

ANA CAROLINA COSTA VIANA

**COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS EM
CONCRETO AQUECIDO ATÉ 400 °C**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Ivo José Padaratz,
PhD. Eng.
Coorientadora: Poliana Dias de
Moraes, Dra. Eng.

Florianópolis - SC
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Viana, Ana Carolina Costa

Comportamento de ondas ultrassônicas em concreto
aquecido até 400 °C / Ana Carolina Costa Viana ;
orientador, Ivo José Padaratz, coorientadora,
Poliana Dias de Moraes, 2017.

132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Altas temperaturas. 3.
Concreto. 4. Ensaio não destrutivo. 5. Ultrassom.
I. Padaratz, Ivo José. II. de Moraes, Poliana Dias.
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.

Ana Carolina Costa Viana

**COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS EM
CONCRETO AQUECIDO ATÉ 400 °C**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

Florianópolis, 30 de março de 2017.

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

Prof.^a Poliana Dias de Moraes, Dra. – Coorientadora
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do PPGEC/UFSC

Banca examinadora:

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Ph. D.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
PPGEC/UFRGS (Videoconferência)

Prof.^a Ângela do Valle, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina – ECV/UFSC

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus por me iluminar e abençoar.

Aos meus pais Robson e Lucineide, meus orientadores da vida, agradeço pelo incentivo e pelo apoio que sempre me deram. Obrigada por estarem presentes em mais uma conquista, juntamente com a minha irmã Ana Beatriz.

Ao professor Ivo José Padaratz, pela disponibilidade e orientação, contribuindo para o meu desenvolvimento como pesquisadora. À professora Poliana Dias de Moraes pela coorientação.

À professora Rosiane Moreira da Silva Swiderski pelo incentivo para me inscrever no mestrado. À professora Maria Vânia Nogueira do Nascimento Peres e ao professor Gustavo Savaris pela carta de recomendação.

À CAPES pelo financiamento da pesquisa.

Aos meus amigos: Renato, Priscila, Moisés, Alverlando e Mariana Bamberg, pela companhia tanto nos momentos sérios como nos de descontração.

Ao pessoal do GPEND e GRUPEX: Ricardo, Jorge, Fabio, Mateus, Paulo Dietrichkeit, Paulo Junges, Mariana Milanez, Beth, Ananda, Auro, Sabrina, Vinicius e Vanessa, pelas trocas de experiências e conhecimentos.

Aos outros amigos do mestrado: Luiz e Made pela colaboração na pesquisa.

Ao pessoal do GTEC e aos laboratórios LEE, LMCC e LCME pelo empréstimo de equipamentos e realização de ensaios.

Ao Alan (Engemix) pela retificação das amostras, ao professor Adailton Bortoluzzi da Central de Análises, por realizar o ensaio de difração de raios X e à professora Megumi pelo auxílio na tradução de um artigo.

RESUMO

O ultrassom é um método de ensaio não destrutivo que tem sido utilizado tradicionalmente para avaliar a integridade de estruturas de concreto por meio da medida da velocidade de propagação da onda. No entanto, outros parâmetros associados, principalmente amplitude máxima e energia têm sido pesquisados por indicarem maior sensibilidade para a detecção de danos internos na estrutura. O ensaio de ultrassom pode ser aplicado, por exemplo, na avaliação de edificações submetidas à situação de incêndio, possibilitando definir as medidas corretivas a serem tomadas com relação à recuperação da estrutura. Desse modo, avaliou-se a influência das altas temperaturas no concreto utilizando o método do ultrassom, por meio da análise de parâmetros associados à propagação de onda. Para tanto, foram moldados corpos de prova de 10x30 cm, os quais foram aquecidos a 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C. Posteriormente, verificou-se a alteração de cor, perda de massa e resistência à compressão das amostras. Além do ensaio de ultrassom, para um ganho de 1x e 2x, analisando parâmetros como a velocidade de propagação de pulso e de grupo, amplitude máxima, energia, energia acumulada e tempo. Foram ainda realizados ensaios de microestrutura, entre eles a microscopia eletrônica de varredura e a difração de raios X. Como resultados, as amostras de concreto sofreram alteração na coloração, e de modo geral, a massa, a resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico decresceram com o acréscimo da temperatura, conforme previsto. Além disso, os parâmetros alternativos do ultrassom também indicaram sensibilidade à detecção de alterações internas no concreto em virtude das altas temperaturas. Nesse caso, o tempo referente à porcentagem de energia se destacou por apresentar alterações ao passo que a temperatura aumentou. Ademais, o ganho de 1x apresentou dados mais confiáveis devido, a ausência de truncamento de amplitudes. Análises estatísticas também foram realizadas para avaliar os resultados encontrados.

Palavras-chave: altas temperaturas, concreto, ensaios não destrutivos, ultrassom.

ABSTRACT

The ultrasound is a nondestructive method of test that has been traditionally used to evaluate the integrity of concrete structures by measuring the wave propagation velocity. However, other parameters, especially the maximum amplitude and the energy have been investigated for showing better sensitivity in detecting damage to the internal structure. The ultrasonic test can be applied, for example, to evaluate buildings exposed to fire situation, making possible to define the corrective measures to be taken regarding the recovery of the structure. Thus, it was evaluated the influence of high temperatures on concrete using the ultrasound method by analyzing parameters associated with wave propagation. Therefore, samples of 10x30 cm, heating to 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C. Subsequently, it was verified the change of color, mass and compressive strength of the samples. Besides the ultrasound test, using a gain of 1x and 2x and analyzing parameters such as pulse propagation velocity, group velocity, maximum amplitude, energy, accumulated energy and time. Were still performed microstructure tests such as scanning electron microscopy and X-ray diffraction. As results, the color of concrete samples changed, and generally, the mass, the compressive strength and the ultrasonic pulse velocity decreased with temperature increase, as expected. Moreover, alternative parameters of ultrasound also indicated sensitivity to detect internal changes in concrete due to high temperatures. In this case, the time related to the percentage of energy stood out by presenting changes as the temperature increased. In addition, the gain of 1x presented more reliable data due to the absence of truncation of amplitudes. Statistical analyzes were also performed to evaluate the results.

Keyword: high temperatures, concrete, non-destructive testing, ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Métodos de transferência de calor	21
Figura 2.2: Curva temperatura-tempo para todo o processo de desenvolvimento do incêndio	22
Figura 2.3: Modelo do incêndio natural a partir do flashover	23
Figura 2.4: Modelo do incêndio-padrão ISO 834 a partir do flashover.....	24
Figura 3.1: Representação das fases do concreto a nível microscópico	26
Figura 3.2: Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento para diferentes fases analisadas (amostra com teor de $C_3A > 9\%$).....	28
Figura 3.3: Processos físico-químicos em concreto de cimento Portland durante o aquecimento	30
Figura 3.4: Desagregação de concretos com baixa compacidade a 900 °C após o transporte	30
Figura 3.5: <i>Spalling</i> do concreto.....	31
Figura 3.6: Fissuras no corpo de prova após exposição a 400 °C	32
Figura 3.7: Concreto após exposição a 1000 °C.....	32
Figura 3.8: Fator de redução da resistência dos concretos compostos de agregado silicoso e calcário em função da temperatura	34
Figura 4.1: Ondas longitudinais.....	38
Figura 4.2: Ondas transversais	38
Figura 4.3: Ondas superficiais.....	39
Figura 4.4: Diagrama sistemático do ensaio de velocidade de pulso no ultrassom	40
Figura 4.5: Transdutores por transmissão direta, semidireta e indireta.....	41
Figura 4.6: Dispersão durante a passagem da onda ultrassônica no concreto.....	43
Figura 4.7: Formato de sinal gerado pelo equipamento de ultrassom.....	43
Figura 4.8: Grupo de ondas	45
Figura 4.9: Decréscimo da velocidade de pulso ultrassônico em cubos de concreto devido o aumento da temperatura	48
Figura 4.10: Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão a) concreto de 28 MPa b) concreto de 35 MPa	51

Figura 4.11: Diagrama do sistema de medição.....	52
Figura 4.12: Relação entre a resistência à compressão e a temperatura de aquecimento	53
Figura 4.13: Relação entre a amplitude máxima, velocidade de pulso e energia com a temperatura de aquecimento	54
Figura 5.1: Ensaio tronco de cone	58
Figura 5.2: Corpos de prova 10x30 cm	58
Figura 5.3: Mufla	59
Figura 5.4: Modelo da curva de aquecimento da mufla	59
Figura 5.5: Localização do termopar para o ensaio preliminar de aquecimento	60
Figura 5.6: Gaiola.....	61
Figura 5.7: Pundit Lab	62
Figura 5.8: Configuração do sistema	63
Figura 5.9: Ultrassom calibrado	64
Figura 5.10: Método da transmissão direta em corpos de prova	64
Figura 5.11: Microscópio eletrônico de varredura	66
Figura 5.12: Difratorômetro de raios X	66
Figura 6.1: Corpo de prova que sofreu <i>spalling</i> após o aquecimento.....	68
Figura 6.2: Alteração da coloração do concreto devido ao aquecimento a) 20 °C, b) 100 °C, c) 200 °C, d) 300 °C, e) 400 °C e f) 500 °C	69
Figura 6.3: Massa das amostras de concreto	69
Figura 6.4: Resistência à compressão das amostras de concreto	71
Figura 6.5: Fator de redução médio da resistência à compressão do concreto em função da temperatura	72
Figura 6.6: Formato do pulso ultrassônico da amostra de concreto sã para o ganho de 1x.....	73
Figura 6.7: Formatos dos pulsos ultrassônicos das amostras de concreto aquecidas para o ganho de 1x a) 100 °C, b) 200 °C, c) 300 °C e d) 400 °C	74
Figura 6.8: Formato do pulso ultrassônico da amostra de concreto sã para o ganho de 2x.....	74
Figura 6.9: Formatos dos pulsos ultrassônicos das amostras de concreto aquecidas para o ganho de 2x a) 100 °C, b) 200 °C, c) 300 °C e d) 400 °C	74
Figura 6.10: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico média das amostras de concreto para o ganho de 1x	75

Figura 6.11: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico média das amostras de concreto para o ganho de 2x	75
Figura 6.12: Fator de redução médio da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura para o ganho de 1x	76
Figura 6.13: Fator de redução médio da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura para o ganho de 2x	77
Figura 6.14: Velocidade de grupo média das amostras de concreto para o ganho de 1x.....	77
Figura 6.15: Velocidade de grupo média das amostras de concreto para o ganho de 2x.....	77
Figura 6.16: Fator de redução médio da velocidade de grupo em função da temperatura para o ganho de 1x	79
Figura 6.17: Fator de redução médio da velocidade de grupo em função da temperatura para o ganho de 2x	79
Figura 6.18: Amplitude máxima média das amostras de concreto para o ganho de 1x	80
Figura 6.19: Amplitude máxima média das amostras de concreto para o ganho de 2x	80
Figura 6.20: Fator de redução médio da amplitude máxima em função da temperatura para o ganho de 1x	81
Figura 6.21: Fator de redução médio da amplitude máxima em função da temperatura para o ganho de 2x	81
Figura 6.22: 25% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x	82
Figura 6.23: 25% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x	82
Figura 6.24: 50% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x	83
Figura 6.25: 50% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x	84
Figura 6.26: 75% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x	84
Figura 6.27: 75% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x	85
Figura 6.28: 100% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x	85
Figura 6.29: 100% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x	86
Figura 6.30: Fator de redução médio para 100% da energia em função da temperatura para o ganho de 1x	86

Figura 6.31: Fator de redução médio para 100% da energia em função da temperatura para o ganho de 2x	87
Figura 6.32: Tempo médio correspondente a 25%, 50% e 75% da energia para o ganho de 1x	88
Figura 6.33: Tempo médio correspondente a 25%, 50% e 75% da energia para o ganho de 2x	88
Figura 6.34: Energia acumulada para o ganho de 1x e 2x respectivamente	90
Figura 6.35: Concreto à 20 °C (x500)	92
Figura 6.36: Concreto à 100 °C	93
Figura 6.37: Concreto à 200 °C	92
Figura 6.38: Concreto à 300 °C	93
Figura 6.39: Concreto à 400 °C	92
Figura 6.40: Concreto à 200 °C	93
Figura 6.41: Concreto à 300 °C	93
Figura 6.42: Concreto à 400 °C (x1100)	93
Figura 6.43: Concreto à 20 °C (x4500) e os elementos químicos presentes	93
Figura 6.44: Concreto à 100 °C (x850) e elementos químicos presentes	94
Figura 6.45: Concreto à 200 °C (x5000)	94
Figura 6.46: Elementos químicos presentes no concreto à 200 °C	95
Figura 6.47: Concreto à 300 °C (x10000) e os elementos químicos presentes	95
Figura 6.48: Concreto à 400 °C (x5000) e os elementos químicos presentes	95
Figura 6.49: Difractograma de raios X após aquecimento a diferentes níveis de temperatura	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Decréscimo na resistência à compressão do concreto devido a altas temperaturas	49
Tabela 4.2: Valores médios de massa, velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão para diversos níveis de temperatura	50
Tabela 4.3: Valores selecionados no aparelho de medição	51
Tabela 5.1: Características do cimento CP II Z 32	56
Tabela 5.2: Composição granulométrica do pedrisco e das areias	57
Tabela 5.3: Características físicas do pedrisco e das areias	57
Tabela 5.4: Características do traço aplicado	57
Tabela 5.5: Programa de aquecimento	61
Tabela 5.6: Parâmetros de ajuste do equipamento	66
Tabela 6.1: Valores médios de massa	70
Tabela 6.2: Valores de resistência à compressão aos 28 e 63 dias	71
Tabela 6.3: Valores de resistência à compressão aos 300 dias para amostras 10x30 cm	72
Tabela 6.4: Valores médios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 1x.....	75
Tabela 6.5: Valores médios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 2x.....	76
Tabela 6.6: Valores médios de velocidade de grupo para o ganho de 1x.....	78
Tabela 6.7: Valores médios de velocidade de grupo para o ganho de 2x.....	78
Tabela 6.8: Valores médios de amplitude máxima para o ganho de 1x.....	80
Tabela 6.9: Valores médios de amplitude máxima para o ganho de 2x.....	80
Tabela 6.10: Valores médios para 25% da energia para o ganho de 1x.....	83
Tabela 6.11: Valores médios para 25% da energia para o ganho de 2x.....	83
Tabela 6.12: Valores médios para 50% da energia para o ganho de 1x.....	84
Tabela 6.13: Valores médios para 50% da energia para o ganho de 2x.....	84

Tabela 6.14: Valores médios para 75% da energia para o ganho de 1x.....	85
Tabela 6.15: Valores médios para 75% da energia para o ganho de 2x.....	85
Tabela 6.16: Valores médios para 100% da energia para o ganho de 1x.....	86
Tabela 6.17: Valores médios para 100% da energia para o ganho de 2x.....	86
Tabela 6.18: Tempo médio para 25% da energia para o ganho de 1x.....	89
Tabela 6.19: Tempo médio para 25% da energia para o ganho de 2x.....	89
Tabela 6.20: Tempo médio para 50% da energia para o ganho de 1x.....	89
Tabela 6.21: Tempo médio para 50% da energia para o ganho de 2x.....	89
Tabela 6.22: Tempo médio para 75% da energia para o ganho de 1x.....	89
Tabela 6.23: Tempo médio para 75% da energia para o ganho de 2x.....	90
Tabela 9.1: Resistência e massa das amostras	111
Tabela 9.2: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 1x	113
Tabela 9.3: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 2x	114
Tabela 9.4: Velocidade de grupo para o ganho de 1x.....	115
Tabela 9.5: Velocidade de grupo para o ganho de 2x.....	116
Tabela 9.6: Amplitude máxima para o ganho de 1x	117
Tabela 9.7: Amplitude máxima para o ganho de 2x	118
Tabela 9.8: 25% da energia para o ganho de 1x.....	119
Tabela 9.9: 25% da energia para o ganho de 2x.....	120
Tabela 9.10: 50% da energia para o ganho de 1x.....	121
Tabela 9.11: 50% da energia para o ganho de 2x.....	122
Tabela 9.12: 75% da energia para o ganho de 1x.....	123
Tabela 9.13: 75% da energia para o ganho de 2x.....	124
Tabela 9.14: 100% da energia para o ganho de 1x.....	125
Tabela 9.15: 100% da energia para o ganho de 2x.....	126
Tabela 9.16: Tempo correspondente a 25% da energia para o ganho de 1x.....	127
Tabela 9.17: Tempo correspondente a 25% da energia para o ganho de 2x.....	128

Tabela 9.18: Tempo correspondente a 50% da energia para o ganho de 1x.....	129
Tabela 9.19: Tempo correspondente a 25% da energia para o ganho de 2x.....	130
Tabela 9.20: Tempo correspondente a 75% da energia para o ganho de 1x.....	131
Tabela 9.21: Tempo correspondente a 75% da energia para o ganho de 2x.....	132

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVO GERAL	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2 INCÊNDIO	21
2.1 DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO	22
2.2 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	24
3 CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS	25
3.1 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS.....	25
3.1.1 Pasta de cimento e zona de transição	26
3.1.2 Agregados	29
3.2 ALTERAÇÕES MACROESTRUTURAIS	30
3.3 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	33
3.4 COMPORTAMENTO DO AÇO PRESENTE NO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS.....	35
3.5 AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	36
4 ULTRASSOM	37
4.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS	37
4.2 ENSAIO DE ULTRASSOM	40
4.2.1 Fatores intervenientes	41
4.3 PARÂMETROS NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	42
4.3.1 Velocidade de pulso	44
4.3.2 Velocidade de grupo	44
4.3.3 Amplitude	45
4.3.4 Energia	45
4.4 APLICAÇÃO DO ULTRASSOM EM ESTUDOS COM CONCRETOS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS	47

4.4.1 Handoo et al. (2002)	47
4.4.2 Silva (2009)	49
4.4.3 Yamada et al. (1989)	51
4.5 CONTINUIDADE DOS ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA	54
5 MATERIAIS E MÉTODOS	56
5.2 TRAÇO.....	57
5.3 CONCRETAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	57
5.4 AQUECIMENTO.....	59
5.5 PERDA DE MASSA	62
5.6 ULTRASSOM.....	62
5.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	65
5.8 ENSAIOS MICROESTRUTURAIS	65
5.8.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	65
5.8.2 Difração de raios X (DRX)	66
5.9 ESTATÍSTICA	67
6 RESULTADOS E ANÁLISES	68
6.1 ALTERAÇÕES MACROESTRUTURAIS	68
6.2 PERDA DE MASSA	69
6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	70
6.4 ULTRASSOM.....	73
6.4.1 Formato do pulso ultrassônico	73
6.4.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico	74
6.4.3 Velocidade de grupo	77
6.4.4 Amplitude máxima	79
6.4.5 Energia	82
6.4.5.1 Tempo referente à porcentagem da energia	87
6.5 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS.....	91
6.5.1 Microscopia eletrônica de varredura	91

6.5.2 Difração de raios X.....	96
7 CONCLUSÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICE	111

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais utilizado no setor da construção civil e existem ao menos três razões principais para sua aplicação, são elas: a excelente resistência à água quando comparado a outros materiais; baixo custo e rápida disponibilidade; a facilidade em se obter elementos de diversas formas e tamanhos (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville (1997), quando em contato com o fogo, pode-se dizer que o concreto endurecido possui boas características, visto que ele continua a apresentar um desempenho satisfatório, mesmo após um dado tempo de exposição, além disso, não é combustível e não expele gases tóxicos.

Embora o concreto seja um material que, dependendo das condições, possa preservar parte de suas propriedades, quando submetido a temperaturas significativas, podem ocorrer deteriorações severas ocasionando transformações e reações que se manifestam na forma de micro ou macro fissuras, estalos, alterações na coloração e até deslocamentos, além da redução da durabilidade e perda da capacidade de suporte de carga (NEVILLE, 1997; HANDOO et al., 2002).

Muitos são os fatores que influenciam no comportamento do concreto ao fogo, entre eles a taxa de aquecimento, a temperatura máxima, o período de exposição, as propriedades dos materiais presentes, as tensões atuantes na estrutura e o método de arrefecimento adotado (DÜĞENCI et al., 2015).

