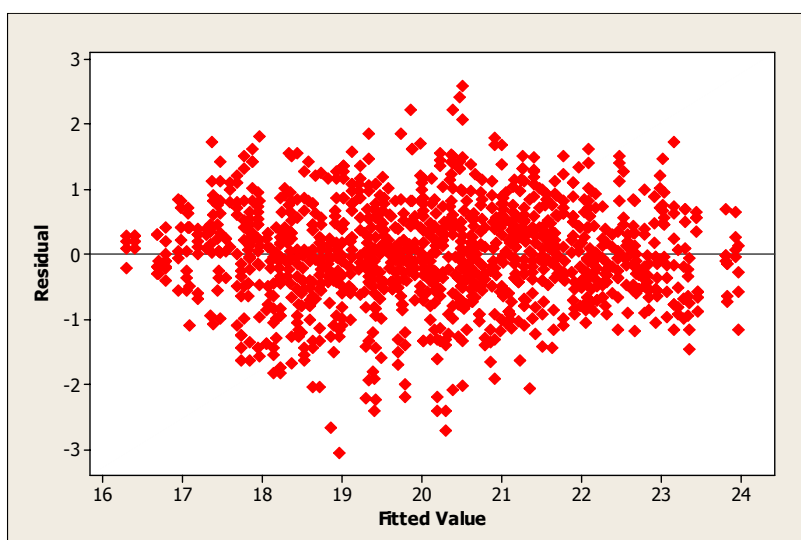


FIGURA D.26: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

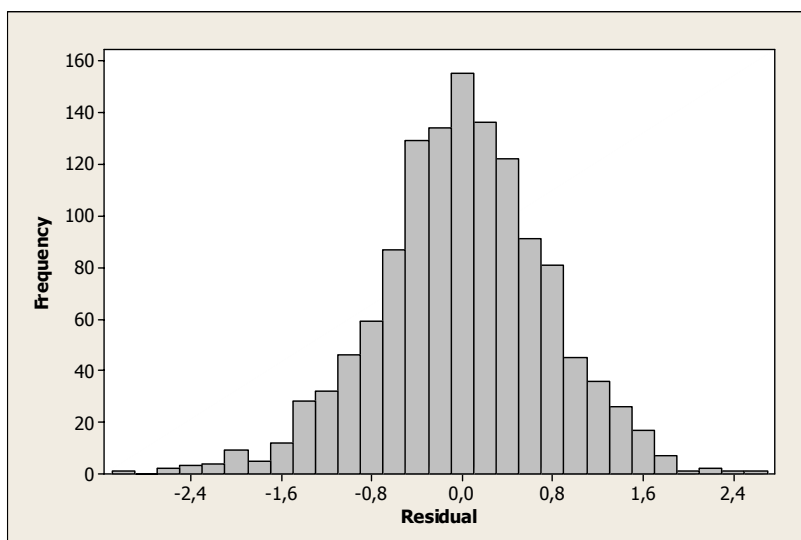


FIGURA D.27: Histograma para os Resíduos.

D.6 Resistência Ideal = 50 MPa.

D.6.1 Gráficos de Resíduos para a Análise de Variância.