Avaliar a condição do concreto e a extensão dos danos após o incêndio é um requisito importante para tomar as possíveis medidas corretivas quanto à recuperação da estrutura. Geralmente o processo se inicia com a identificação visual de danos como alterações na coloração, presença de fissuras e *spalling*. Contudo, para verificar a real situação da estrutura, são necessárias técnicas mais precisas, como por exemplo, os ensaios não destrutivos, técnicas estas que não causam dano adicional ao concreto. (HANDOO et al., 2002; GEORGALI & TSAKIRIDIS, 2005; ACI 228.2R, 1998)

O ultrassom é um dos métodos não destrutivos indicado para a análise de estruturas danificadas termicamente e que tem sido utilizado durante muitas décadas. O equipamento é fácil de operar, portátil, apresenta disponibilidade no mercado e se

baseia na propagação de ondas de tensão (ACI 228.2R, 1998; AGGELIS & SHIOTANI, 2008; NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Apesar do uso do ultrassom estar, em vários casos, limitado ao estudo da velocidade de propagação de pulso, este parâmetro apresenta algumas restrições, pois não possui alta sensibilidade a alterações microestruturais, tais como microfissuras internas e micro espaços vazios no concreto, além de apresentar diversos fatores intervenientes referentes às propriedades dos materiais que o compõem, ao uso do equipamento e as condições externas como a temperatura (SANTHANAM, 2010; SHAH et al., 2013).

Entretanto, com a sofisticação do processamento de sinais, tornou-se possível a análise de parâmetros ultrassônicos capazes de fornecer informações eficientes sobre as características dos materiais e demonstrar maior eficácia na estimativa quantitativa de danos. Como exemplo, podem-se citar os parâmetros de atenuação como o pico de amplitude e a energia (SANTHANAM, 2010; HAUWAERT et al., 1998).

1.1 JUSTIFICATIVA

As edificações, mesmo quando danificadas pela alta temperatura, necessitam apresentar uma resistência residual que garanta a segurança da estrutura. Visto que o concreto é um dos materiais mais empregados na composição de elementos estruturais, é de suma importância conhecer seu comportamento após aquecido.

Para tanto, pode-se empregar o método não destrutivo do ultrassom que, apesar de ser uma técnica de ensaio antiga, normalmente limita-se ao estudo do parâmetro da velocidade de pulso.

Segundo Santhanam (2010), outros parâmetros têm demonstrado maior eficiência na análise de danos em concretos, principalmente a nível microestrutural. Portanto, na presente pesquisa, utilizaram-se parâmetros alternativos do ultrassom, a fim de ampliar o uso deste método na avaliação de estruturas de concreto aquecido até 400 °C.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar a influência das altas temperaturas no concreto, utilizando o método do ultrassom, por meio da análise de parâmetros associados à propagação de onda.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos foram elencados:

- I. Avaliar o comportamento dos parâmetros ultrassônicos devido ao acréscimo da temperatura do concreto;
- II. Verificar qualitativamente os parâmetros quanto a análise das alterações ocorridas devido ao aquecimento;
- III. Com base na resposta dos parâmetros, identificar os mais adequados para a análise do concreto aquecido.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa se divide em sete capítulos. O primeiro contém a apresentação do tema, abordando a aplicação do ensaio de ultrassom nas estruturas de concreto submetidas a altas temperaturas, as principais motivações para a realização deste estudo, bem como os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo, discute-se sobre o incêndio, seu processo, mecanismos de transferência de calor, seu desenvolvimento, curvas de incêndio real, natural e padrão, além das medidas de segurança referentes à exposição ao fogo.

O terceiro capítulo refere-se ao concreto, o comportamento dos materiais que o compõem quando em altas temperaturas e as alterações sofridas pelas estruturas de concreto.

O capítulo quatro destina-se à apresentação do método não destrutivo do ultrassom, seu funcionamento, procedimento de ensaio, fatores intervenientes e os parâmetros no domínio do tempo, analisados a partir do formato das ondas propagadas.

No quinto capítulo são apresentadas as etapas detalhadas do programa experimental elaborado. O capítulo seis refere-se à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, o capítulo sete contém as conclusões, seguido das referências bibliográficas e do apêndice.

2 INCÊNDIO

O incêndio é uma ação descrita por meio da transferência de calor devido à diferença de temperatura entre meios que pode ocorrer por condução, convecção ou radiação. A condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas devido às interações entre partículas. A convecção corresponde a dois mecanismos, sendo eles a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório e o movimento global do fluido. Já a radiação é a energia transmitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula por meio de ondas eletromagnéticas (Figura 2.1) (INCROPERA & DEWITT, 1998).

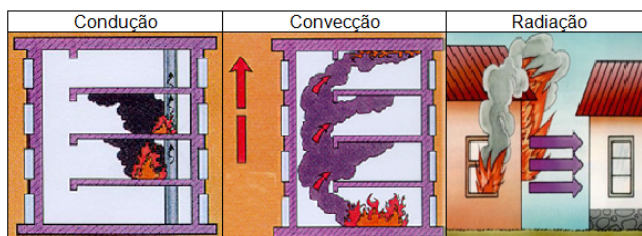


Figura 2.1: Métodos de transferência de calor

Fonte: adaptado de GONÇALVES (2013); CASTIGLIONI (2011)

Um incêndio geralmente se inicia diminuto e ascende dependendo do item ignizado, do comportamento dos materiais ao fogo na proximidade do item ignizado, suas propriedades térmicas e sua distribuição no ambiente, da quantidade de material combustível armazenado, o tipo de atividade desenvolvida no local, a forma da edificação, além dos meios de ventilação e sistemas de segurança contra incêndio (SEITO et al., 2008; VARGAS & SILVA, 2003).

Para que o fogo se mantenha, é necessário coexistir quatro elementos, são eles: combustível, comburente, calor e reação em cadeia. O combustível corresponde a toda matéria susceptível à combustão, podendo ser sólida, líquida ou gasosa. O comburente é todo elemento químico capaz de alimentar o processo de combustão, como o oxigênio. O calor é a condição favorável para provocar a interação entre os reagentes e a

reação em cadeia que corresponde a uma sequência de reações (CBMERJ, 2003).

2.1 DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

Em um incêndio real, primeiramente, o desenvolvimento do fogo ocorre com o aquecimento potencial do combustível. A fase seguinte é a da ignição que pode ocorrer devido a fontes flamejantes como fósforos e velas, latentes como o cigarro, elétricas devido ao superaquecimento e radiantes como fogo e luz solar. Nesta fase tem-se o começo da combustão das chamas indicando a transição para a etapa seguinte que é a do crescimento, em que a maioria dos incêndios inicialmente se espalha lentamente sobre superfícies combustíveis e assim mais rapidamente conforme o fogo cresce (BUCHANAN, 2002).

Se as temperaturas da camada superior atingem em torno de 600 °C, a taxa de queima cresce rapidamente, conduzindo ao *flashover* que é a transição para a etapa de queima. É esta fase que impacta os elementos estruturais e as barreiras compartimentadas. Se o fogo não é controlado, eventualmente o combustível queima e as temperaturas decrescem na fase denominada declínio (Figura 2.2) (BUCHANAN, 2002).

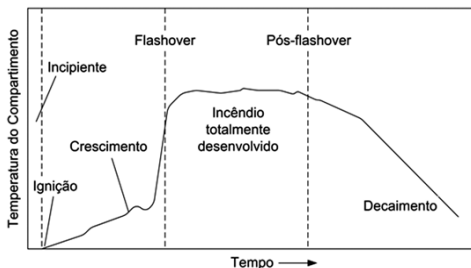


Figura 2.2: Curva temperatura-tempo para todo o processo de desenvolvimento do incêndio

Fonte: SEITO et al. (2008)

No incêndio natural as análises experimentais ou computacionais visam elaborar modelos de curvas temperatura-tempo por meio de estudos que simulam a situação real de incêndio em um compartimento em chamas, com aberturas, sem a possibilidade do fogo se propagar externamente. A principal característica dessas curvas é a de possuir um ramo ascendente

que corresponde à fase de aquecimento e um ramo descendente referente à fase de resfriamento, conforme Figura 2.3 (SILVA, 1997, 2012).

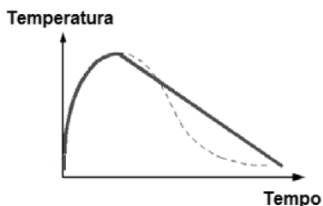


Figura 2.3: Modelo do incêndio natural a partir do flashover
Fonte: SEITO et al. (2008)

Entretanto, as curvas temperatura-tempo dependem de fatores como a carga de incêndio que se refere à soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis, o grau de ventilação que é representado pelo fator de abertura e as características físico-térmicas dos materiais componentes da vedação. Portanto, cada compartimento de cada edificação deveria ser projetado para uma curva diferente (SILVA, 1997, 2012).

De acordo com Silva (2012), devido à complexidade de se projetar uma curva de temperatura-tempo para cada situação, as normas técnicas decidiram simplificar elaborando a curva de incêndio-padrão que tem como característica apenas um ramo ascendente, portanto, a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo, e, além disso, é independente das características do ambiente e da carga de incêndio.

Com base na ISO 834 (1990), a NBR 5628 (1991) e NBR 14432 (2001) recomendam que se utilize a Equação 2.1 para definir a temperatura dos gases em função do tempo, obtendo-se então, o gráfico apresentado na Figura 2.4.

$$\Theta_g = \Theta_0 + 345 \log_{10} (8t+1) \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

Θ_g = temperatura dos gases no tempo t (em °C);

Θ_0 = temperatura ambiente inicial, geralmente adotada igual a 20 °C;

t = tempo decorrido desde a ignição do fogo (em minutos).

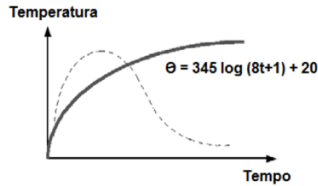


Figura 2.4: Modelo do incêndio-padrão ISO 834 a partir do flashover
Fonte: SEITO et al. (2008)

No entanto, percebe-se que há uma diversidade de taxas e períodos adotados em pesquisas relacionadas ao aquecimento do concreto devido às limitações dos equipamentos utilizados.

2.2 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Para contribuir com a segurança contra incêndio é possível fazer uso de uma combinação de diversas estratégias, entre elas, os sistemas de proteção ativos e passivos, além da verificação do comportamento dos materiais contidos na edificação, quando em altas temperaturas.

De acordo com a NBR 14432 (2001), os sistemas ativos controlam o incêndio e seus efeitos manual ou automaticamente em resposta aos estímulos provocados pelo fogo mediante a ação tomada por uma pessoa (ocupantes e bombeiros) ou pelas instalações prediais de proteção contra incêndio (*sprinklers*).

Os sistemas passivos controlam o fogo e seus efeitos pelo conjunto de medidas incorporadas ao sistema construtivo do edifício, sendo funcional durante o uso normal da edificação e reagindo passivamente ao desenvolvimento do incêndio (NBR 14432, 2001).

Além disso, é importante, desde o processo produtivo do edifício, selecionar materiais de modo a obter níveis aceitáveis de segurança contra incêndio, pois as transformações físicas e/ou químicas dos materiais quando expostos ao fogo destacam-se como um dos principais fatores responsáveis pelo crescimento do incêndio (SEITO et al., 2008).

3 CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

As estruturas de concreto são reconhecidas pela boa resistência a altas temperaturas, pois o composto não emite gases tóxicos e é incombustível, além da capacidade de suporte de cargas, resistência à penetração de chamas e resistência à transferência de calor. Na prática, o concreto não foi feito para ficar intacto quando exposto ao fogo, mas no mínimo ele deve ser preservado durante o tempo de incêndio para garantir a segurança das pessoas que estiverem dentro da edificação (NEVILLE, 1997).

Durante o aquecimento, a temperatura se distribui na estrutura de concreto e, devido às boas propriedades de isolamento do material, há um amplo gradiente de temperatura, uma vez que apenas externamente ocorre um aumento significativo da temperatura enquanto, internamente, o nível permanece comparativamente inferior (KHOURY, 2000).

O desempenho dos elementos de concreto também é influenciado pelas propriedades dos materiais que o compõem. Portanto, quando exposto ao fogo, a composição do concreto é de grande importância, pois tanto o agregado graúdo e miúdo quanto a pasta de cimento se decompõem quando aquecidos. Assim, a permeabilidade do concreto, as dimensões da peça e a taxa de aumento da temperatura, são fatores que influenciam no desenvolvimento de pressões internas geradas pelos produtos de decomposição gasosa (KHOURY, 2000; MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Quando as estruturas de concreto se encontram expostas à ação do incêndio, uma série de processos físicos e químicos alteram as características dos compostos, refletindo nas propriedades micro e macroestrutural do concreto, dependendo do nível de temperatura que o elemento foi submetido (RIOS, 2005).

3.1 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Em nível microscópico é possível identificar a complexidade e heterogeneidade da microestrutura do concreto, a qual se divide em três fases: agregado, pasta de cimento hidratada e zona de transição. A fase agregado é responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade

dimensional do concreto, as quais dependem, principalmente, da densidade e resistência do agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A fase pasta de cimento hidratada influencia na estabilidade dimensional, durabilidade e resistência do concreto quando endurecido. Já a fase zona de transição representa uma pequena região próxima às partículas de agregado graúdo, com espessura de 10 a 50 μm , normalmente é a fase mais fraca devido à estrutura porosa formada nessa região, exercendo grande influência no comportamento mecânico do concreto (Figura 3.1) (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

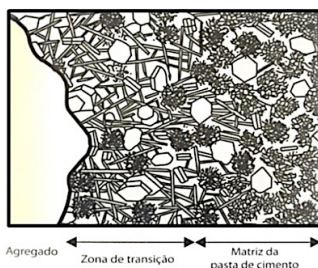


Figura 3.1: Representação das fases do concreto a nível microscópico
Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014)

Os primeiros efeitos do aumento da temperatura no concreto ocorrem a nível microestrutural devido às transformações físicas e químicas que, por conseguinte, refletirão na macroestrutura. Em vista disso, é importante entender o comportamento de cada fase do concreto, as quais serão apresentadas a seguir.

3.1.1 Pasta de cimento e zona de transição

O efeito do aumento da temperatura na pasta de cimento hidratada depende tanto do grau de hidratação como do estado de umidade. Uma pasta de cimento hidratada é composta basicamente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (Portlandita) e sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita). Com o aumento da temperatura, a pasta de cimento é a primeira a sofrer os efeitos, alterando sua composição química, estrutura física e teor de umidade (MEHTA & MONTEIRO, 2014; KIZILKANAT et al., 2013).

Para temperaturas de 4 °C a 80 °C as alterações na pasta de cimento são essencialmente físicas como a porosidade e o crescimento de fissuras que não afetam significativamente a estrutura. Ademais, entre 60 °C e 80 °C verifica-se uma acentuada redução na estabilidade da etringita, a qual se rompe e se desintegra, uma vez que seus hidratos começam a desidratar liberando Ca^{2+} o que certamente contribui para precipitação tanto da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) quanto da calcita (CaCO_3) (COSTA et al., 2002; ABO-EL-ENEIN et al., 1998 apud JANOTKA & NÜRNBERGEROVÁ, 2005).

Aos 100 °C se inicia o processo de desidratação do gel de C-S-H que termina próximo a 400 °C, acarretando a formação de óxido de cálcio (CaO) e silicatos anidros, dependendo da composição mineralógica e da proporção cálcio/silício, aparentando contribuir para o aumento da concentração de calcita devido a carbonatação, ou seja, a reação do CaO com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, além do acréscimo de larnita (Ca_2SiO_4) (CASTELLOTE et al., 2004; CHANA & PRICE, 2003 apud LIMA, 2005).

Os cristais de Portlandita, a temperatura ambiente, apresentam formato de lâmina alongada. Com o acréscimo da temperatura, a distribuição espacial desses cristais se torna mais compacta. Isso significa que, em uma unidade de volume da pasta de cimento, surgem cristais menores, o que está relacionado ao decréscimo da solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ devido ao aquecimento (AFRIDI et al., 1993 apud JANOTKA & NÜRNBERGEROVÁ, 2005; BERGER & MCGREGOR, 1973 apud JANOTKA & NÜRNBERGEROVÁ, 2005).

A quantidade inicial de Portlandita decresce até em torno de 100 °C ocorrendo um correspondente acréscimo de calcita. Ao atingir 530 °C, a Portlandita instantaneamente se decompõe devido à perda de água se transformando em CaO (Figura 3.2) (CASTELLOTE et al., 2004).

Acima de 800 °C ocorre uma modificação química no concreto que ocasiona a consequente substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica. Em torno de 1100 °C ocorre o derretimento total dos cristais, entretanto, todas as fases cimentícias podem se reidratar, formando diferentes géis ou componentes cristalinos, já as partículas anidras permanecem inalteradas durante todo o processo (CHANA & PRICE, 2003 apud LIMA, 2005; CASTELLOTTE et al., 2004).

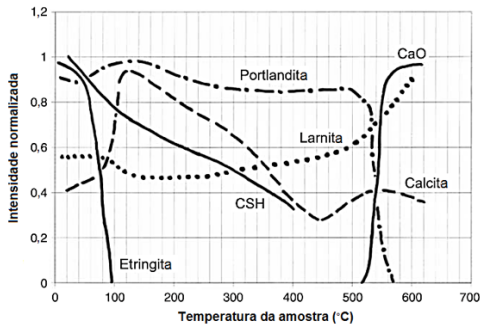


Figura 3.2: Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento para diferentes fases analisadas (amostra com teor de $C_3A > 9\%$)

Fonte: CASTELLOTE et al. (2004)

A pasta de cimento hidratada além de apresentar os compostos citados anteriormente também se consiste de água. A água capilar é retida em pequenos capilares podendo causar retração do sistema e quando presente em vazios maiores que 50 Å pode ser denominada água livre. A água adsorvida, que se encontra próxima à superfície sólida dos produtos de hidratação, a água interlamelar que está associada à estrutura do C-S-H e a água quimicamente combinada que integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Os diversos tipos de água são perdidos rapidamente com o aumento da temperatura do concreto. Para temperaturas entre 65 °C e 80 °C a água absorvida pelo concreto endurecido em virtude do ambiente é evaporada, já de 80 °C a 100 °C é a água livre nos interstícios que evapora. A perda de água quimicamente combinada se inicia aos 100 °C influenciando nas propriedades do concreto. Já a água capilar evapora totalmente entre 200 °C a 300 °C, sem alterar significativamente a estrutura do cimento hidratado. De 300 °C a 400 °C a água interlamelar reduz, gerando uma perda de resistência e o surgimento das primeiras fissuras superficiais (COSTA et al., 2002; MAJORANA et al., 2003b apud LIMA, 2005; CÁNOVAS, 1988).

Durante o aquecimento, a pasta de cimento também experimenta uma ligeira expansão até cerca de 200 °C, seguida de uma intensa retração assim que essa temperatura é excedida, contribuindo significativamente para a evolução da porosidade,

aumentando o volume e o tamanho médio dos poros (HAGER, 2013).

Na fase zona de transição, com o aumento da temperatura, ocorre um acréscimo nas microfissuras presentes e na porosidade, contribuindo para a redução das propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (NEVILLE, 1997).

3.1.2 Agregados

Na fase agregado a porosidade e a mineralogia exercem grande influência. Quando em altas temperaturas, os agregados porosos podem ser suscetíveis à expansão destrutiva gerando pipocamentos e microfissuras. A composição mineralógica dos agregados rege propriedades como expansão e condutividade térmica (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A expansão térmica não é linear com relação à temperatura e isso acontece em parte devido às alterações químicas que ocorrem nos agregados. A condutividade térmica é a propriedade que mede a capacidade do material conduzir o calor, de modo que o basalto e a barita apresentam baixos valores, o dolomito e o calcário possuem valores médios e o quartzo apresenta maior condutividade (NEVILLE, 1997).

Agregados que apresentam baixa porosidade podem ficar livres de problemas relacionados ao movimento da umidade interna, já agregados silicosos contendo quartzo como o granito e o arenito, podem causar danos ao concreto a cerca de 573 °C devido a sua expansão de volume. No caso de rochas carbonáticas os mesmos danos podem iniciar em torno de 700 °C como resultado da descarbonatação (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Em incêndios, a temperatura do ar raramente ultrapassa 900 °C, no entanto, as chamas podem alcançar 1200 °C ou mais e acima dessa temperatura alguns componentes do concreto se fundem (BRITZ, 2013). A Figura 3.3 apresenta de forma esquemática as transformações na pasta de cimento, no agregado e na água presentes no concreto devido ao processo de aquecimento que, conseqüentemente, altera as propriedades físico-químicas do material.

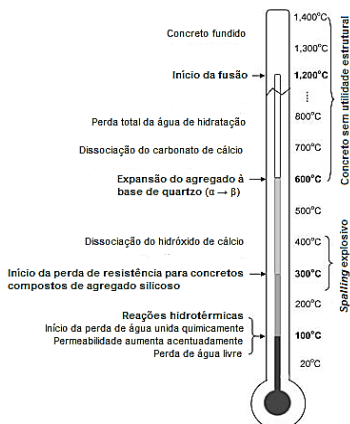


Figura 3.3: Processos físico-químicos em concreto de cimento Portland durante o aquecimento
Fonte: KHOURY (2000)

3.2 ALTERAÇÕES MACROESTRUTURAIS

Em nível macroestrutural, o efeito das altas temperaturas também ocasiona alterações no concreto. Entre esses fenômenos pode-se citar a desagregação, lascamento, fissuras e alterações na coloração.