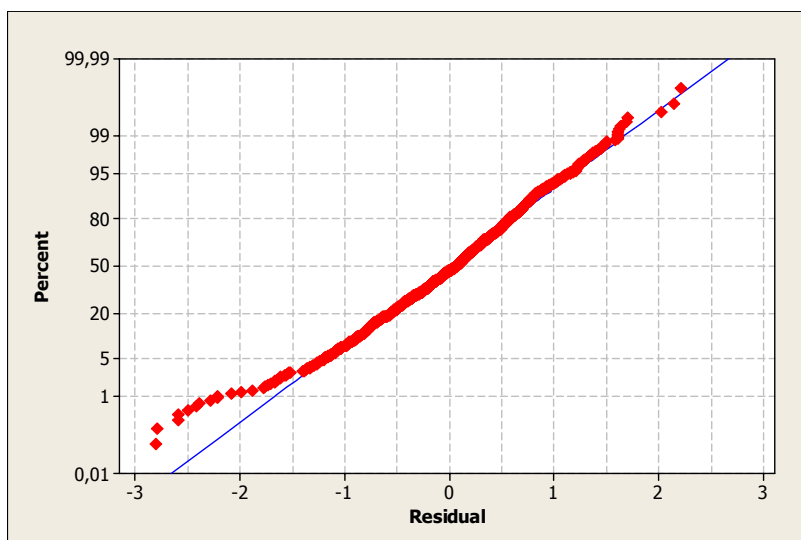


FIGURA D.28: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

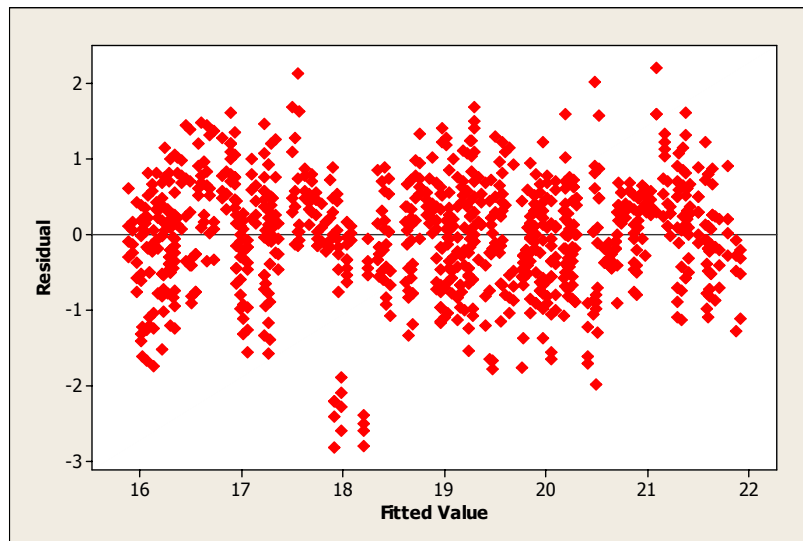


FIGURA D.29: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

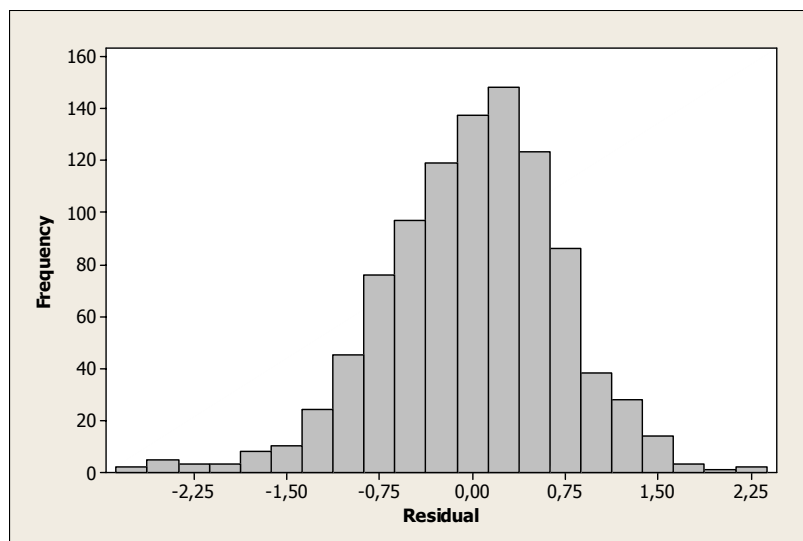


FIGURA D.30: Histograma para os Resíduos.

D.7 Gráficos de Resíduos para o Modelo de Regressão Linear para o Módulo de Elasticidade Dinâmico