A desagregação ocorre devido à absorção de calor pela estrutura durante o incêndio, que se traduz em expansão térmica, ocorrendo uma expansão diferenciada entre o agregado graúdo e a pasta de cimento ou entre a massa de concreto e o aço, originando tensões internas, prejudicando a aderência e podendo levar o concreto a se desagregar (Figura 3.4) (SOUZA & RIPPER, 1998).



Figura 3.4: Desagregação de concretos com baixa compactidade a 900 °C após o transporte
Fonte: LIMA (2005)

O lascamento (*spalling*) é uma modificação que causa desintegração no concreto quando submetido a altas temperaturas. Esse fenômeno pode se manifestar como desprendimentos do cobrimento ou estilhaçamentos violentos (Figura 3.5) (COSTA et al., 2002).



Figura 3.5: *Spalling* do concreto
Fonte: LIMA (2005)

O lascamento ocorre quando o vapor de água é expulso da pasta de cimento durante o aquecimento com alta pressão de poros, criando um excesso de tensões de tração. Experimentos reais com fogo têm mostrado que a maioria dos elementos de concreto normal pode resistir a incêndios graves sem sofrer sérios lascamentos (BUCHANAN, 2002).

Em alguns casos o lascamento está relacionado ao tipo de agregado ou as tensões térmicas próximas às bordas, no entanto, está mais frequentemente ligado ao comportamento da pasta de cimento. Concretos de alta resistência tendem a ser mais susceptíveis ao lascamento do que o concreto normal, desde que haja um menor volume de poros livres (BUCHANAN, 2002).

Outro fenômeno é a fissuração, visto que o desenvolvimento de microfissuras também é uma consequência do aquecimento do concreto a altas temperaturas. A microfissuração ocorre devido à perda de água derivada das transformações sofridas pelas variações volumétricas dos agregados, da matriz cimentícia e pelos produtos hidratados do cimento. Este fenômeno pode ser identificado a temperaturas superiores a 300 °C (GEORGALLI & TSAKIRIDIS, 2004; LIMA, 2005).

A presença inicial de microfissuras na pasta de cimento, decorrentes de fenômenos como a retração, funciona como caminho preferencial para a formação de fissuras térmicas

durante o aquecimento. Além disso, a fissuração é intensificada nas juntas, nas regiões mal adensadas ou nos planos das barras da armadura, a qual conduz calor, acelerando o efeito da temperatura elevada (Figura 3.6) (ANDRADE et al., 2003 apud LIMA, 2005; NEVILLE, 1997).



Figura 3.6: Fissuras no corpo de prova após exposição a 400 °C
Fonte: SILVA (2013)

A alteração na coloração em virtude do aumento da temperatura ocorre devido à presença de compostos de ferro nos agregados silicosos e calcários. Essa alteração é permanente e posteriormente também pode ser utilizada para estimar a temperatura máxima atingida em um incêndio (NEVILLE, 1997).

Para agregados ricos em sílica, em um patamar de 200 °C, o concreto apresenta coloração acinzentada sem ocorrer mudanças significativas na resistência à compressão. À temperatura de 300 °C a 600 °C predomina-se o rosa a vermelho. Entre 600 °C e 950 °C o concreto passa a se apresentar acinzentado com pontos avermelhados. De 950 °C a 1000 °C a cor predominante é o amarelo alaranjado e, por fim, de 1000 °C a 1200 °C o material assume tonalidade amarela (Figura 3.7) (CÁNOVAS, 1998).



Figura 3.7: Concreto após exposição a 1000 °C

Além das alterações citadas anteriormente, quando em altas temperaturas, a massa específica do concreto endurecido também sofre alterações. Primeiramente, devido à evaporação da água livre e, após, pelo aumento de volume em virtude da expansão térmica que decorre das transformações mineralógicas dos agregados a temperaturas acima de 500 °C, ocasionando uma ligeira redução na massa específica (COSTA, 2008).

3.3 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O comportamento mecânico do concreto a elevadas temperaturas tem sido estudado desde que a exposição térmica das estruturas de concreto passou a ser levada em consideração nos vários campos da engenharia estrutural (SCHNEIDER, 1976).

As deteriorações das propriedades mecânicas devido ao aquecimento podem ser atribuídas a três fatores: alterações físico-químicas na pasta de cimento e no agregado e a incompatibilidade térmica entre os dois, que é influenciada por fatores como taxa de aquecimento, nível de temperatura e carga (KHOURY, 2000).

A redução da resistência à compressão para concretos em situação de incêndio têm sido estudada por diversos pesquisadores. Em 1899, Freitag já comentava sobre o comportamento do concreto frente a altas temperaturas, afirmando que ensaios demonstravam redução de resistência. Com o incêndio elevando a temperatura dos elementos estruturais, além da redução de resistência, ocorre também o aparecimento de esforços adicionais referentes às deformações térmicas (SILVA, 2012).

Para Andrade (1997), muitos são os fatores que influenciam na resistência do concreto quando exposto ao fogo, entre eles estão: a composição, a permeabilidade e a taxa de elevação da temperatura para o controle da pressão internamente. Petrucci (1998) afirma que o comportamento do concreto sob a ação de altas temperaturas é variável, ocorrendo uma diminuição de resistência para temperaturas superiores a 300 °C e, na ordem de 600 °C a resistência mecânica se torna cerca de 50% menor.

Para Neville (1997) existem resultados variáveis quanto ao efeito da exposição do concreto à temperatura de até 600 °C. As

razões para isso compreendem: diferenças de tensões atuantes; condição de umidade do concreto enquanto aquecido; diferenças na duração da exposição à temperatura elevada e as propriedades dos agregados.

Considerando que os agregados compõem cerca de 70% do concreto, é natural a grande influência que o tipo de agregado causa na resistência mecânica de concretos submetidos a altas temperaturas, sendo que a perda de resistência é menor quando o agregado não contém sílica, como, por exemplo, calcários, rochas ígneas básicas e, particularmente, com tijolo britado e escória de alto forno (MORENO & SOUZA, 2010; NEVILLE, 1997).

Portanto, o Eurocode 2 - Parte 1-2 (2004) apresenta os valores indicativos do fator de redução da resistência característica ($k_{c,\theta}$) de acordo com o tipo de agregado graúdo que compõe o concreto, sendo eles silicoso ou calcário, os quais podem ser identificados na Figura 3.8. A NBR 15200 (2004) fornece os mesmos fatores indicativos, porém, em sua versão mais atualizada do ano de 2012 são apresentados apenas os fatores de redução para o agregado silicoso.

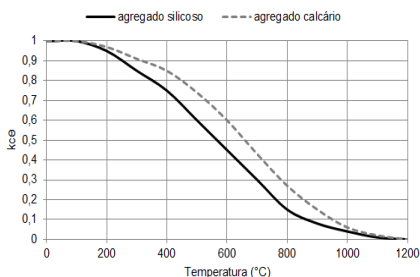


Figura 3.8: Fator de redução da resistência dos concretos compostos de agregado silicoso e calcário em função da temperatura
Fonte: adaptado de NBR 15200 (2004)

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade também diminui com o aumento da temperatura. Em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, o módulo de elasticidade pode ser afetado pela fração volumétrica, a densidade, o módulo dos principais componentes, além da zona de transição devido à microfissuração que ocorre mais

fortemente quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas (MEHTA & MONTEIRO, 2014; LIMA, 2005).

3.4 COMPORTAMENTO DO AÇO PRESENTE NO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

Nos elementos de concreto armado em situação de incêndio, as armaduras apresentam algumas características que contribuem para o incremento do dano. Como o aço é um bom condutor térmico, quando exposto a altas temperaturas, ele absorve mais calor que o concreto, contribuindo para o aquecimento localizado dos elementos. Desse modo, o calor é propagado mais rapidamente ao longo da armadura, no entanto, o concreto permanece a uma temperatura média inferior. No aço a temperatura se uniformiza rapidamente, além de sua dilatação ser maior que a do concreto (OLIVEIRA & MORENO JR, 2009).

Com o aquecimento, acima de 100 °C a redução de aderência entre o aço e o concreto é sensível em função do aumento e duração do aquecimento. Após os 400 °C a diminuição na aderência das armaduras é maior do que a redução de resistência à compressão e a partir de 600 °C a aderência é completamente perdida (COSTA et al., 2002).

Além das transformações do concreto e da perda de aderência, as propriedades do aço também se alteram em função do acréscimo da temperatura. De acordo com o Eurocode 2 - Parte 1-2 (2004) a resistência do aço se anula a partir de 1200 °C e à medida que a temperatura se eleva, a taxa de redução da resistência se apresenta inferior quando comparada ao módulo de elasticidade.

Até 400 °C o módulo de elasticidade decai linearmente e acima dessa temperatura o decréscimo ocorre a uma taxa superior. Ademais, acima de 400 °C ocorre o aumento do tamanho dos grãos componentes do aço, diminuindo a tensão de ruptura e aumentando os alongamentos. Já a partir de 723 °C ocorrem modificações em sua estrutura química que transformam os grãos de ferrita e fenólio em austenita (WEIGLER & FISHER, 1964 apud ACI 216R-89, 1994; CÁNOVAS, 1988).

3.5 AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

As estruturas de concreto geralmente podem ser recuperadas mesmo após uma exposição severa ao incêndio. Para tanto, é necessário quantificar o grau do dano levando em consideração os efeitos potenciais que as altas temperaturas podem causar na resistência e estabilidade da edificação afetada (FIB, 2012).

Para definir o método de recuperação a se aplicar, geralmente é feita a avaliação exterior das estruturas por meio da análise visual, verificando a coloração e a presença de lascamentos, fissuras e desagregações. No entanto, para uma melhor análise do dano, é importante verificar o efeito das altas temperaturas no interior dos elementos estruturais. Desse modo, são necessárias técnicas mais precisas, as quais possibilitam apresentar a real situação da estrutura (GEORGALI & TSAKIRIDIS, 2005).

Atualmente, para a avaliação de estruturas de concreto que necessitam de restauração, reparo e manutenção, diversos países têm apresentado um interesse crescente pelo aperfeiçoamento dos ensaios não destrutivos por serem técnicas que não causam dano significativo ao concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Os ensaios não destrutivos possibilitam a solução de problemas em construções recentes além da avaliação da condição de um concreto mais antigo com o propósito de reabilitação e garantia de um reparo de qualidade, pois possibilitam a identificação de fissuras, deteriorações das estruturas, avaliação da durabilidade, resistência, entre outros (ACI 228.2R, 1998).

4 ULTRASSOM

O ultrassom é um método não destrutivo que tem sido utilizado há mais de 60 anos, o qual se baseia na propagação de ondas de tensão, obtendo sucesso na verificação da qualidade do concreto. Esse método pode ser empregado para avaliação da integridade de estruturas, inclusive em casos de incêndio, por identificar a uniformidade do concreto, presença de vazios, fissuras e imperfeições, estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

As vantagens de se utilizar o ultrassom é que, além de ser um método totalmente não destrutivo, o equipamento é fácil de operar, portátil e apresenta disponibilidade no mercado. É um ótimo método para investigar a uniformidade do concreto por meio de um procedimento simples, possuindo alta sensibilidade na detecção de fissuras superficiais e internas (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

4.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Fisicamente, as ondas são definidas como movimentos causados por perturbações que se propagam através do espaço ou de algum meio no transcorrer do tempo, transmitindo energia sem o transporte de matéria (BAUER et al., 2013).

Uma onda periódica senoidal apresenta como características o período (T) que se refere ao tempo entre as duas cristas de ondas sucessivas. O comprimento de onda (λ) que é a distância entre as duas cristas de ondas sucessivas e a frequência (f) da onda correspondente ao inverso do período ($1/T$). Sua velocidade (V) é dada pela Equação 4.1.

$$V = \lambda f \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

V = velocidade da onda (m/s)

λ = comprimento de onda (m)

f = frequência (kHz)

Quando um impulso é aplicado em uma massa sólida, as ondas geradas apresentam três configurações: longitudinais,

transversais e superficiais, visto que cada configuração apresenta uma velocidade de propagação (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

As ondas longitudinais também denominadas ondas de compressão ou ondas P, são as mais rápidas, pois provocam o deslocamento das partículas na mesma direção em que se propagam (Figura 4.1) (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

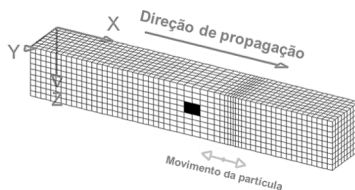


Figura 4.1: Ondas longitudinais
Fonte: BRAILE (2010)

Nas ondas transversais ou ondas S, o deslocamento das partículas se dá perpendicularmente a sua propagação. No concreto, sua velocidade geralmente corresponde a 60% da velocidade das ondas longitudinais (Figura 4.2) (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

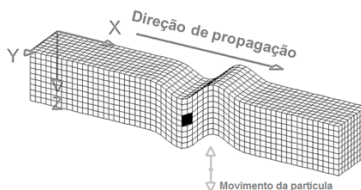


Figura 4.2: Ondas transversais
Fonte: BRAILE (2010)

As ondas superficiais ou ondas de Rayleigh se propagam em configuração elíptica ao longo da superfície do material, conforme apresentado na Figura 4.3. Entre os três formatos de ondas, as superficiais apresentam menor velocidade geralmente correspondendo a apenas 55% da velocidade das ondas longitudinais no concreto (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

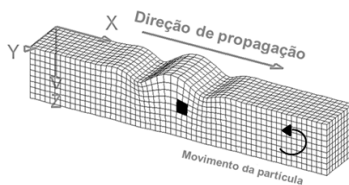


Figura 4.3: Ondas superficiais
Fonte: BRAILE (2010)

Quando uma onda se propaga através de um meio, a intensidade da energia do sinal diminui, ou seja, as amplitudes reduzem em função do tempo. Esse fenômeno ocorre devido à divergência e a atenuação. A divergência, também conhecida como feixe de propagação ou atenuação geométrica, depende apenas do tipo da frente de onda e da distância entre os sensores. A atenuação, por outro lado, depende do meio, é muito mais complexa e seu coeficiente é determinado pela medição da redução da amplitude de uma onda ultrassônica (ROBEYST et al., 2009; PHILLIPIDIS & AGGELIS, 2004).

Os mecanismos de atenuação do concreto se processam na forma de absorção (intrínseco) e dispersão (extrínseco), os quais não podem ser diretamente separados. A absorção é a conversão da energia sonora em outras formas de energia, correspondendo ao efeito das oscilações das partículas, no qual uma rápida oscilação perde mais energia quando comparada a uma oscilação lenta. A absorção geralmente é crescente à medida que a frequência aumenta, porém, a uma taxa muito menor quando comparada a dispersão (PHILLIPIDIS & AGGELIS, 2004; KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977).

A dispersão é o desvio de parte da energia guiada pelos diversos modos de propagação em várias direções que ocorre devido a não homogeneidade do material, o qual contém limites em que a impedância acústica altera abruptamente devido as diferenças de densidade ou velocidade nas interfaces. Esse mecanismo é dependente da frequência e, no concreto, ocorre principalmente na matriz viscoelástica água/cimento (KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977; ANUGONDA et al, 2001).

4.2 ENSAIO DE ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom consiste em gerar vibrações longitudinais produzidas por um transdutor eletroacústico, o qual é posicionado em contato com a superfície do concreto utilizando uma camada de acoplante entre eles. O transdutor gera um pulso que é transmitido ao longo do concreto em forma de ondas, as quais são convertidas em sinal elétrico da mesma frequência por um segundo transdutor (Figura 4.4) (IAEA, 2002).

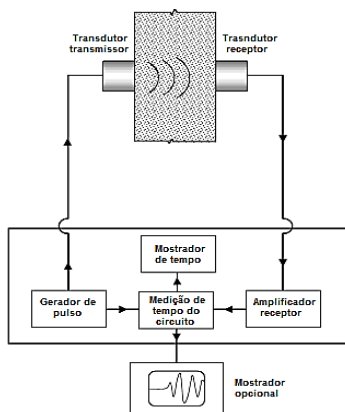


Figura 4.4: Diagrama sistemático do ensaio de velocidade de pulso no ultrassom

Fonte: NAIK; MALHOTRA; POPOVICS (2004)

A frequência de repetição do pulso deve ser baixa o suficiente para evitar interferências entre os pulsos consecutivos. Uma ampla gama de transdutores com frequência natural de 24 kHz a 200 kHz estão disponíveis, sendo o de cristal piezoelétrico o mais popular. Os transdutores podem ser dispostos de três maneiras: em faces opostas (transmissão direta), em faces adjacentes (transmissão semidireta) e na mesma face (transmissão indireta) (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

A disposição direta é considerada a mais confiável, pois o caminho do percurso é claramente definido e pode ser medido com precisão, sendo indicado manter esta disposição sempre que possível. O método semidireto, por vezes, pode ser utilizado de forma satisfatória desde que os transdutores não permaneçam muito distantes, caso contrário, o pulso transmitido

pode atenuar impossibilitando a detecção do sinal de pulso. A transmissão indireta é definitivamente a menos satisfatória, uma vez que a amplitude do sinal recebido pode ser 3% inferior quando comparado à transmissão direta. (Figura 4.5) (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006).

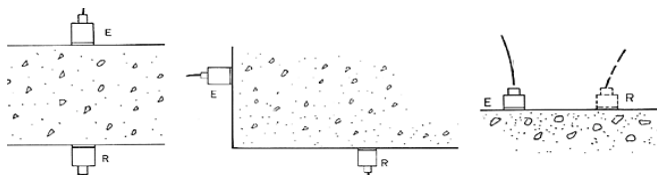


Figura 4.5: Transdutores por transmissão direta, semidireta e indireta
Fonte: NBR 8802 (1994)

4.2.1 Fatores intervenientes

Apesar do método do ultrassom apresentar diversas vantagens, alguns fatores intervenientes podem influenciar nos resultados do ensaio. Esses fatores podem ser divididos em três categorias, os referentes às propriedades dos materiais que compõem o concreto, ao uso do equipamento e as condições externas.

Entre os fatores relacionados às propriedades dos materiais empregados tem-se o tipo de agregado graúdo que, quanto mais denso, produz concretos com velocidades de propagação superiores. A relação água/cimento que, quanto maior, apresenta velocidades inferiores e os tipos de cimentos, os quais possuem diferentes taxas de hidratação que, quanto maiores, apresentam velocidades de pulso superiores (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Considerando os fatores referentes ao uso do equipamento, é essencial que exista um acoplamento acústico adequado entre o transdutor e o concreto para assegurar que os pulsos ultrassônicos gerados pelo transdutor transmissor atravessem o concreto e sejam detectados pelo transdutor receptor. Também é importante a escolha do transdutor correto e a garantia de um comprimento mínimo para a propagação das ondas, evitando que os transdutores fiquem muito próximos e os resultados sejam significativamente influenciados pela

heterogeneidade do concreto (IAEA, 2002; EVANGELISTA, 2002).

Um dos fatores externos intervenientes é a temperatura que, quando se apresenta superior a 30 °C, propicia o surgimento de microfissuras e quando inferior a 5 °C ocasiona o congelamento da água presente no concreto, fazendo com que ocorram modificações nos valores da velocidade (EVANGELISTA, 2002).

4.3 PARÂMETROS NO DOMÍNIO DO TEMPO

A onda pode ser analisada tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. No entanto, em aparelhos de ultrassom o padrão gerado é o domínio de tempo, apresentando um sinal com alterações na amplitude em relação ao tempo, permitindo analisar parâmetros como velocidade de pulso e de grupo, amplitude e energia (FOROUZAN, 2007).

Tradicionalmente, a variação na velocidade de pulso ultrassônico (VPU) tem sido utilizada como indicador do grau do dano em concretos, visto que pesquisadores têm identificado que as velocidades geralmente se apresentam inferiores em casos de concretos danificados. Contudo, estudos têm mostrado que somente esse parâmetro não é capaz de apresentar o quadro completo dos danos (SANTHANAM, 2010).

Em vista disso, não se deve estabelecer apenas uma correlação entre o dano e a velocidade de pulso, pois diferentes tipos de cimento, agregados graúdos e miúdos, a relação água/cimento e o ar incorporado, tornam qualquer mistura única. Além disso, a forma dos danos nem sempre é a mesma, uma vez que as fissuras podem variar da ordem de micrômetros para centímetros. Ademais, considerando a orientação e o número de fissuras, compreende-se que qualquer estrutura poderá ser diferente e a função de quantificar os danos distribuídos, complexa (AGGELIS & SHIOTANI, 2008).

No caso de materiais heterogêneos, como o concreto, a análise se torna muito complexa devido a diversos efeitos, entre eles o grande número de dispersões de ondas longitudinais, transversais e superficiais tanto no agregado quanto na superfície, a dependência da frequência dos transdutores na atenuação e dispersão, dificultando a interpretação dos sinais (HAUWAERT et al., 1998).

A complexidade na análise do dano no concreto se torna ainda maior quando há a necessidade de se detectar microfissuras, pois é indicada a utilização de frequências mais altas, uma vez que valores abaixo de 100 kHz são capazes de detectar apenas microfissuras. Porém, na gama de altas frequências, o comprimento da onda apresenta o mesmo tamanho dos agregados, implicando na dispersão do sinal (Figura 4.6) (QUIVIGER et al., 2012).

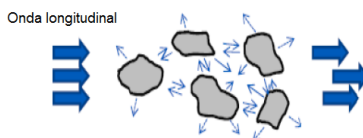


Figura 4.6: Dispersão durante a passagem da onda ultrassônica no concreto

Fonte: QUIVIGER et al. (2012)

Portanto, para obter informações de maior precisão sobre a qualidade do concreto, pode-se caracterizar a propagação da onda por meio de parâmetros alternativos e possíveis de serem identificados no domínio do tempo. Esses parâmetros podem ser analisados por meio do formato do pulso ultrassônico gerado, pois atualmente a maioria dos equipamentos de ultrassom fornece a configuração da onda por intermédio de meios como osciloscópios e softwares (Figura 4.7) (SHIOTANI & AGGELIS, 2009).

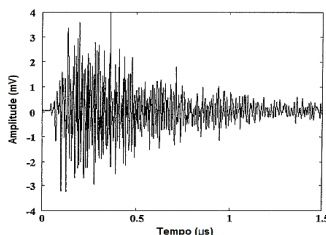


Figura 4.7: Formato de sinal gerado pelo equipamento de ultrassom

Fonte: ANUGONDA et al. (2001)

A seguir são apresentados os parâmetros indicados por pesquisadores como eficientes na detecção de danos no concreto e que são possíveis de se identificar a partir do formato do pulso ultrassônico gerado no domínio do tempo.

4.3.1 Velocidade de pulso

A velocidade de pulso é uma relação entre a distância e o tempo de percurso para que uma onda ultrassônica atravesse o concreto. Os valores obtidos são dependentes das propriedades elásticas e da massa do material.

Alguns equipamentos de ultrassom fornecem em seu mostrador a medição do tempo que se baseia na detecção do pulso da onda longitudinal, sendo possível calcular a velocidade de propagação aplicando a Equação 4.2 (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 2006; NBR 8802, 1994).

$$V = L/t \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde:

V = velocidade de propagação (m/s);

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

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

4.3.2 Velocidade de grupo

A velocidade média de um grupo ou pacote de ondas denomina-se velocidade de grupo, a qual corresponde a um sinal de comprimento finito compreendendo um número limitado de comprimentos de onda (BITTENCOURT, 2000 apud SOUZA, 2014).

A Figura 4.8 representa um pacote de ondas, que é um pequeno “envelope” da ação de ondas localizadas que viajam como uma unidade. A linha externa que as contorna é a envoltória deste pacote de ondas, a qual se move na velocidade de grupo. A variação periódica do envelope no espaço, forma vários pacotes de onda e a velocidade de grupo é apenas a velocidade desses pacotes (MIT, 2000 apud CARELLI, 2014).

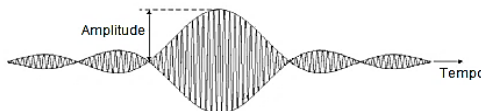


Figura 4.8: Grupo de ondas

Fonte: SILVA (2013)

A velocidade de grupo leva em conta as chegadas tardias de um formato de pulso ultrassônico. Em geral, esse parâmetro é uma medida da velocidade com que a maior parte da energia se propaga. Existem diferentes abordagens para seu cálculo. Alguns pesquisadores utilizam o pico máximo dos formatos das ondas. Outros criam o envelope de sinal e adotam seu ponto máximo. Além disso, correlações cruzadas entre os sinais de emissão e recepção também têm sido empregadas (SHIOTANI & AGGELIS, 2009).

4.3.3 Amplitude

A amplitude é o pico do sinal, ou seja, o deslocamento máximo da onda, o qual decresce gradualmente à medida que se propaga ao longo do meio. Essa atenuação pode ser utilizada para monitorar o crescimento das fissuras no material desde que a transmissão se mantenha constante e os transdutores estejam bem acoplados. A atenuação também dependerá da frequência do transdutor e do tamanho e número de falhas encontradas entre o transmissor e o receptor (SUARIS & FERNANDO, 1987).

O parâmetro da amplitude possibilita verificar também seu valor máximo, o qual é definido como o valor da máxima intensidade, sendo proporcional a energia que ela transporta (FOROUZAN, 2007; CARELLI, 2014; SANTHANAM, 2010).

4.3.4 Energia

A energia é um parâmetro considerado sensível na presença do dano. Portanto, para certas deteriorações no concreto, quando comparado a outros parâmetros, sua redução é muito mais evidente e se inicia mesmo com a acumulação de danos leves (AGGELIS & SHIOTANI, 2008).

Conforme os danos no concreto aumentam em virtude dos elevados níveis de carga, a presença de fissuras,

consequentemente, também aumenta, sendo possível considerar a estimativa da energia transmitida como um indicador de dano (SANTHANAM, 2010).

Segundo alguns autores, entre eles, Hauwaert; Delannay; Thimus (1998 e 1999), Sagar & Prasad (2011), Landis & Baillon (2012), Behnia; Chai; Shiotani (2014), Wasantha & Shao (2014), a energia do sinal é proporcional ao quadrado da amplitude e pode ser calculada pela Equação 4.3.

$$E = \int_{t_0}^{t_i} [A(t)]^2 dt \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

E = energia (V.µs);

A(t) = amplitude do sinal de tempo t (V);

t₀ = é o tempo que corresponde ao início da primeira onda de grupo (µs);

t_i = é o tempo que corresponde ao fim da primeira onda de grupo (µs).

Já de acordo com Shiotani e Aggelis (2009), a energia é o somatório do valor absoluto da amplitude do sinal, calculada pela Equação 4.4.

$$E = \int_{t_0}^{t_i} |A(t)| dt \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde:

E = energia (V.µs);

A(t) = amplitude do sinal de tempo t (V);

t₀ = é o tempo que corresponde ao início da primeira onda de grupo (µs);

t_i = é o tempo que corresponde ao fim da primeira onda de grupo (µs).

Em estudos realizados por Hoffman (2015), concluiu-se que, entre os dois modelos de cálculo apresentados na literatura, a Equação 4.3 apresentou maior sensibilidade, porém com um maior coeficiente de variação enquanto que a Equação 4.4 apresentou menor sensibilidade na detecção de fissuras, porém, com menor variação dos resultados em torno da média.

É importante ressaltar que, para a energia ultrassônica, apenas sua variação relativa deve ser considerada, pois seu valor absoluto não apresenta significado em virtude da dependência da energia ultrassônica sobre o acoplamento entre os transdutores e a amostra, o que está associado à quantidade de acoplante e a tensão exercida (HAUWAERT et al., 1999).

É possível identificar também a energia acumulada, a qual se baseia no mesmo princípio do cálculo da energia, porém, calculada somente pelo valor absoluto, levando-se em consideração a amplitude acumulada ao longo do tempo (SHIOTANI & AGGELIS, 2009).

4.4 APLICAÇÃO DO ULTRASSOM EM ESTUDOS COM CONCRETOS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Como já mencionado anteriormente, convencionalmente, o ensaio de ultrassom se baseia principalmente na velocidade de pulso. Portanto, existem diversas pesquisas que utilizam esse parâmetro em casos de estruturas de concreto submetidas a altas temperaturas, principalmente para verificar sua eficiência ou correlacionar seus valores com alterações nas propriedades mecânicas do concreto.

A seguir são apresentados alguns estudos que utilizaram o método não destrutivo do ultrassom na verificação de concretos danificados termicamente, a fim de expor os resultados obtidos nas pesquisas.

4.4.1 Handoo et al. (2002)

Handoo et al. (2002) realizaram estudos para identificar as alterações físicas, químicas e mineralógicas em concretos expostos a elevadas temperaturas. Deste modo, para avaliar as alterações físicas, os pesquisadores optaram pelo método da velocidade de pulso ultrassônico.

Para tanto, foram produzidos cubos de concreto de 100 mm de dimensão, que, depois de executados, permaneceram no molde em processo de cura por 48 horas a temperatura ambiente e condições de umidade. Em seguida, as amostras foram desmoldadas e armazenadas por 28 dias na água a 27 ± 2 °C para então, passarem pelo processo de secagem a mesma temperatura.

Posteriormente, os cubos foram aquecidos à faixa de 100 °C a 1000 °C por um período constante de 5 horas, e, seguidamente, resfriados a temperatura ambiente. A velocidade de pulso ultrassônico foi mensurada antes e após o aquecimento e, posteriormente, as amostras foram imersas na água durante 48 horas para então, realizar o ensaio de resistência à compressão.

Após o processo de aquecimento, os pesquisadores identificaram que a velocidade de pulso de 4,05 km/s a 100 °C reduziu para 0,33 km/s aos 700 °C, além da consequente degradação e perda da qualidade do concreto. Observou-se também que a transmissão do pulso ao longo do material apresentou um decréscimo gradual na velocidade conforme a temperatura aumentou. Acima de 300 °C o decréscimo foi rápido devido à significativa degradação física do concreto e aos 800 °C o pulso não pôde ser transmitido indicando total degradação do estado físico (Figura 4.9).

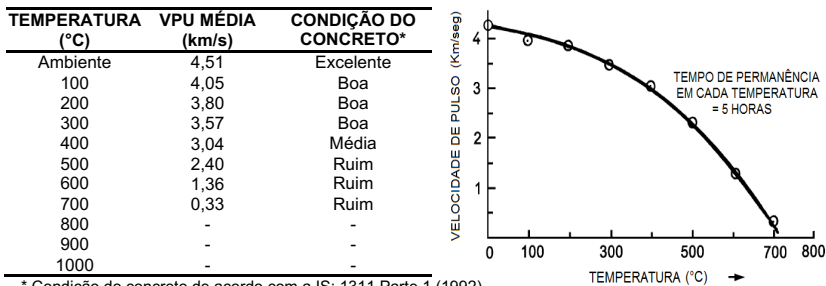


Figura 4.9: Decréscimo da velocidade de pulso ultrassônico em cubos de concreto devido o aumento da temperatura

Fonte: HANDOO et al. (2002)

O ensaio de resistência à compressão para amostras a temperatura ambiente foi realizado após os 28 dias de cura, obtendo um valor médio de 36 MPa. Já os cubos de concreto expostos a altas temperaturas não apresentaram quedas significativas na resistência até os 400 °C.

No entanto, acima dessa temperatura ocorreu um decréscimo significativo devido a perda de água dos cristais resultando na diminuição do Ca(OH)_2 , além da formação de fissuras e alterações na morfologia. Acima de 600 °C, a partir da

redução média da resistência à compressão, foi possível detectar a nítida ruína do concreto (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Decréscimo na resistência à compressão do concreto devido a altas temperaturas

TEMPERATURA (°C)	Ambiente	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	36	36	36	35	32	16	15	13	10	-

Fonte: HANDOO et al. (2002)

4.4.2 Silva (2009)

Na pesquisa de Silva (2009) utilizaram-se ensaios de resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico e pesagem das amostras para avaliar a influência da temperatura na resistência residual de concretos usuais na construção civil. Para tanto, foram produzidos 40 corpos de prova de 10 x 20 cm com resistência de 28 e 35 MPa, curados por 160 dias e aquecidos a temperaturas de 300 °C, 500 °C, 700 °C e 900 °C a uma taxa de 7,4 °C/min por um período de 2 h e 30 min e resfriados no interior da mufla durante 24 horas.

A partir da pesagem das amostras observou-se a perda de massa devido ao aumento da temperatura e no ensaio de resistência à compressão Silva (2009) identificou que tanto o concreto de 28 MPa como o de 35 MPa, devido ao aquecimento, apresentaram um decréscimo nos valores de resistência à compressão. No concreto de 28 MPa ocorreu uma redução de resistência mais acentuada aos 500 °C, provavelmente devido a dissociação do C-S-H em CaO e água, visto que sua principal função é manter a pasta de cimento unida mediante a ligações químicas e forças coesivas de Van der Waals, contribuindo para a resistência do concreto.

A velocidade de pulso ultrassônico foi verificada antes (velocidade inicial) e após (velocidade final) o aquecimento. Os transdutores utilizados apresentaram frequência de 54 kHz e as medições foram realizadas pelo modo direto. Com os dados coletados percebeu-se que a velocidade de propagação de pulso reduziu conforme a temperatura aumentou, demonstrando a capacidade do ultrassom detectar alterações no concreto quando exposto a altas temperaturas.

Segundo a autora, essas alterações poderiam estar associadas ao aumento da porosidade do concreto devido ao aquecimento, pois quanto mais porosa a pasta de cimento, os pulsos ultrassônicos levam mais tempo para percorrer o caminho entre o transdutor emissor e receptor (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Valores médios de massa, velocidade de pulso ultrassônico e resistência à compressão para diversos níveis de temperatura

Temperatura (°C)	Massa (kg)		V (m/s)		f_c (MPa)	
	C28	C35	C28	C35	C28	C35
20	3,70	3,67	4647	4795	39,33	40,27
300	3,50	3,45	3909	3877	22,74	23,24
500	-	3,41	2982	2639	9,93	9,00
700	3,40	3,36	1085	1038	0,93	0,98
900	3,30	3,34	563	669	0,16	0,30

Fonte: SILVA (2009)

A partir dos ensaios realizados, Silva (2009) apresentou equações e gráficos correlacionando a velocidade de pulso com as propriedades mecânicas do concreto para possibilitar o mapeamento de regiões que apresentem problemas e analisar o estado das estruturas após situação de incêndio.

Comparar as zonas sãs com as danificadas possibilita verificar as alterações na velocidade do concreto e então correlacionar com a resistência à compressão que a estrutura deve apresentar.

Por meio da regressão linear foram geradas equações que correlacionaram a velocidade de propagação de pulso ultrassônico com a resistência à compressão residual do concreto com um coeficiente de determinação (r^2) de 88,16% e 87,89% respectivamente (Equação 4.5, 4.6 e Figura 4.10).

$$f_{28} = 0,70842 + 0,00866703V \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$f_{35} = 0,619803 + 0,0109924V \quad (\text{Equação 4.6})$$

Onde:

f_{28} = resistência residual do concreto de 28 MPa (MPa);

f_{35} = resistência residual do concreto de 35 MPa (MPa);

V = velocidade de pulso ultrassônico (m/s).

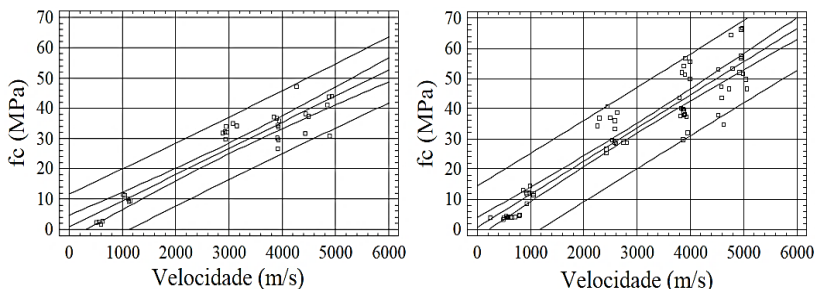


Figura 4.10: Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão a) concreto de 28 MPa b) concreto de 35 MPa
Fonte: SILVA (2009)

4.4.3 Yamada et al. (1989)

Yamada et al. (1989) avaliaram a qualidade do concreto exposto a altas temperaturas por meio da espectroscopia ultrassônica. Para tanto, foram moldadas amostras de concreto e argamassa prismáticas de 4x4x16 cm compostas de cimento Portland, agregado graúdo e miúdo para relações água/cimento de 0,5, 0,6 e 0,7. As amostras foram desmoldadas após 24 horas, permanecendo, em seguida, expostas ao ar por 6 semanas a temperatura de 20 ± 1 °C e umidade de $45 \pm 5\%$.

As amostras foram aquecidas a temperaturas de 100 °C, 200 °C, 400 °C e 600 °C por um período de 15, 30, 60 e 120 minutos. Após, foi realizado o ensaio de ultrassom em que os impulsos ultrassônicos emitidos e detectados pelo transdutor, compreenderam as propriedades do material, do meio e também as características do próprio sistema de medição, incluindo o transdutor.

Nesta pesquisa foram empregados transdutores de entrada e saída de 10~300 kHz modelo AE-905S com frequência de ressonância de 1 MHz, aplicando-se um gel condutor entre o transdutor e a amostra (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Valores seleccionados no aparelho de medição

Tipo	Grau de amplificação (dB)			Alcance de frequência (kHz)	Tempo de amostragem ($\times 10^{-6}$ s)
	Pré-amp.	Principal amp.	Total		
I	20	0	20	10~300	1
II	20	30	50		

Fonte: YAMADA et al. (1989)

Durante o processo de medição o auto digitalizador memorizou a onda detectada, a qual foi enviada por meio da interface GP-IB ao computador. Para obter as informações escritas neste sistema de medição, utilizou-se a função de transferência de frequência obtida pela transformada de Fourier a fim de transmitir a resposta do impulso (Figura 4.11).

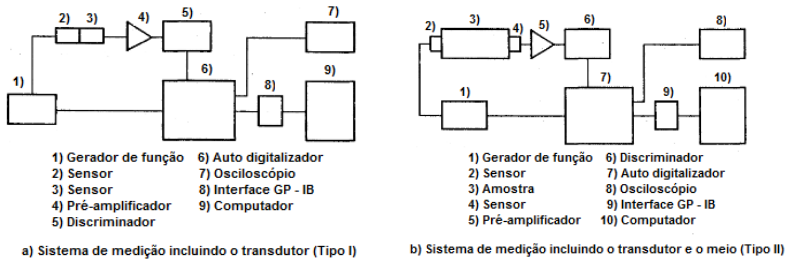


Figura 4.11: Diagrama do sistema de medição

Fonte: YAMADA et al. (1989)

Apesar dos autores trabalharem com o domínio da frequência, nesta pesquisa analisou-se também a resistência à compressão e o comportamento de alguns parâmetros no domínio do tempo relacionados ao acréscimo de temperatura.

Desse modo, a partir dos gráficos obtidos para as amostras aquecidas durante 30 minutos, percebeu-se que a resistência à compressão da argamassa reduziu significativamente quando comparada ao concreto.

De acordo com resultados de pesquisas anteriores, para temperaturas superiores a 200 °C, a resistência à compressão diminui rapidamente, porém, no estudo realizado por Yamada et al. (1989), percebeu-se que até 400 °C não houve um decréscimo significativo, principalmente no concreto (Figura 4.12).

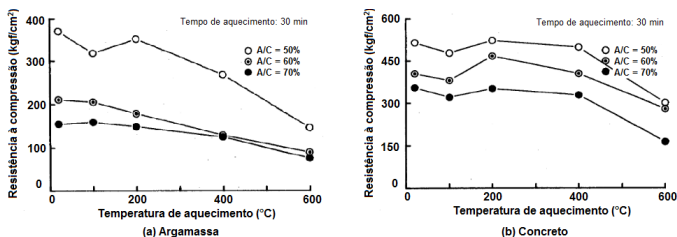


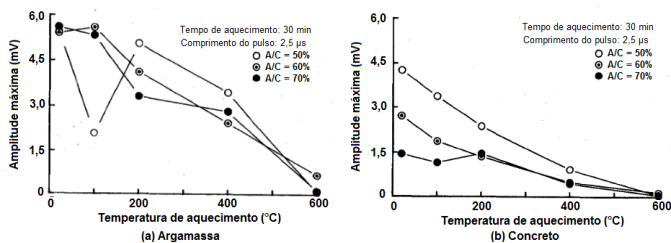
Figura 4.12: Relação entre a resistência à compressão e a temperatura de aquecimento

Fonte: YAMADA et al. (1989)

Os autores justificaram esse comportamento devido à relação altura/diâmetro, pois em pesquisas normalmente utiliza-se a relação 2, enquanto neste estudo adotou-se 1, dificultando assim, a influência dos danos internos do material, fazendo com que os valores não diminuíssem com tanta intensidade.

O decréscimo mais expressivo aos 600 °C foi atribuído à expansão que ocorre entre 500 °C a 580 °C com o óxido de cálcio (CaO), o qual absorve a umidade do ar após o resfriamento, ocasionando fissuras macroscópicas.

Ao analisar os parâmetros obtidos por meio do ensaio de ultrassom observou-se que, no geral, o formato do pulso ultrassônico decresce com o aumento da temperatura, visto que, para o concreto, quanto maior a relação água/cimento, menores os valores obtidos, os quais decresceram rapidamente quando comparados à argamassa devido à presença do agregado graúdo que influencia na dispersão, a qual aumenta com o acréscimo da temperatura (Figura 4.13).