D.7.1 Resistência Ideal = 20 MPa e 50 MPa

D.7.2 Máquina JAMES

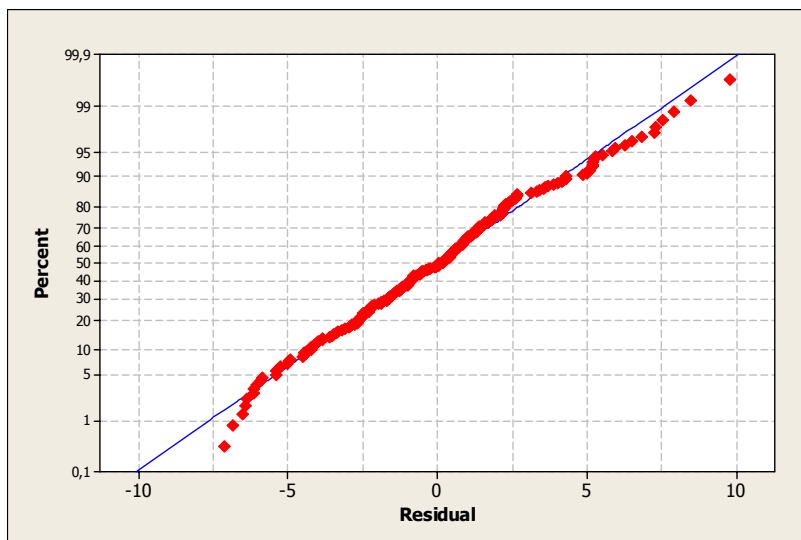


FIGURA D.31: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

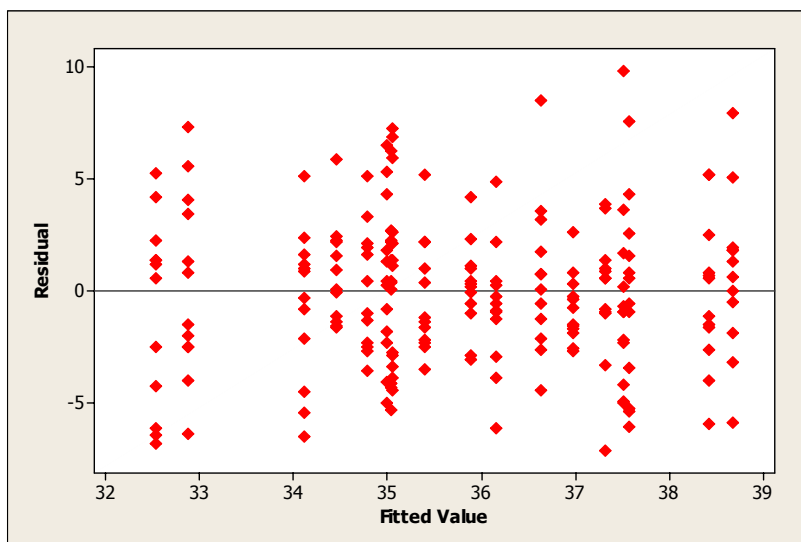


FIGURA D.32: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

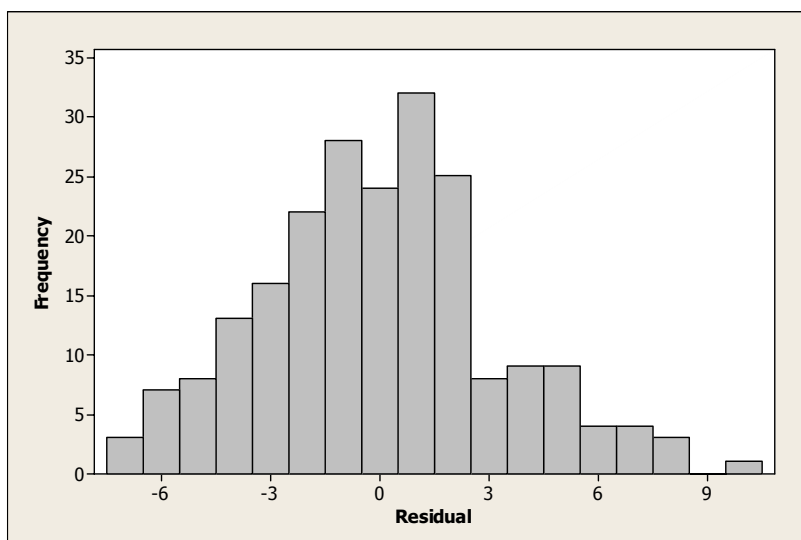


FIGURA D.33: Histograma para os Resíduos.