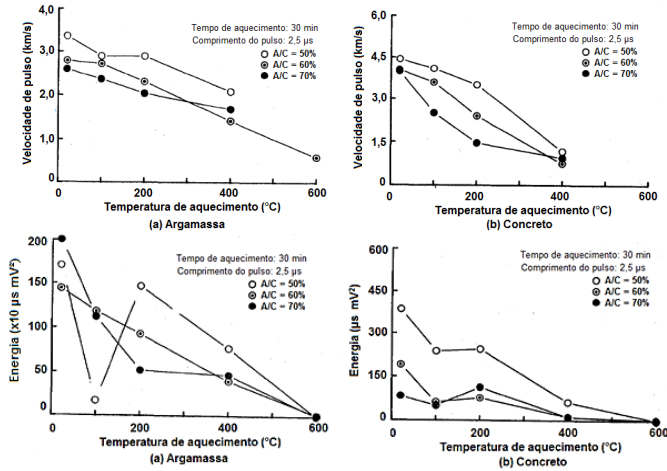


Figura 4.13: Relação entre a amplitude máxima, velocidade de pulso e energia com a temperatura de aquecimento
 Fonte: YAMADA et al. (1989)

À vista disso, Yamada et al. concluíram que a resistência da argamassa e do concreto aquecido diminuiu com o aumento da temperatura sem sofrer influência do tempo de aquecimento. Além disso, houve o acréscimo da dispersão, provocando de modo geral, a diminuição da velocidade de propagação do ultrassom, amplitude máxima e energia, independentemente da relação a/c.

Portanto, segundo os autores, a espectroscopia ultrassônica é um método que apresenta precisão considerável ao estimar a deterioração no interior do material aquecido. No entanto, é necessário quantificar com maior exatidão os parâmetros sensíveis a alterações na estrutura interna do concreto.

4.5 CONTINUIDADE DOS ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA

Com base nas pesquisas citadas, as quais utilizaram o método do ultrassom em concretos expostos a altas temperaturas, observou-se que, de modo geral, é comum analisar apenas a velocidade de pulso ultrassônico. No entanto,

com a diversidade de parâmetros possíveis de se estudar por meio do ultrassom, é importante se aprofundar neste tema.

Desse modo, deu-se início a um estudo com o intuito de ampliar o uso do ultrassom na avaliação de estruturas de concreto expostas até 400 °C por meio de parâmetros alternativos que, segundo pesquisadores, têm apresentado maior sensibilidade na análise de microfissuras em concretos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Frente aos objetivos geral e específicos desta pesquisa, descreve-se a seguir o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento do experimento laboratorial.

5.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta pesquisa optou-se pela produção de um concreto convencional com classe de resistência à compressão C30, composto de cimento Portland II Z 32, cujas características informadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 5.1, cumprindo as recomendações da NBR 11578: Cimento Portland composto.

Tabela 5.1: Características do cimento CP II Z 32

COMPOSIÇÃO			
Tipo	II	Clinker + gesso	76 a 94%
Sigla	CP II Z	Calcário	0 a 10%
Classe	32	Pozzolana	6 a 14%
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS			
Finura		Tempo de pega	
Resíduo na peneira 75 mm (%)	≤ 12,0	Início (h)	≥ 1
Área específica (m ² /kg)	≥ 260	Término (h)	≤ 10
Expansibilidade			
A Frio (mm)			≤ 5
A Quente (mm)			≤ 5
Resistência à compressão (MPa)			
1 dia			-
3 dias			≥ 10
7 dias			≥ 20
28 dias			≥ 32
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS			
Resíduo insolúvel (%)	≤ 16,0	Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	≤ 4,0
Perda ao fogo (%)	≤ 6,5	Dióxido de carbono - CO ₂ (%)	≤ 5,0
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤ 6,5	Enxofre - S (%)	-

Fonte: VOTORANTIM (2015)

Além disso, foram empregados dois tipos de agregados miúdos para compor o concreto, sendo eles: areia natural média e fina. E para o agregado graúdo empregou-se pedrisco de origem granítica, cujas composições granulométricas e características físicas são apresentadas nas Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.2: Composição granulométrica do pedrisco e das areias

PEDRISCO	Peneira (mm)	37,5	31,5	25	19	12,5	9,5	6,3	4,8	Fundo	Total
	Massa (g)	-	-	-	-	-	4,60	235,00	182,90	77,70	500,20
	% Retida	-	-	-	-	-	0,920	46,981	36,565	15,534	100,00
	% Acumulada	-	-	-	-	-	0,920	47,901	84,466	100,00	-
AREIA MÉDIA	Peneira (mm)	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Fundo	Total
	Massa (g)	-	0,20	3,40	31,90	85,90	157,70	119,30	65,20	39,10	502,70
	% Retida	-	0,040	0,676	6,346	17,088	31,371	23,732	12,970	7,778	100,00
	% Acumulada	-	0,040	0,717	7,062	24,150	55,520	79,252	92,222	100,00	-
AREIA FINA	Peneira (mm)	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Fundo	Total
	Massa (g)	-	0,80	0,10	4,60	46,10	110,30	112,70	146,20	78,90	499,70
	% Retida	-	0,160	0,020	0,921	9,226	22,073	22,554	29,258	15,789	100,00
	% Acumulada	-	0,160	0,180	1,101	10,326	32,399	54,953	84,211	100,00	-

Tabela 5.3: Características físicas do pedrisco e das areias

	PEDRISCO	AREIA MÉDIA	AREIA FINA
Módulo de finura	0,88	2,59	1,83
Dimensão máxima característica (mm)	9,50	4,75	2,36
Dimensão mínima característica (mm)	< 4,8	< 0,15	< 0,15
Massa específica (g/cm ³)	2,91	2,52	2,61

5.2 TRAÇO

O concreto utilizado na pesquisa foi baseado no traço de Carelli (2014) nas proporções de 1:1,07:1,07:2,37 (cimento, areia média, areia fina e pedrisco), cujas características são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Características do traço aplicado

Teor de material seco (kg)	Teor de argamassa (%)	Relação água/cimento	Abatimento (cm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)
4,51	56,99	0,64	6,5	400,16	31,38

5.3 CONCRETAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

O concreto foi produzido em uma betoneira estacionária de eixo vertical adicionando os materiais na seguinte sequência: agregado graúdo, 80% da água, cimento, agregado miúdo e o restante da água aos poucos. A consistência do concreto foi controlada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone seguindo as recomendações da NBR NM67: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Figura 5.1).



Figura 5.1: Ensaio tronco de cone

Para os ensaios de aquecimento, perda de massa, resistência à compressão, ultrassom e análises microestruturais, foram moldados 6 corpos de prova por temperatura, os quais apresentaram dimensões de 10x30 cm, conforme recomendado pela RILEM TC129MHT (2000). Esse número de amostras foi definido considerando um erro de estimativa inicial de 10% (Figura 5.2).

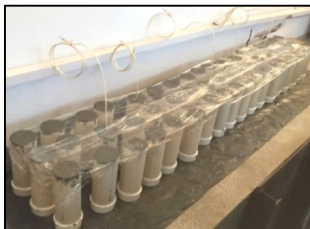


Figura 5.2: Corpos de prova 10x30 cm

No ensaio preliminar moldou-se 1 amostra de 10x30 cm por temperatura e, para o controle da resistência à compressão em temperatura ambiente, 6 corpos de prova 10x20 cm, conforme recomendado pela NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, e 6 de 10x30 cm.

O procedimento de moldagem e adensamento das amostras também foi realizado conforme indicado NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.

Os corpos de prova permaneceram dentro dos moldes por um período de 24 horas, após, foram desformados e armazenados em câmara úmida por 6 dias segundo recomendações da RILEM TC129MHT (2000). Em seguida as amostras foram conservadas por 56 dias a temperatura ambiente

totalizando um processo de cura mínimo de 63 dias a fim de proporcionar um tempo maior para a ocorrência das reações químicas no concreto, diminuindo as interferências que estas poderiam causar durante o processo de aquecimento.

Parte do processo de cura das amostras se deu a temperatura ambiente com o intuito de simular o concreto de uma estrutura real, além de evitar o alto teor de umidade presente na câmara úmida que poderia favorecer o surgimento de lascamentos e desagregações significativas durante o aquecimento do concreto.

5.4 AQUECIMENTO

Para o ensaio de aquecimento foi utilizada uma mufla elétrica da marca Linn Elektro Therm modelo KK 170 com dimensões de 460 x 610 x 590 mm, potência de 12 kW e capacidade de aquecimento de até 1340 °C (Figura 5.3).



Figura 5.3: Mufla

Fonte: www.linn-high-therm.de/industrial-furnaces (acesso em: abril de 2015)

Considerando o programa de aquecimento da mufla e a metodologia definida para o ensaio de altas temperaturas, a Figura 5.4 apresenta o modelo de curva de aquecimento empregado.

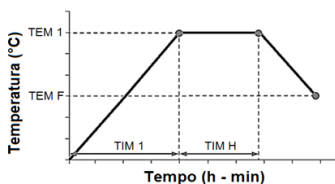


Figura 5.4: Modelo da curva de aquecimento da mufla

Onde:

TEM 1: temperatura desejada;

TEM F: temperatura recomendada para abertura do equipamento;

TIM 1: tempo para atingir a temperatura desejada;

TIM H: tempo em que a temperatura deve permanecer no nível desejado.

A taxa de aquecimento adotada foi de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ devido às limitações do equipamento. Nesta pesquisa optou-se por homogeneizar a temperatura da amostra para que as alterações identificadas devido ao aquecimento fossem de fato correspondentes ao nível de temperatura definido, até mesmo no interior da amostra.

Para tanto, o período de aquecimento foi definido a partir de ensaios preliminares utilizando 5 corpos de prova de concreto com idade mínima de 63 dias, aquecidos a diferentes níveis de temperatura: $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, realizando medições em seu interior por meio de um termopar tipo K que foi inserido durante o processo de moldagem das amostras.

O termopar foi conectado a uma unidade de aquisição, computação e registro de dados (Datalogger) da marca Agilent modelo 34970A, a fim de identificar quanto tempo levaria para que todo o concreto, inclusive seu interior, atingisse o nível de temperatura definido (Figura 5.5).

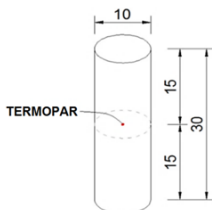


Figura 5.5: Localização do termopar para o ensaio preliminar de aquecimento

A partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares, definiram-se os períodos de aquecimento apresentados na Tabela 5.5 para as temperaturas estudadas.

Tabela 5.5: Programa de aquecimento

TEM 1 (°C)	TIM 1 (h-min)	TIM H (h-min)	TEM F (°C)
100	00:10	03:50	150
200	00:20	04:50	150
300	00:30	03:10	150
400	00:40	02:30	150
500	-	-	-

Nos ensaios definitivos utilizaram-se amostras de 10x30 cm com idade mínima de 63 dias para cada nível de temperatura, os quais foram definidos com o intuito de garantir que o concreto, quando exposto a altas temperaturas, passasse por diversas fases de alterações físicas e químicas mencionadas no capítulo 3, representando uma situação inicial de incêndio.

As amostras não foram aquecidas a 500 °C, pois durante o teste preliminar o corpo de prova sofreu *spalling*, o que impediria a posterior realização do ensaio de ultrassom. Portanto, redistribuiu-se a quantidade de corpos de prova produzidos, utilizando 7 amostras para cada nível de temperatura.

Para evitar que possíveis lascamentos danificassem o equipamento, durante todos os ensaios de aquecimento os corpos de prova permaneceram dentro de uma “gaiola” de proteção em aço com aberturas de 2,2 cm de diâmetro espaçadas a cada 0,5 cm (Figura 5.6).

**Figura 5.6:** Gaiola

Após o processo de aquecimento, as amostras foram resfriadas no interior da mufla fechada, tendo em vista que o equipamento só pode ser aberto a temperaturas inferiores a 150 °C para não ser danificado.

5.5 PERDA DE MASSA

A perda de massa dos corpos de prova devida à exposição a altas temperaturas foi determinada pela diferença entre as massas antes e após o aquecimento, empregando-se a Equação 5.1.

$$PM (\%) = \frac{m - m_{aq}}{m} \cdot 100 \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde:

PM = perda de massa do corpo de prova (%);

m = massa do corpo de prova antes do aquecimento (kg);

m_{aq} = massa do corpo de prova 24 horas após o aquecimento (kg).

Para a pesagem utilizou-se uma balança da marca Urano modelo UDC 15000/5 com precisão de 5,0 g e capacidade máxima de 15000,0 g.

5.6 ULTRASSOM

As amostras, após serem retificadas, foram submetidas ao ensaio de ultrassom, cujas leituras foram realizadas pelo aparelho da marca Pundit Lab comercializado pela Proceq (Figura 5.7).



Figura 5.7: Pundit Lab

Fonte: www.proceq.com (acesso em: abril de 2015)

Os transdutores empregados apresentam frequência nominal de 200 kHz, a qual está relacionada à aproximação com a dimensão do agregado graúdo disponível para a produção do concreto a fim de minimizar a atenuação associada à frequência de propagação do pulso.

O equipamento do ultrassom permite a configuração da amplitude de saída do pulso, tempo de exibição e ganho de sinal. Nesta pesquisa utilizaram-se valores indicativos baseados em estudos realizados por Carelli (2014) e Hofmann (2015), portanto, foram realizadas 20 leituras por amostra para amplitude de saída do pulso de 500 V que corresponde ao maior valor fornecido pelo equipamento, tempo de exibição de 5 ms e ganho de sinal recebido de 10x e 50x, pressupondo que as amplitudes iriam diminuir progressivamente em virtude do acréscimo de temperatura.

Porém, como após o aquecimento não houve uma extrema redução da amplitude, identificou-se a necessidade de diminuir o ganho do sinal recebido a fim de evitar um excesso de truncamento da amplitude, o que poderia encobrir os resultados. Portanto, optou-se por realizar os ensaios de ultrassom adotando ganhos de 1x e 2x (Figura 5.8).

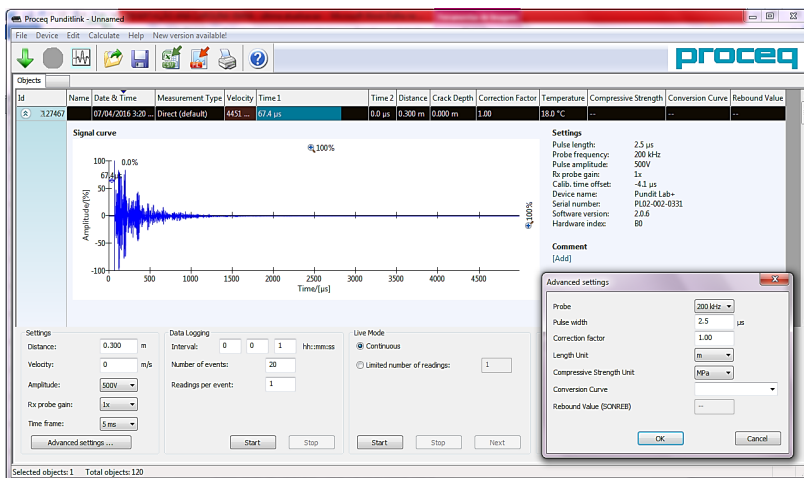


Figura 5.8: Configuração do sistema

Antes de iniciar os ensaios, o equipamento foi calibrado, acoplando os transdutores devidamente à superfície do bloco de calibração aplicando um gel de acoplamento fornecido pelo fabricante. Todas as medições foram realizadas pelo modo de transmissão direta (Figura 5.9 e 5.10).

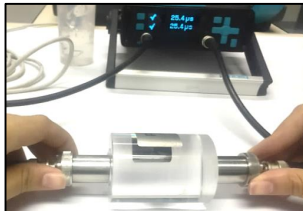


Figura 5.9: Ultrassom calibrado



Figura 5.10: Método da transmissão direta em corpos de prova

Com os dados obtidos no ensaio do ultrassom analisaram-se os seguintes parâmetros: velocidade de propagação de pulso ultrassônico, velocidade de grupo, esta calculada pela Equação 5.2 conforme sugerido por Carelli (2014), além da análise da amplitude máxima, energia e energia acumulada, dados estes que foram calculados por meio de planilhas no Excel desenvolvidas no Grupo de Pesquisa de Ensaos Não Destrutivos (GPEND) da Universidade Federal de Santa Catarina.

$$V_g = \frac{L}{t_{am}} \quad (\text{Equação 5.2})$$

Onde:

V_g = velocidade de grupo;

L = distância entre o transdutor emissor e o receptor;

t_{am} = tempo registrado para amplitude máxima da onda.

Considerando as pesquisas de Carelli (2014) e Hofmann (2015) desenvolvidas no GPEND – UFSC, a respeito do parâmetro da energia, optou-se pela análise em porcentagens (25%, 50%, 75% e 100%) para, em seguida, correlacionar com o tempo referente a esses percentuais. Além disso, para o cálculo

da energia utilizou-se a Equação 4.4, referente ao valor absoluto da amplitude do sinal, por esta apresentar menor variação dos resultados em torno da média.

5.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Aos 28 e 63 dias após a produção das amostras, considerando a tolerância permitida de 24 e 36 horas respectivamente, foram rompidos 6 corpos de prova de 10x30 cm e 6 de 10x20 cm à compressão por uma prensa da marca Shimadzu, seguindo as recomendações da NBR 5739: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, a fim de verificar a resistência obtida a partir do traço empregado.

Os corpos de prova aquecidos, juntamente com o restante das amostras não aquecidas, também foram rompidos à compressão para identificar a redução de resistência obtida devida aos danos provenientes das altas temperaturas. Essas amostras foram rompidas aos 300 dias, devido à necessidade de repetir os ensaios de ultrassom para compreender o comportamento dos parâmetros ultrassônicos nas amostras de concreto aquecidas.

5.8 ENSAIOS MICROESTRUTURAIS

Após análise dos dados ultrassônicos, verificou-se a necessidade de realizar ensaios de microestrutura a fim de compreender melhor o comportamento dos parâmetros ultrassônicos. Para tanto, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX) utilizando amostras extraídas de corpos de prova 10x30 cm íntegro e aquecidos, com 300 dias de idade.

5.8.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina com o microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6390LV. Além disso, utilizou-se a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificar os elementos químicos (Figura 5.11).

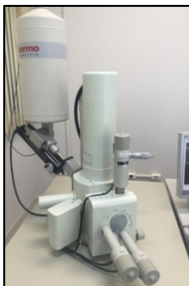


Figura 5.11: Microscópio eletrônico de varredura

5.8.2 Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X foi realizado na Central de Análises do Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) utilizando um difratômetro de raios X para monocristais da marca Enraf – Nonius, modelo Cade - 4 (Figura 5.12).

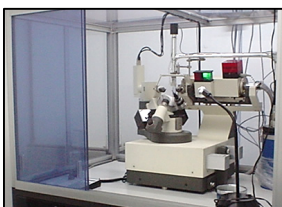


Figura 5.12: Difratômetro de raios X

Fonte: www.centraldeanalises.ufsc.br (acesso em: setembro 2016)

As amostras foram moídas e peneiradas, analisando as partículas passantes na peneira com abertura de 0,15mm. Os parâmetros de ajuste do equipamento são apresentados na Tabela 5.6 e o tratamento dos dados obtidos foi realizado com o auxílio do software Match.

Tabela 5.6: Parâmetros de ajuste do equipamento

ÂNODO	FAIXA DE VARREDURA ANGULAR	INCREMENTO ANGULAR	TEMPO
Cobre	5° a 55°	0,02°	1 s

5.9 ESTATÍSTICA

Todos os dados utilizados para análise das alterações macroestruturais foram submetidos à verificação de valores espúrios, além da análise de variância (ANOVA) considerando um intervalo de confiança de 95%, seguido do teste de Tukey para comparação entre as médias.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na presente pesquisa, os quais foram discutidos a partir da análise das alterações macroestruturais mediante aos ensaios de perda de massa, resistência à compressão, parâmetros relacionados ao ultrassom e as alterações microestruturais por meio da microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X.

6.1 ALTERAÇÕES MACROESTRUTURAIS

As alterações macroestruturais foram observadas inicialmente nos ensaios preliminares de aquecimento, especialmente a 500 °C em virtude do *spalling* do corpo de prova (Figura 6.1).



Figura 6.1: Corpo de prova que sofreu *spalling* após o aquecimento

Esse efeito pode estar relacionado ao nível de temperatura associado à taxa de aquecimento, pois como o concreto é um material que apresenta baixa condutividade térmica, durante um período há uma diferença de temperatura entre a superfície aquecida e o interior ainda frio, gerando tensões internas que provocam os lascamentos (LINDGÅRD & HAMMER, 1999).

Outro fator relevante é a dilatação térmica diferencial entre o agregado graúdo e a pasta de cimento que também podem ter contribuído para o surgimento do *spalling*.

Por meio da análise visual foi possível perceber a diferença de cor nas amostras aquecidas, conforme apresentado na Figura 6.2, uma vez que a partir de 300 °C as alterações se apresentaram mais marcantes. Cánovas (1998) indica que para 300 °C e 400 °C a coloração é rosa a vermelho, porém, neste

estudo, a pasta de cimento passou de cinza para levemente amarelada assim como observado na pesquisa de Wendt (2006). Além disso, não foram identificadas fissuras a nível macroscópico, manifestadas em virtude do aquecimento.

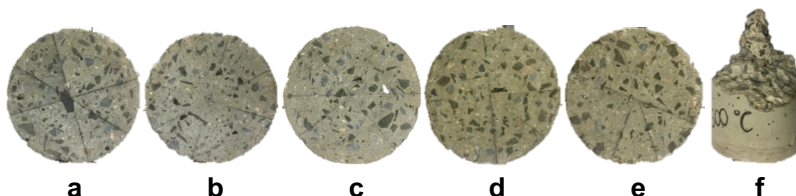


Figura 6.2: Alteração da coloração do concreto devido ao aquecimento
a) 20 °C, b) 100 °C, c) 200 °C, d) 300 °C, e) 400 °C e f) 500 °C

6.2 PERDA DE MASSA

A Figura 6.3 indica as massas das amostras de concreto à temperatura ambiente (20 °C) e após o aquecimento a 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C, observando-se que, quanto maior a temperatura de exposição da amostra, maior a redução da massa.

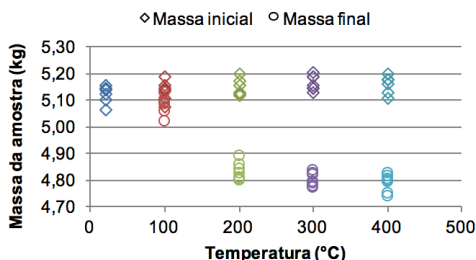


Figura 6.3: Massa das amostras de concreto

Os corpos de prova pertencentes ao grupo de 100 °C inicialmente apresentaram uma massa média de 5,13 kg e após o aquecimento 5,08 kg, ou seja, sofreram uma redução média 1,03%. Já no grupo de 200 °C o decréscimo foi de 6,04%, seguido de 7,03% aos 300 °C e 7,17% aos 400 °C (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Valores médios de massa

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Massa média antes do aquecimento (kg)	5,12	5,13	5,14	5,16	5,16
Desvio padrão (kg)	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
Coefficiente de variação (%)	0,65	0,69	0,59	0,55	0,62
Valor máximo (kg)	5,16	5,19	5,20	5,21	5,20
Valor mínimo (kg)	5,06	5,08	5,12	5,13	5,11
Massa média após aquecimento (kg)	-	5,08	4,83	4,80	4,79
Desvio padrão (kg)	-	0,03	0,03	0,03	0,03
Coefficiente de variação (%)	-	0,69	0,68	0,54	0,68
Valor máximo (kg)	-	5,13	4,89	4,84	4,83
Valor mínimo (kg)	-	5,02	4,80	4,77	4,74
Percentual de redução após o aquecimento (%)	-	1,03	6,04	7,03	7,17

Logo, constatou-se que a massa da amostra diminui com o acréscimo da temperatura. Esse comportamento se deve provavelmente a liberação das águas presentes no concreto devido ao aquecimento e o conseqüente aumento dos poros, tornando a amostra mais leve.

Aos 100 °C, a redução da massa não foi significativa, pois as águas quimicamente combinada, capilar e interlamelar iniciam a evaporação a temperaturas superiores. A 200 °C, as águas quimicamente combinada e capilar começam seu processo de liberação enquanto outras águas já evaporaram totalmente. A partir dos 300 °C todas as águas já iniciaram seu processo de liberação, ocasionando um fator de redução da massa mais evidente à medida que a temperatura cresce.

A partir da análise de variância (ANOVA) confirmou-se que as médias apresentaram diferenças significativas. Para identificar essas diferenças aplicou-se o teste de Tukey, constatando que nas comparações entre as médias duas a duas apenas entre 300 °C e 400 °C não houve diferença significativa.

6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

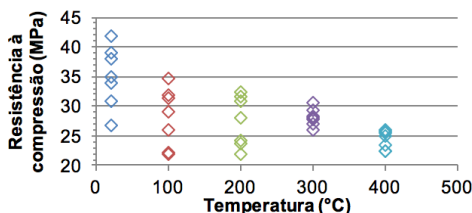
Os valores de resistência à compressão média aos 28 e 63 dias para amostras não aquecidas com dimensões de 10x20 cm e 10x30 cm são expostos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Valores de resistência à compressão aos 28 e 63 dias

Idade	28	28	63	63
Dimensão (cm x cm)	10x20	10x30	10x20	10x30
Resistência média (MPa)	31,38	28,67	36,05	30,71
Desvio padrão (MPa)	3,39	1,23	2,29	2,64
Coefficiente de variação (%)	10,81	4,30	6,34	8,58
Valor máximo (MPa)	36,65	29,76	38,51	32,74
Valor mínimo (MPa)	27,61	26,79	32,34	26,27
Percentual de redução em relação ao acréscimo da altura da amostra (%)	-	8,64	-	14,81
Fator de redução em relação ao acréscimo da altura da amostra	-	0,91	-	0,85

Correlacionando os dados obtidos para a mesma idade, porém com dimensões diferentes, observou-se que maiores relações altura/diâmetro apresentaram menor resistência à compressão. No entanto, segundo Neville (1997), para relação altura/diâmetro entre 1,5 e 4,0 a resistência varia muito pouco.

Após 300 dias da produção das amostras aquecidas, estas foram rompidas e comparadas às amostras sãs com a mesma idade (Figura 6.4 e Tabela 6.3). Observou-se que a resistência à compressão diminuiu à medida que a temperatura aumentou correspondendo a uma redução média de 19,68% aos 100 °C e 21,45% aos 200 °C seguido de um decréscimo de 19,73% aos 300 °C e 30,42% aos 400 °C.

**Figura 6.4:** Resistência à compressão das amostras de concreto

A resistência à compressão diminui com o acréscimo da temperatura devido aos diversos fatores citados no capítulo 3 como a desagregação da Portlandita, formação de microfissuras na zona de transição, além da perda de água que desidrata o concreto, reduzindo as forças coesivas entre as camadas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A partir dos dados obtidos na Tabela 6.3, percebeu-se que aos 400 °C a redução da resistência à compressão foi mais significativa. De acordo com Houry (2000), concretos compostos

de agregados siliciosos, como o do presente estudo, iniciam sua perda de resistência acima de 300 °C. Portanto, este fato pode justificar a redução mais expressiva aos 400 °C.

Tabela 6.3: Valores de resistência à compressão aos 300 dias para amostras 10x30 cm

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Resistência média (MPa)	35,06	28,16	27,54	28,14	24,40
Desvio padrão (MPa)	5,16	4,88	4,26	1,45	1,59
Coefficiente de variação (%)	14,73	17,32	15,45	5,17	6,53
Valor máximo (MPa)	41,86	34,59	32,31	30,48	26,09
Valor mínimo (MPa)	26,76	22,02	21,88	26,05	22,34
Percentual de redução em relação ao aquecimento (%)	-	19,68	21,45	19,73	30,42

Comparando o fator de redução da resistência à compressão do ensaio com o indicado pelo Eurocode 2 - Parte 1-2 (2004) e pela NBR 15200 (2004) tem-se um gráfico conforme apresentado na Figura 6.5.

Aos 100 °C e 200 °C os fatores de redução do ensaio foram mais significativos quando comparados aos valores da norma. Este fato pode ter ocorrido devido a falhas no momento da moldagem de algumas amostras, motivando o decréscimo da resistência de alguns corpos de prova de 100 °C e 200 °C, ocasionando também a aproximação dos fatores de redução dos dois grupos.

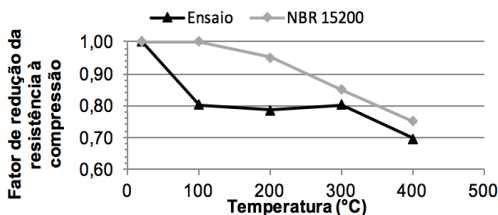


Figura 6.5: Fator de redução médio da resistência à compressão do concreto em função da temperatura

Por meio da ANOVA confirmou-se que os níveis de aquecimento apresentaram diferenças significativas na resistência à compressão do concreto. O teste de Tukey constatou que apenas a média da amostra sã apresentou diferença estatística significativa quando comparada a todas as

amostras aquecidas, sendo elas 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C.

6.4 ULTRASSOM

A seguir são apresentados os formatos dos pulsos ultrassônicos e os resultados obtidos a partir da análise de parâmetros associados à propagação da onda, sendo eles: velocidade de propagação de pulso ultrassônico, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia e energia acumulada.

6.4.1 Formato do pulso ultrassônico

As Figuras 6.6 a 6.9 apresentam os formatos dos pulsos ultrassônicos obtidos para os ganhos de 1x e 2x, respectivamente. Em ambos os ganhos adotados, o intervalo de tempo de 5 ms foi mais que suficiente para representar a parte mais significativa do sinal, possibilitando identificar a alteração no formato do pulso ultrassônico devido ao aumento da temperatura e, a partir da obtenção desses dados, analisaram-se os parâmetros associados à propagação da onda.

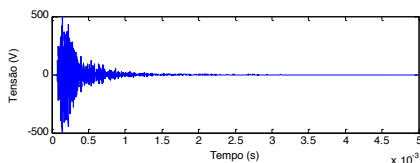
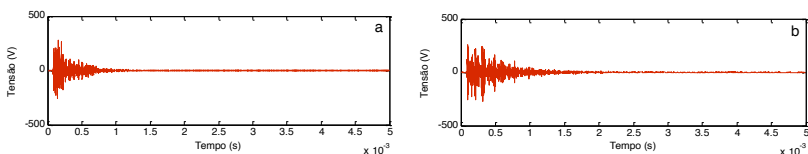


Figura 6.6: Formato do pulso ultrassônico da amostra de concreto sã para o ganho de 1x



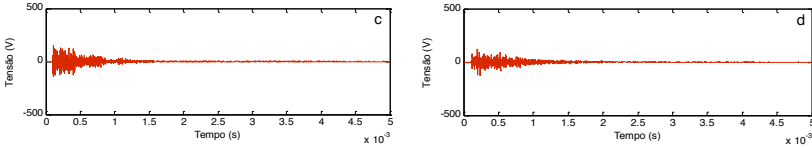


Figura 6.7: Formatos dos pulsos ultrassônicos das amostras de concreto aquecidas para o ganho de 1x a) 100 °C, b) 200 °C, c) 300 °C e d) 400 °C

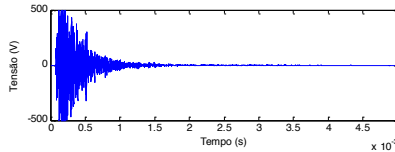


Figura 6.8: Formato do pulso ultrassônico da amostra de concreto sã para o ganho de 2x

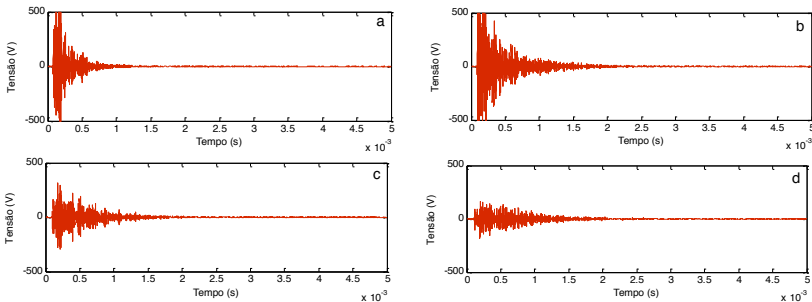


Figura 6.9: Formatos dos pulsos ultrassônicos das amostras de concreto aquecidas para o ganho de 2x a) 100 °C, b) 200 °C, c) 300 °C e d) 400 °C

6.4.2 Velocidade de propagação do pulso ultrassônico

As Figuras 6.10 e 6.11 ilustram as médias da velocidade de pulso ultrassônico das amostras para os ganhos de 1x e 2x respectivamente, os quais demonstraram um decréscimo devido ao aumento da temperatura.

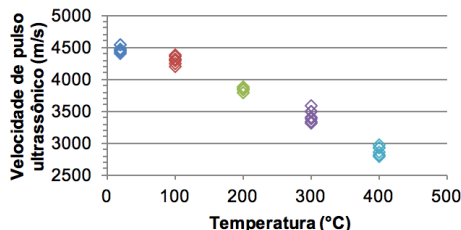


Figura 6.10: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico média das amostras de concreto para o ganho de 1x

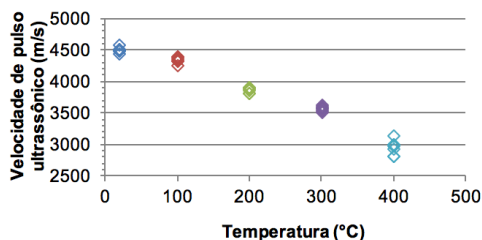


Figura 6.11: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Para ambos os ganhos, a nível inicial de temperatura não houve alteração significativa na velocidade, porém a partir de 200 °C o percentual de decréscimo apresentou maior relevância, correspondendo a 14,01 (ganho 1x) e 14,06 (ganho 2x), aos 300 °C, 23,16% (ganho 1x) e 20,64% (ganho de 2x) seguido de 35,68% (ganho 1x) e 34,27% (ganho 2x) aos 400 °C (Tabela 6.4 e 6.5). Estudos realizados por Handoo et al. (2002) também apontaram um comportamento similar na redução da velocidade de pulso, a qual se iniciou com 4,51 km/s aos 20 °C e aos 400 °C apresentou 3,04 km/s, ou seja, um decréscimo de 32,59%.

Tabela 6.4: Valores médios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Velocidade média de propagação de pulso ultrassônico (m/s)	4465	4301	3840	3431	2872
Desvio padrão (m/s)	47,57	76,12	38,94	97,54	72,94
Coefficiente de variação (%)	1,07	1,77	1,01	2,84	2,54
Valor máximo (m/s)	4566	4552	3953	3619	2994
Valor mínimo (m/s)	4405	4087	3576	3319	2780
Percentual de redução em relação ao aquecimento (%)	-	3,67	14,01	23,16	35,68

Tabela 6.5: Valores médios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Velocidade média de propagação de pulso ultrassônico (m/s)	4492	4336	3860	3565	2952
Desvio padrão (m/s)	40,82	46,96	43,05	40,46	112,83
Coefficiente de variação (%)	0,91	1,08	1,12	1,13	3,82
Valor máximo (m/s)	4587	4484	3979	3663	3178
Valor mínimo (m/s)	4425	4219	3769	3480	2806
Percentual de redução em relação ao aquecimento (%)	-	3,47	14,06	20,64	34,27

A redução da velocidade de pulso ocorreu, provavelmente, devida à evaporação das águas presentes no concreto, seguida do aumento dos poros, fatores estes que elevam a quantidade de ar presente no interior da amostra, além da desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o aumento das fissuras.

Como o ar apresenta velocidade de propagação inferior à pasta de cimento, o tempo que o pulso ultrassônico leva para percorrer a amostra é maior, conseqüentemente, a velocidade de propagação do pulso diminui.

Nas Figuras 6.12 e 6.13 são apresentados os fatores de redução médios da velocidade de pulso. Para ambos os ganhos as leituras apresentaram um fator de redução da velocidade muito similar, correspondendo a 0,96 e 0,97 aos 100 °C, 0,86 e 0,86 aos 200 °C, 0,77 e 0,79 aos 300 °C, 0,64 e 0,66 aos 400 °C para os ganhos de 1x e 2x, respectivamente.

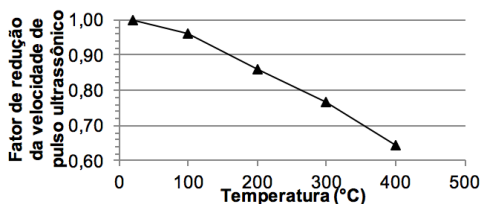


Figura 6.12: Fator de redução médio da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura para o ganho de 1x

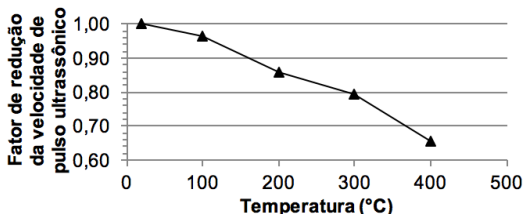


Figura 6.13: Fator de redução médio da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura para o ganho de 2x

Ao realizar a ANOVA foram identificadas diferenças significativas entre as médias da velocidade de pulso ultrassônico com relação aos diferentes níveis de temperatura para ambos os ganhos. O teste de Tukey apresentou diferença estatística significativa comparando as médias de todos os grupos dois a dois.

6.4.3 Velocidade de grupo

As velocidades de grupo médias das amostras, obtidas conforme a Equação 5.2, são apresentadas nas Figuras 6.14 e 6.15.

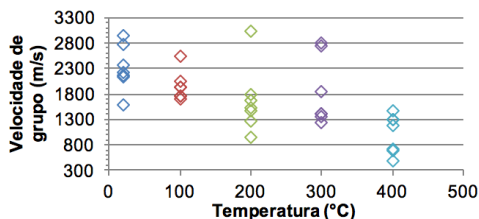


Figura 6.14: Velocidade de grupo média das amostras de concreto para o ganho de 1x

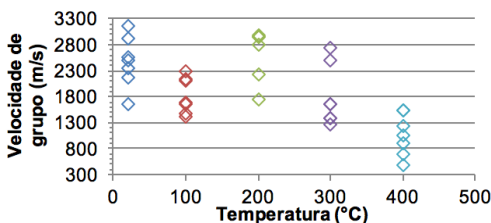


Figura 6.15: Velocidade de grupo média das amostras de concreto para o ganho de 2x

A média geral, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos, nas Tabelas 6.6 e 6.7.

Tabela 6.6: Valores médios de velocidade de grupo para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Velocidade de grupo média (m/s)	2313	1947	1670	1826	1012
Desvio padrão (m/s)	426,75	269,03	612,18	627,56	361,20
Coeficiente de variação (%)	18,45	13,82	36,65	34,36	35,68
Valor máximo (m/s)	2941	2532	3030	2804	1481
Valor mínimo (m/s)	1558	1515	955	1227	480
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aquecimento (%)	-	-15,82	-27,80	-21,05	-56,25

Tabela 6.7: Valores médios de velocidade de grupo para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Velocidade de grupo média (m/s)	2471	1823	2668	1798	1063
Desvio padrão (m/s)	483,28	393,09	457,61	589,41	378,49
Coeficiente de variação (%)	19,56	21,56	17,15	32,78	35,60
Valor máximo (m/s)	3158	2985	3030	2765	1535
Valor mínimo (m/s)	1644	1415	1685	1113	485
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aquecimento (%)	-	-26,22	+7,97	-27,24	-56,98

A velocidade de grupo foi um parâmetro que apresentou muita dispersão de dados para as amostras submetidas à mesma condição, o que acarretou em um desvio padrão muito alto.

As alterações nas amostras decorrentes do aquecimento fizeram com que o tempo registrado para a amplitude máxima da onda aumentasse, fazendo com que a velocidade de grupo diminuísse.

Aos 200 °C, apesar de ambos os ganhos apresentarem o mesmo valor máximo (3030 m/s), houve uma discrepância nos valores mínimos, visto que para o ganho de 1x a velocidade de grupo mínima foi de 955 m/s e de 1685 m/s para 2x, sendo este valor superior ao valor mínimo da amostra sã (1644 m/s). Aos 300 °C a velocidade de grupo mínima para o ganho de 1x superou os 200 °C, diferentemente do ganho de 2x.

Além disso, para o ganho de 2x houve truncamento da amplitude a temperatura ambiente, 100 °C e 200 °C, como pode ser observado na Figura 6.9 e 6.10. Portanto, considerando os dados obtidos, não foi possível identificar um comportamento definido para a velocidade de grupo (Figura 6.16 e 6.17).