D.7.3 Máquina PUNDIT

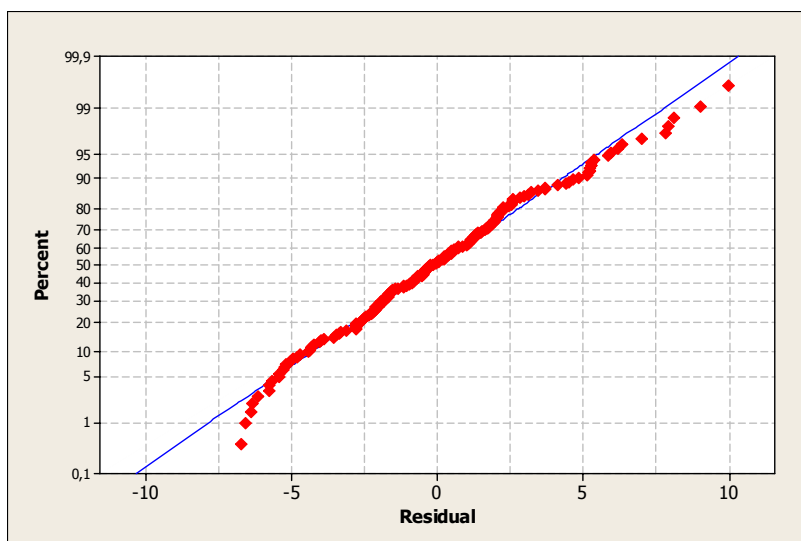


FIGURA D.34: Gráfico de Probabilidade Normal para os Resíduos.

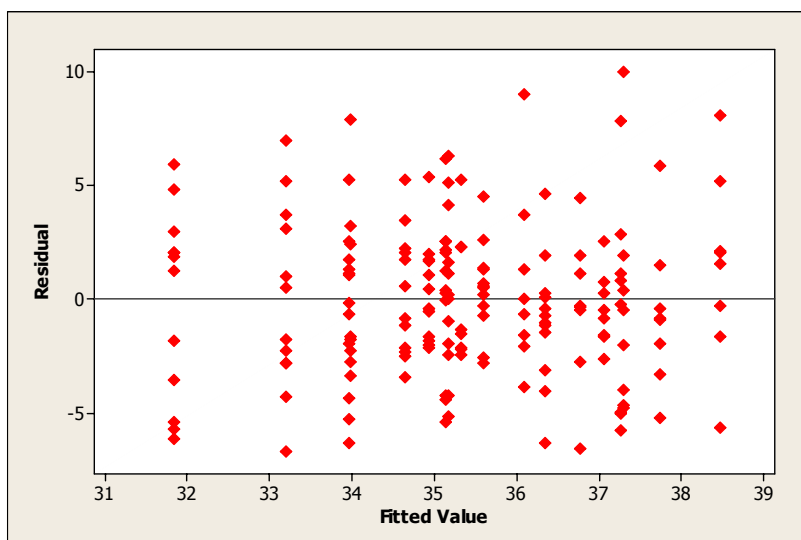


FIGURA D.35: Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados.

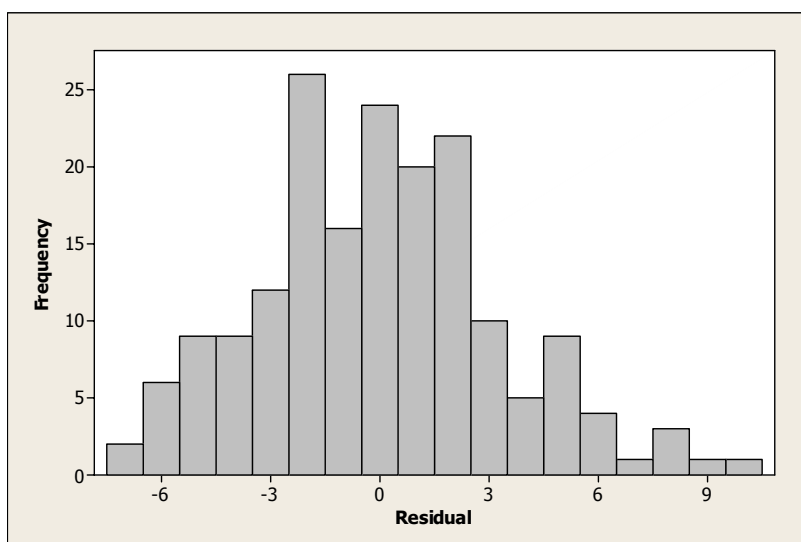


FIGURA D.36: Histograma para os Resíduos.