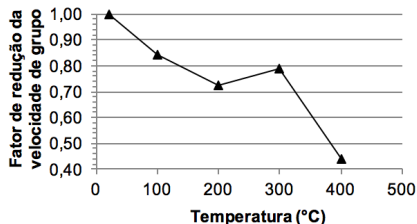


Figura 6.16: Fator de redução médio da velocidade de grupo em função da temperatura para o ganho de 1x

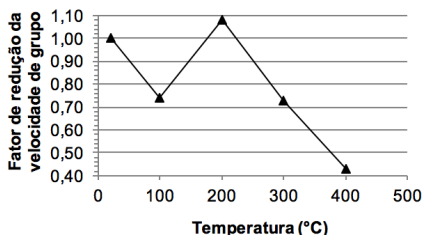


Figura 6.17: Fator de redução médio da velocidade de grupo em função da temperatura para o ganho de 2x

A partir da análise de variância (ANOVA) verificou-se que houve diferença significativa nas médias da velocidade de grupo com relação às temperaturas para ambos os ganhos. Já o teste de Tukey indicou que a diferença entre as médias não foi significativa entre 100 °C e 300 °C, 200 °C e 300 °C para o ganho de 1x e entre 100 °C e 300 °C para o ganho de 2x.

6.4.4 Amplitude máxima

As médias da amplitude máxima das amostras para os ganhos de 1x e 2x são apresentadas nas Figuras 6.18 e 6.19, respectivamente. Para o ganho de 1x aos 100 °C os valores de amplitude máxima decresceram enquanto que aos 200 °C houve um aumento seguido de um decréscimo cada vez mais significativo aos 300 °C e 400 °C. No entanto, para o ganho de 2x a temperatura ambiente, 100 °C e 200 °C a amplitude máxima se manteve a mesma devido ao truncamento, o qual pode ser observado na Figura 6.9 e 6.10.

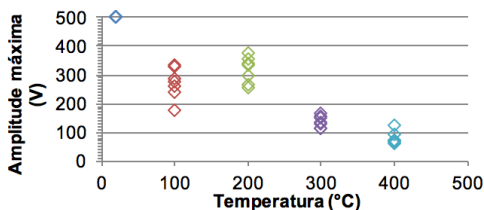


Figura 6.18: Amplitude máxima média das amostras de concreto para o ganho de 1x

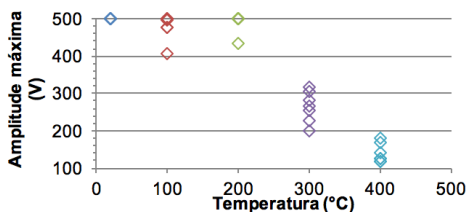


Figura 6.19: Amplitude máxima média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Nas Tabelas 6.8 e 6.9 são expostos os valores médios da amplitude máxima bem como o desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos.

Tabela 6.8: Valores médios de amplitude máxima para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Amplitude máxima média (V)	500,00	272,84	319,09	138,44	79,94
Desvio padrão (V)	0,00	50,89	42,14	18,55	20,56
Coefficiente de variação (%)	0,00	18,65	13,21	13,40	25,71
Valor máximo (V)	500,00	348,00	381,00	167,00	125,50
Valor mínimo (V)	500,00	172,00	248,50	112,00	58,00
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	45,43	36,18	72,31	84,01

Tabela 6.9: Valores médios de amplitude máxima para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Amplitude máxima média (V)	500,00	479,41	490,54	264,33	139,44
Desvio padrão (V)	0,00	32,28	22,90	39,00	23,64
Coefficiente de variação (%)	0,00	6,73	4,67	14,75	16,96
Valor máximo (V)	500,00	500,00	500,00	325,00	184,00
Valor mínimo (V)	500,00	397,00	429,00	195,00	111,50
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	4,12	1,89	47,13	72,11

Para ambos os ganhos o comportamento foi similar, uma vez que as amostras sãs apresentaram a amplitude máxima possível, ou seja, 500 V. No entanto, para as amostras aquecidas, o maior ganho indicou maiores amplitudes.

Consequentemente, o percentual de redução foi mais significativo para o ganho de 1x, o qual correspondeu a 45,43% (100 °C), 36,18% (200 °C), 72,31% (300 °C) e 84,01% (400 °C) contra 4,12% (100 °C), 1,89% (200 °C), 47,13% (300 °C) e 72,11% (400 °C) para o ganho de 2x.

As Figuras 6.20 e 6.21 ilustram os gráficos do fator de redução médio da amplitude máxima.

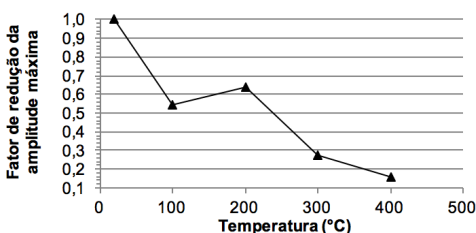


Figura 6.20: Fator de redução médio da amplitude máxima em função da temperatura para o ganho de 1x

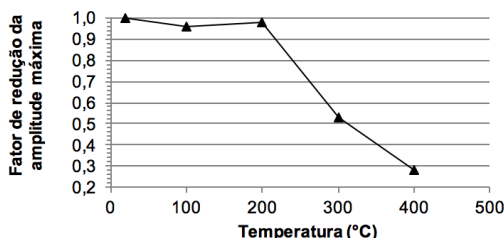


Figura 6.21: Fator de redução médio da amplitude máxima em função da temperatura para o ganho de 2x

O decréscimo da amplitude máxima pode ser justificado devido às alterações ocasionadas pelas altas temperaturas, o que contribuiu para a atenuação do sinal. No entanto, aos 200 °C, diferentemente dos outros níveis de temperatura, identificou-se um acréscimo da amplitude máxima, comportamento contrário ao esperado, pois justamente devido ao acréscimo da temperatura que ocasiona degradações cada vez mais

significativas, previa-se que os valores da amplitude tendessem a diminuir gradativamente.

Ao realizar a ANOVA confirmou-se que os níveis de aquecimento apresentaram diferenças significativas no parâmetro da amplitude máxima, sendo constatado, por meio do teste de Tukey, que houve diferença significativa comparando as médias de todos os grupos dois a dois.

6.4.5 Energia

O parâmetro da energia foi analisado para o ganho de 1x e 2x nas porcentagens correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100%. De um modo geral, ao comparar os ganhos, percebeu-se que o comportamento foi similar, havendo um decréscimo aos 100 °C, acréscimo aos 200 °C, seguido de um decréscimo aos 300 °C e 400 °C (Figura 6.22 e 6.23).

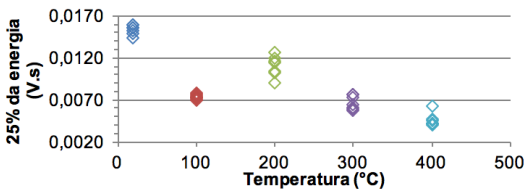


Figura 6.22: 25% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x

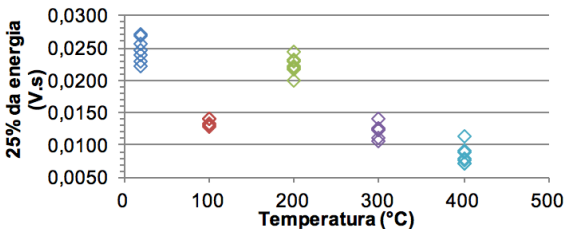


Figura 6.23: 25% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Os resultados médios para 25% da energia, bem como o desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos são apresentados na Tabela 6.10 e 6.11.

Tabela 6.10: Valores médios para 25% da energia para o ganho de 1x

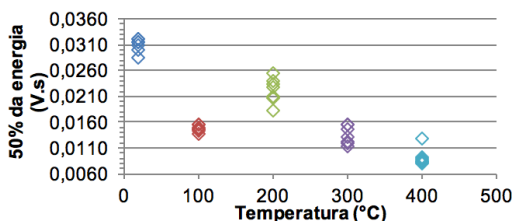
Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 25% da energia (V _s)	0,0154	0,0073	0,0110	0,0067	0,0046
Desvio padrão (V _s)	0,0006	0,0003	0,0011	0,0008	0,0008
Coefficiente de variação (%)	3,73	4,18	10,32	12,07	16,50
Valor máximo (V _s)	0,0161	0,0081	0,0127	0,0078	0,0064
Valor mínimo (V _s)	0,0142	0,0066	0,0089	0,0054	0,0039
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	52,31	28,28	56,42	70,29

Tabela 6.11: Valores médios para 25% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 25% da energia (V _s)	0,0248	0,0137	0,0223	0,0123	0,0085
Desvio padrão (V _s)	0,0018	0,0005	0,0013	0,0010	0,0014
Coefficiente de variação (%)	7,11	3,72	5,83	8,23	16,19
Valor máximo (V _s)	0,0275	0,0144	0,0250	0,0142	0,0114
Valor mínimo (V _s)	0,0218	0,0125	0,0197	0,0101	0,0066
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	44,82	9,80	50,51	65,86

A partir dos dados obtidos, percebeu-se que aos 100 °C a energia média diminuiu aproximadamente metade. No entanto, aos 200 °C esse valor praticamente dobrou, aproximando-se da energia média a temperatura ambiente. Em seguida, decaiu com o acréscimo da temperatura.

Para as porcentagens de 50%, 75% e 100% da energia o comportamento foi similar, como pode ser visto a seguir.

**Figura 6.24:** 50% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x

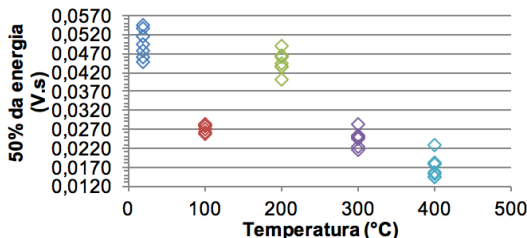


Figura 6.25: 50% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Tabela 6.12: Valores médios para 50% da energia para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 50% da energia (V.s)	0,0309	0,0147	0,0222	0,0134	0,0092
Desvio padrão (V.s)	0,0012	0,0006	0,0022	0,0016	0,0015
Coefficiente de variação (%)	3,87	4,16	10,10	12,12	16,42
Valor máximo (V.s)	0,0324	0,0162	0,0254	0,0156	0,0128
Valor mínimo (V.s)	0,0284	0,0134	0,0180	0,0108	0,0079
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	52,36	28,34	56,55	70,39

Tabela 6.13: Valores médios para 50% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 50% da energia (V.s)	0,0497	0,0274	0,0447	0,0245	0,0169
Desvio padrão (V.s)	0,0036	0,0010	0,0026	0,0020	0,0028
Coefficiente de variação (%)	7,15	3,76	5,87	8,24	16,26
Valor máximo (V.s)	0,0550	0,0289	0,0501	0,0284	0,0230
Valor mínimo (V.s)	0,0437	0,0251	0,0394	0,0203	0,0132
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	44,81	9,96	50,60	65,91

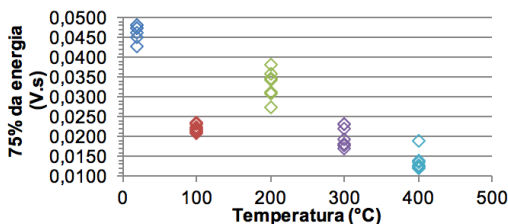


Figura 6.26: 75% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x

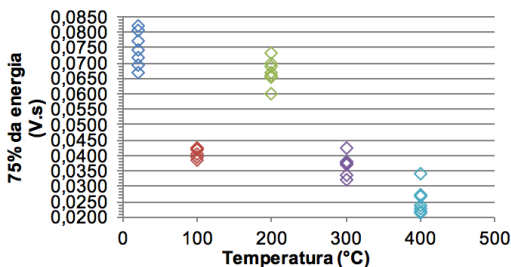


Figura 6.27: 75% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Tabela 6.14: Valores médios para 75% da energia para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 75% da energia (V.s)	0,0464	0,0221	0,0332	0,0202	0,0137
Desvio padrão (V.s)	0,0018	0,0009	0,0034	0,0024	0,0023
Coefficiente de variação (%)	3,88	4,18	10,11	12,12	16,42
Valor máximo (V.s)	0,0486	0,0243	0,0381	0,0233	0,0192
Valor mínimo (V.s)	0,0426	0,0201	0,0270	0,0163	0,0118
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	52,37	28,38	56,58	70,40

Tabela 6.15: Valores médios para 75% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 75% da energia (V.s)	0,0746	0,0411	0,0671	0,0368	0,0254
Desvio padrão (V.s)	0,0053	0,0015	0,0039	0,0030	0,0041
Coefficiente de variação (%)	7,13	3,75	5,86	8,25	16,26
Valor máximo (V.s)	0,0825	0,0434	0,0751	0,0425	0,0344
Valor mínimo (V.s)	0,0656	0,0377	0,0591	0,0304	0,0198
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	44,81	9,98	50,61	65,93

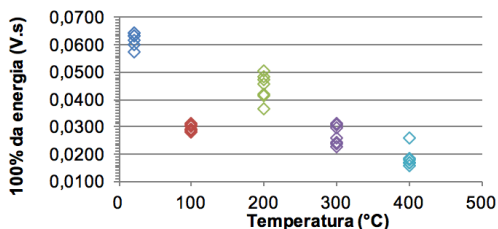


Figura 6.28: 100% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 1x

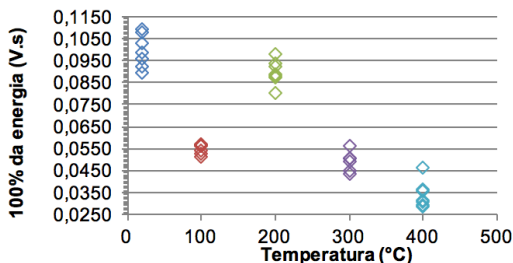


Figura 6.29: 100% da energia média das amostras de concreto para o ganho de 2x

Tabela 6.16: Valores médios para 100% da energia para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 100% da energia (V_{s})	0,0619	0,0296	0,0445	0,0269	0,0184
Desvio padrão (V_{s})	0,0024	0,0013	0,0045	0,0032	0,0031
Coefficiente de variação (%)	3,88	4,29	10,21	12,08	17,01
Valor máximo (V_{s})	0,0648	0,0337	0,0509	0,0311	0,0268
Valor mínimo (V_{s})	0,0569	0,0268	0,0361	0,0217	0,0158
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	52,25	28,12	56,59	70,28

Tabela 6.17: Valores médios para 100% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Média para 100% da energia (V_{s})	0,0995	0,0550	0,0897	0,0493	0,0342
Desvio padrão (V_{s})	0,0072	0,0022	0,0053	0,0040	0,0056
Coefficiente de variação (%)	7,19	3,92	5,90	8,11	16,41
Valor máximo (V_{s})	0,1110	0,0590	0,1014	0,0567	0,0472
Valor mínimo (V_{s})	0,0875	0,0502	0,0788	0,0405	0,0265
Percentual de redução em relação ao acréscimo da temperatura (%)	-	44,75	9,85	50,44	65,64

As Figuras 6.30 e 6.31 apresentam o fator de redução médio de 100% da energia para os ganhos de 1x e 2x.

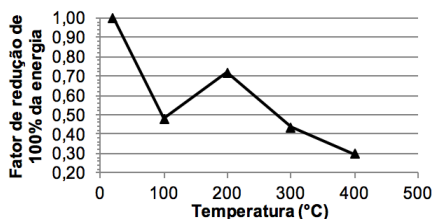


Figura 6.30: Fator de redução médio para 100% da energia em função da temperatura para o ganho de 1x

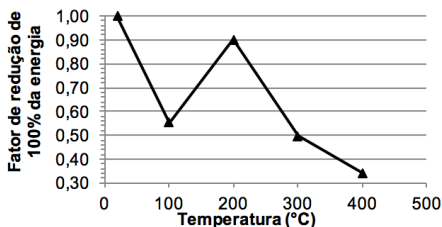


Figura 6.31: Fator de redução médio para 100% da energia em função da temperatura para o ganho de 2x

Aos 100 °C observou-se uma redução aproximada de 50%, seguida de uma recuperação aos 200 °C de cerca de 20% para o ganho de 1x e 30% para o ganho de 2x. Com o acréscimo da temperatura, aos 300 °C a energia decresceu mais 30% a 40% e aos 400 °C, comparando com a energia da amostra sã, houve uma redução de 70%.

Conforme observado, assim como a amplitude máxima, a energia também aumentou aos 200 °C. No estudo realizado por Yamada et al. (1989) utilizando concretos com relação água/cimento de 0,5, 0,6 e 0,7, aos 200 °C houve um acréscimo de energia para todas as amostras e de amplitude máxima apenas para a amostra com relação água/cimento de 0,7. No entanto, os autores não justificaram o motivo desse comportamento.

Na análise estatística a ANOVA indicou diferença significativa entre as médias da energia com relação à temperatura para ambas as porcentagens e ganhos. O teste de Tukey demonstrou que houve diferença significativa comparando as médias de todas as temperaturas duas a duas para todas as porcentagens e ganhos.

6.4.5.1 Tempo referente à porcentagem da energia

A seguir são apresentados os tempos referentes às porcentagens da energia média de 25%, 50% e 75%. De modo geral, quanto mais danificado o concreto, mais tempo levou para a energia se propagar. Apenas para o ganho de 2x a temperatura de 100 °C apresentou um tempo menor quando comparado à amostra sã.

Para o ganho de 1x, em todas as porcentagens, houve um acréscimo do tempo médio conforme a temperatura aumentou, não apresentando, aos 200 °C, o efeito observado para a amplitude máxima e energia (Figura 6.32).

Já no ganho de 2x, em todas as porcentagens, o tempo médio a temperatura ambiente e a 100 °C ficaram próximas, no entanto, aos 100 °C, o tempo foi inferior provavelmente devido ao truncamento ocorrido nesses níveis de temperatura, conforme observado na Figura 6.8 e 6.9 (Figura 6.33).

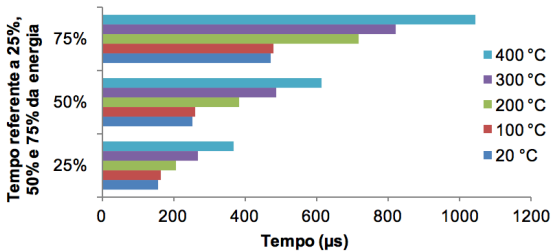


Figura 6.32: Tempo médio correspondente a 25%, 50% e 75% da energia para o ganho de 1x

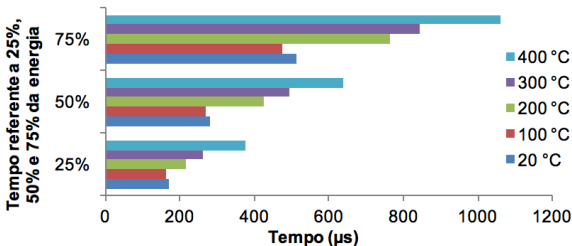


Figura 6.33: Tempo médio correspondente a 25%, 50% e 75% da energia para o ganho de 2x

Além disso, em ambos os ganhos 25% da energia, para a amostra sã, apresentou um tempo médio inferior a 200 µs enquanto que aos 400 °C este valor se aproximou de 400 µs. Para 50% da energia, a amostra sã correspondeu há um pouco mais que 200 µs e mais que 600 µs para o concreto aquecido a 400 °C. Já para 75% da energia da amostra sã o tempo médio foi cerca de 500 µs e em torno de 1100 µs aos 400 °C (Tabela 6.18 a 6.23).