D.8 Teste de Tukey – Corpos-de-Prova Submetidos ao Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

D.8.1 Resistência Ideal de 20 MPa

QUADRO D.13: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Cimento.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Cimento				
Cimento = II subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
III	-0,7826	0,05195	-15,07	0,0000
IV	-0,2341	0,05281	-4,43	0,0000
Cimento = III subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
IV	0,5486	0,05281	10,39	0,0000

QUADRO D.14: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Agregado.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Agregado				
Agregado = CC subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
CD	-1,021	0,05235	-19,50	0,0000
GN	1,040	0,05270	19,74	0,0000
Agregado = CD subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
GN	2,061	0,05235	39,37	0,0000

QUADRO D.15: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Solução.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Solução				
Solução = S0 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S10	0,5276	0,05270	10,01	0,0000
S50	1,2496	0,05235	23,87	0,0000
Solução = S10 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S50	0,7220	0,05235	13,79	0,0000

QUADRO D.16: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Idades.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Idade				
Idade = 28 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
90	0,1364	0,05281	2,583	0,0265
180	0,2637	0,05281	4,994	0,0000
Idade = 90 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
180	0,1273	0,05195	2,451	0,0379

QUADRO D.17: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Máquinas.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Máquina				
Máquina = James subtracted from:				
Máquina	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	-2,664	0,04288	-62,13	0,0000

QUADRO D.18: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Transdutores.

Tukey Simultaneous Tests					
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica					
All Pairwise CoMParisons among Levels of Transdutor(Máquina)					
Máquina = James					
Transdutor = 150(J) subtracted from:					
Máquina	Transdutor	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
James	54(J)	-0,130	0,06130	-2,12	0,1466
Pundit	37(P)	-2,681	0,05998	-44,69	0,0000
Pundit	54(P)	-2,778	0,05998	-46,31	0,0000
Máquina = James					
Transdutor = 54(J) subtracted from:					
Máquina	Transdutor	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	37(P)	-2,551	0,06130	-41,61	0,0000
Pundit	54(P)	-2,648	0,06130	-43,20	0,0000
Máquina = Pundit					
Transdutor = 37(P) subtracted from:					
Máquina	Transdutor	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	54(P)	-0,09753	0,05998	-1,626	0,3639

QUADRO D.19: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Pontos de Medição.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Ponto de Medição				
Ponto de Medição = Base subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Meio	0,3976	0,05243	7,584	0,0000
Topo	0,8958	0,05243	17,083	0,0000
Ponto de Medição = Meio subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Topo	0,4981	0,05243	9,500	0,0000

D.8.2 Resistência Ideal de 50 MPa

QUADRO D.20: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Cimento.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Cimento				
Cimento = II subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
III	0,3972	0,05668	7,008	0,0000
IV	0,4849	0,05668	8,554	0,0000
Cimento = III subtracted from:				
Cimento	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
IV	0,08765	0,05668	1,546	0,2693

QUADRO D.21: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Agregado.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Agregado				
Agregado = CC subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
CD	-0,7327	0,05668	-12,93	0,0000
GN	1,2037	0,05668	21,24	0,0000
Agregado = CD subtracted from:				
Agregado	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
GN	1,936	0,05668	34,16	0,0000

QUADRO D.22: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Tipos de Solução.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Solução				
Solução = S0 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S10	0,3213	0,05668	5,668	0,0000
S50	0,5275	0,05668	9,305	0,0000
Solução = S10 subtracted from:				
Solução	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
S50	0,2062	0,05668	3,637	0,0008

QUADRO D.23: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Idades.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Idade				
Idade = 28 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
90	-0,3080	0,08850	-3,480	0,0015
180	-0,1170	0,08850	-1,322	0,3828
Idade = 90 subtracted from:				
Idade	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
180	0,1910	0,04909	3,890	0,0003

QUADRO D.24: Resultados do Teste de Tukey para Comparação das Máquinas.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Máquina				
Máquina = James subtracted from:				
Máquina	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Pundit	-2,951	0,04909	-60,12	0,0000

QUADRO D.25: Resultados do Teste de Tukey para Comparação dos Pontos de Medição.

Tukey Simultaneous Tests				
Response Variable Tempo da Onda Ultra Sônica				
All Pairwise CoMParisons among Levels of Ponto de Medição				
Ponto de Medição = Base subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Meio	0,07346	0,05668	1,296	0,3975
Topo	0,28364	0,05668	5,004	0,0000
Ponto de Medição = Meio subtracted from:				
Ponto de Medição	Difference of Means	SE of Difference	Adjusted T-Value	P-Value
Topo	0,2102	0,05668	3,708	0,0006