Tabela 6.18: Tempo médio para 25% da energia para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 25% energia (s)	0,000158	0,000165	0,000206	0,000269	0,000368
Desvio padrão (s)	0,000012	0,000014	0,000018	0,000030	0,000038
Coefficiente de variação (%)	7,46	8,50	8,55	11,32	10,40
Valor máximo (s)	0,000169	0,000197	0,000237	0,000327	0,000435
Valor mínimo (s)	0,000136	0,000151	0,000185	0,000227	0,000325
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	+4,82	+30,90	+70,58	+133,40

Tabela 6.19: Tempo médio para 25% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 25% energia (s)	0,000171	0,000165	0,000218	0,000263	0,000375
Desvio padrão (s)	0,000012	0,000015	0,000023	0,000032	0,000031
Coefficiente de variação (%)	6,91	8,92	10,57	12,04	8,19
Valor máximo (s)	0,000193	0,000193	0,000264	0,000317	0,000422
Valor mínimo (s)	0,000155	0,000148	0,000190	0,000232	0,000330
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	-3,60	+27,36	+53,56	+119,59

Tabela 6.20: Tempo médio para 50% da energia para o ganho de 1x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 50% energia (s)	0,000253	0,000262	0,000384	0,000488	0,000615
Desvio padrão (s)	0,000020	0,000027	0,000033	0,000056	0,000054
Coefficiente de variação (%)	7,95	10,35	8,59	11,39	8,79
Valor máximo (s)	0,000291	0,000326	0,000435	0,000603	0,000721
Valor mínimo (s)	0,000230	0,000236	0,000329	0,000406	0,000524
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	+3,47	+51,60	+92,58	+142,80

Tabela 6.21: Tempo médio para 50% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 50% energia (s)	0,000283	0,000269	0,000425	0,000493	0,000637
Desvio padrão (s)	0,000024	0,000034	0,000040	0,000050	0,000039
Coefficiente de variação (%)	8,32	12,58	9,53	10,10	6,15
Valor máximo (s)	0,000333	0,000328	0,000464	0,000594	0,000698
Valor mínimo (s)	0,000245	0,000211	0,000354	0,000424	0,000574
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	-4,75	+50,25	+74,40	+125,28

Tabela 6.22: Tempo médio para 75% da energia para o ganho de 1x

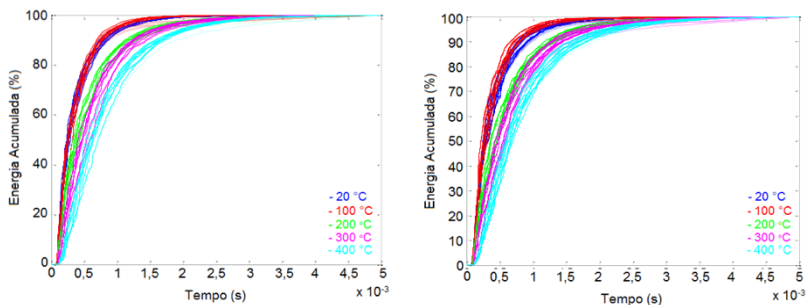
Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 75% energia (s)	0,000472	0,000479	0,000718	0,000820	0,001043
Desvio padrão (s)	0,000033	0,000027	0,000043	0,000063	0,000053
Coefficiente de variação (%)	7,09	5,68	5,94	7,68	5,06
Valor máximo (s)	0,000538	0,000549	0,000771	0,000921	0,001195
Valor mínimo (s)	0,000426	0,000431	0,000650	0,000747	0,000985
Percentual de redução/acréscimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	+1,41	+52,10	+73,55	+120,82

Tabela 6.23: Tempo médio para 75% da energia para o ganho de 2x

Temperatura (°C)	20	100	200	300	400
Tempo médio 75% energia (s)	0,000514	0,000474	0,000762	0,000843	0,001061
Desvio padrão (s)	0,000037	0,000040	0,000040	0,000064	0,000063
Coefficiente de variação (%)	7,18	8,35	5,29	7,56	5,93
Valor máximo (s)	0,000573	0,000530	0,000846	0,000958	0,001164
Valor mínimo (s)	0,000443	0,000390	0,000694	0,000767	0,000938
Percentual de redução/acrécimo em relação ao aumento da temperatura (%)	-	-7,74	+48,34	+64,16	+106,61

Ao realizar a ANOVA verificaram-se diferenças significativas entre as médias do tempo com relação à temperatura para ambas as porcentagens e ganhos. Ao aplicar o teste de Tukey constatou-se que nas comparações das médias duas a duas, não houve diferença significativa entre 20 °C e 100 °C para 25%, 50% e 75% do tempo para o ganho de 1x e 25% para o ganho de 2x. Já 50% e 75% do tempo para o ganho de 2x apresentaram diferenças significativas ao comparar todos os grupos de temperatura dois a dois.

Na Figura 6.34 tem-se a energia acumulada para os ganhos de 1x e 2x. Com o aumento da temperatura pode-se observar que, para a mesma porcentagem de energia, o tempo também aumenta, além da conseqüente diminuição na inclinação da curva de energia acumulada, com exceção da curva de 100 °C, a qual apresentou um comportamento muito similar a de 20 °C, principalmente para o ganho de 1x.

**Figura 6.34:** Energia acumulada para o ganho de 1x e 2x respectivamente

Portanto, a partir da análise dos parâmetros ultrassônicos, observou-se que a velocidade de pulso começou a apresentar alterações mais expressivas de 200 °C em diante. Já a

velocidade de pulso não demonstrou um comportamento definido, provavelmente devido ao truncamento das amplitudes em alguns níveis de temperatura.

A amplitude máxima e a energia apresentaram alterações significativas, ficando evidente os acréscimos ocorridos aos 200 °C, os quais podem ter ocorrido, provavelmente, devido a potencialidade desses parâmetros em detectar, no material, alguma alteração específica.

O parâmetro do tempo, no geral, aumentou devido ao acréscimo da temperatura, uma vez que esse comportamento ficou mais evidente para o ganho de 1x em virtude da inexistência de truncamento em todos os níveis de temperatura.

6.5 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS

A fim de compreender melhor o comportamento dos parâmetros ultrassônicos, principalmente a amplitude máxima e a energia, optou-se por analisar as alterações microestruturais do concreto nos diferentes níveis de temperatura. Portanto, a seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e suas análises.

6.5.1 Microscopia eletrônica de varredura

A partir do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível obter imagens das amostras de concreto submetidas a diferentes níveis de aquecimento. Na Figura 6.35 tem-se a amostra sã, a qual apresentou uma superfície bem preenchida. No entanto, com o acréscimo da temperatura, ocorreram alterações conforme observado nas imagens seguintes.

Aos 100 °C verificou-se a presença de fissuras e alguns vazios na amostra (Figura 6.36). Aos 200 °C, além das fissuras, foi possível perceber a rugosidade (Figura 6.37). Já aos 300 °C, atentou-se as fissuras e vazios (Figura 6.38), enquanto que aos 400 °C foi possível observar a rugosidade da superfície (Figura 6.39).

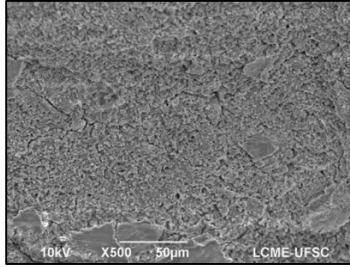


Figura 6.35: Concreto à 20 °C (x500)

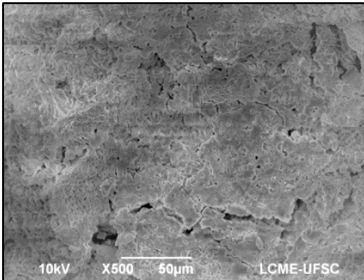


Figura 6.36: Concreto à 100 °C (x500)

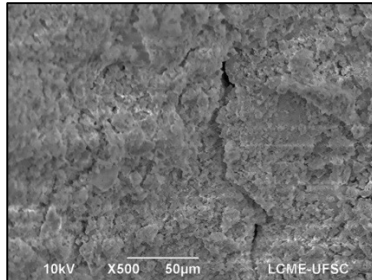


Figura 6.37: Concreto à 200 °C (x500)

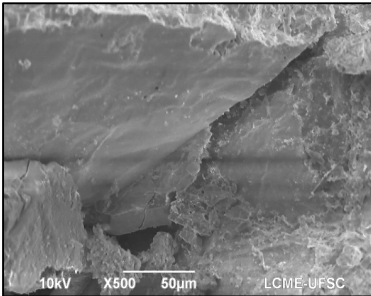


Figura 6.38: Concreto à 300 °C (x500)

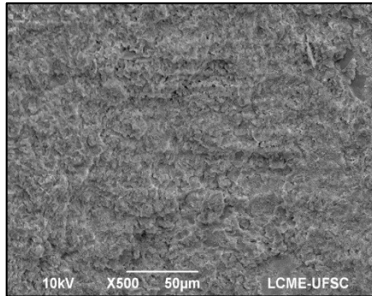


Figura 6.39: Concreto à 400 °C (x500)

As Figuras 6.40, 6.41 e 6.42 também retratam a rugosidade da superfície, porém a uma aproximação maior da amostra.

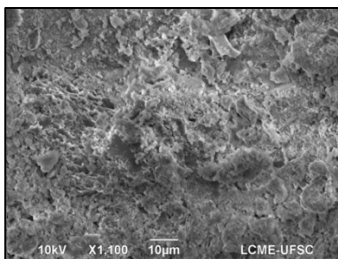


Figura 6.40: Concreto à 200 °C (x1100)

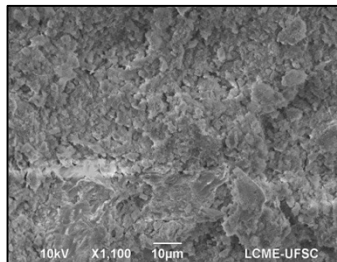


Figura 6.41: Concreto à 300 °C (x1100)

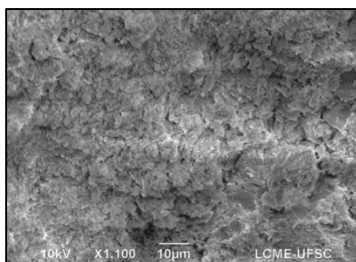
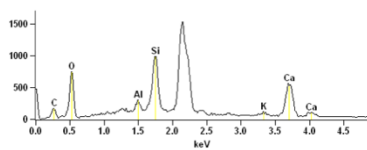
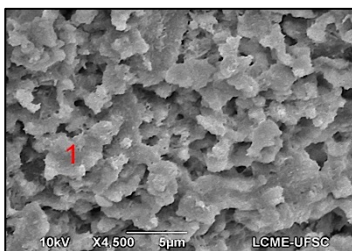


Figura 6.42: Concreto à 400 °C (x1100)

A partir do ensaio de EDS foi possível identificar os elementos químicos presentes nas amostras, uma vez que todas apresentaram cálcio (Ca), oxigênio (O), alumínio (Al), silício (Si) e carbono (C), porém em proporções diferentes.

Na amostra sã verificou-se também a presença de potássio, no entanto os compostos predominantes foram oxigênio, cálcio, silício e carbono (Figura 6.43). Aos 100 °C destacou-se a presença de oxigênio, silício, alumínio e cálcio, além do carbono e sódio em menores quantidades (Figura 6.44).



Elementos químicos (%) – 1

C	O	Al	Si	K	Ca
15,01	33,02	1,66	16,09	1,92	32,30

Figura 6.43: Concreto à 20 °C (x4500) e os elementos químicos presentes

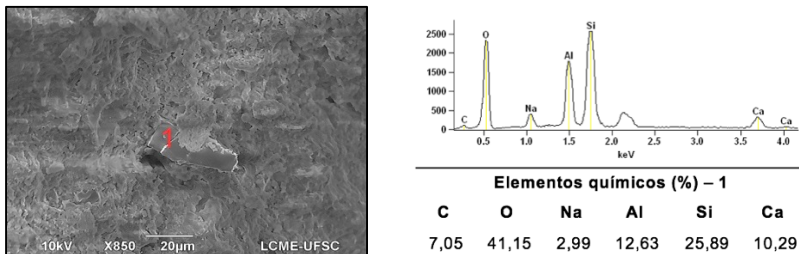


Figura 6.44: Concreto à 100 °C (x850) e elementos químicos presentes

Aos 200 °C, de modo geral, observou-se oxigênio e cálcio em todos os pontos, além do carbono, silício e alumínio. Apenas no ponto 2 verificou-se potássio (Figura 6.45 e 6.46). Levando em consideração o comportamento dos compostos presentes no concreto apresentado por Castellote et al. (2003), aos 200 °C há um acréscimo de calcita (CaCO_3), a qual pode ter sido responsável pela expressiva porcentagem dos elementos químicos anteriormente citados.

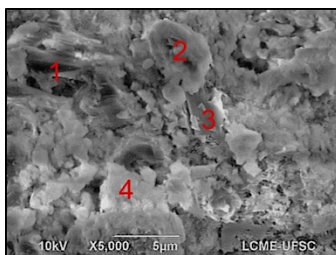
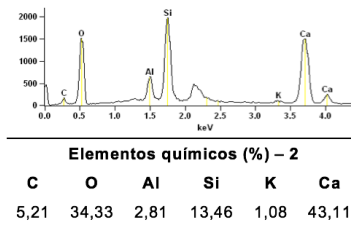
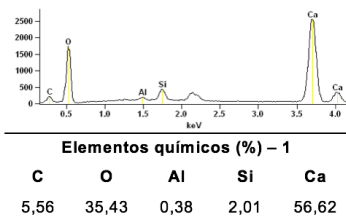


Figura 6.45: Concreto à 200 °C (x5000)



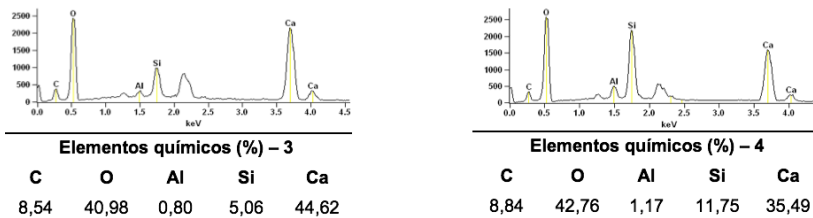


Figura 6.46: Elementos químicos presentes no concreto à 200 °C

Para a amostra aquecida a 300 °C o EDS detectou a presença de cálcio, oxigênio e silício, além do carbono e traços de nitrogênio e alumínio como pode ser notado no espectro da Figura 6.47.

Aos 400 °C destacou-se também os elementos oxigênio, cálcio e silício, seguido do carbono e traços de alumínio, conforme apresentado no espectro da Figura 6.48.

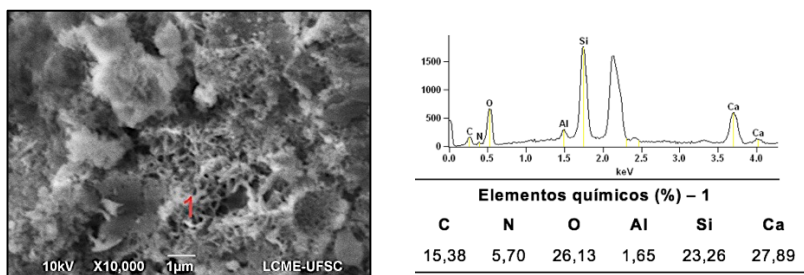


Figura 6.47: Concreto à 300 °C (x10000) e os elementos químicos presentes

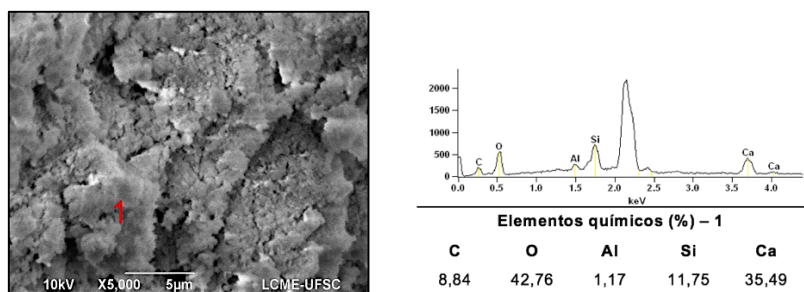


Figura 6.48: Concreto à 400 °C (x5000) e os elementos químicos presentes

6.5.2 Difração de raios X

Na presente pesquisa realizou-se apenas a análise por difração de raios X qualitativa, ou seja, com o objetivo de identificar e comparar os picos cristalinos das amostras expostas a diferentes níveis de temperatura.

Assim como na pesquisa de Lima et al. (2005), as maiores fases cristalinas identificadas a temperatura ambiente foram: etringita, larnita, portlandita, óxido de cálcio e calcita, cujos comportamentos em função do aquecimento, relatados por Castellote et al. (2003), foram apresentados no capítulo 3.

A Figura 6.49 ilustra o difratograma com a identificação dos compostos químicos presentes em cada nível de temperatura.

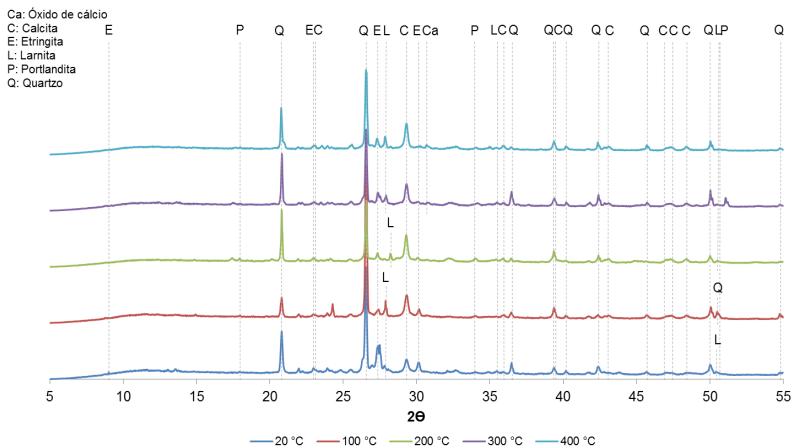


Figura 6.49: Difratograma de raios X após aquecimento a diferentes níveis de temperatura

Foram identificados picos intensos de quartzo nas amostras de concreto em pó, devido à presença de partículas de areia passantes na peneira de abertura 0,15mm.

A etringita apresentou picos mais intensos à temperatura ambiente e esse comportamento é mais evidente para o ângulo 2θ de $30,15^\circ$. De acordo com Castellote et al. (2003), a etringita se decompõe aos 100°C , no entanto, este composto foi identificado a temperaturas superiores, indicando, de acordo com

Lima (2005), possivelmente, um processo de reidratação do concreto após o aquecimento devido a sua exposição a umidade do ambiente.

Observou-se a presença de Iarnita (Ca_2SiO_4) em todos os níveis de temperatura. Os picos de maiores intensidades corresponderam à temperatura de 20 °C ou 100 °C, conforme indicado por Castellote et al. (2003). Já os picos de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), em geral, foram constantes mesmo com o acréscimo da temperatura.

Segundo Castellote et al. (2003), o óxido de cálcio (CaO) está presente a partir dos 500 °C, porém, verificou-se sua presença aos 300 °C e 400 °C. Este fato ocorreu, possivelmente, devido à desidratação do gel de C-S-H que se inicia aos 100 °C e termina aos 400 °C, acarretando na formação do CaO .

A Calcita (CaCO_3) esteve presente em todos os níveis de temperatura, no entanto, comparando as amostras, identificou-se que as aquecidas apresentaram picos de maior intensidade, uma vez que esse comportamento é mais evidente para o ângulo 2θ de 29,32°.

Portanto, a partir dos ensaios de microestrutura, verificou-se que os compostos observados na presente pesquisa e seus comportamentos foram muito similares aos identificados por Castellote et al. (2003) e Lima (2005). No entanto, não foi possível precisar o motivo do acréscimo da amplitude e da energia aos 200 °C

7 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve por objetivo avaliar a influência das altas temperaturas no concreto, utilizando o método do ultrassom, por meio da análise de parâmetros associados à propagação de onda. Para tanto, primeiramente, foram moldados corpos de prova de 10x30 cm, os quais foram aquecidos a temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C e 400 °C.

Após, estudou-se as alterações macroestruturais mediante a análise da cor, perda de massa, resistência à compressão e parâmetros do ultrassom como a velocidade de propagação de pulso ultrassônico, velocidade de grupo, amplitude máxima, energia e energia acumulada. Em seguida, as alterações microestruturais por meio dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X.

A partir da análise dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- O acréscimo da temperatura altera permanentemente a coloração do concreto;
- A perda de massa é mais evidente em temperaturas mais elevadas devido à completa evaporação dos diversos tipos de águas presentes no interior do concreto. Para as amostras analisadas, a maior perda de massa foi em torno de 7% aos 400 °C;
- A resistência à compressão diminui com o acréscimo da temperatura, no entanto, este decréscimo se tornou mais evidente aos 400 °C com a perda de cerca de 30% da resistência;
- Os parâmetros do ultrassom foram sensíveis à detecção dos danos presentes no concreto, pois apresentaram alterações em virtude do aquecimento;
- A velocidade de pulso ultrassônico demonstrou ser um bom parâmetro para a realização da verificação dos danos

no concreto quando aquecido, pois apresentou alterações conforme a temperatura aumentou;

- A velocidade de grupo foi o parâmetro do ultrassom que menos correspondeu à detecção das alterações por não apresentar um comportamento definido devido ao truncamento das amplitudes em algumas temperaturas;
- A amplitude e a energia apresentaram potencial na detecção das alterações devido ao aquecimento, no entanto não foi possível precisar o motivo do acréscimo aos 200 °C;
- O tempo demonstrou ser um bom parâmetro para verificação do comportamento do concreto após aquecido, pois, assim como a velocidade de pulso ultrassônico, possibilitou a verificação dos danos no concreto aquecido;
- O ganho de 1x apresentou dados mais confiáveis por não ocorrer truncamento em nenhum nível de temperatura.

Baseado nos resultados e conclusões obtidos neste estudo, apesar dos parâmetros alternativos do ultrassom apresentarem potencial na identificação de alterações ocorridas em casos de exposição a temperaturas elevadas, é importante se aprofundar no estudo desses parâmetros alternativos a fim de consolidar o comportamento observado, e, possibilitar a utilização na análise de estruturas submetidas à situação de incêndio.

Sugere-se abaixo, proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- Verificar o comportamento dos parâmetros do ultrassom em edificações submetidas à situação de incêndio real;
- Aprofundar o estudo da amplitude e energia aos 200 °C, afim de compreender melhor este comportamento;

- Estabelecer correlações entre a microestrutura e os parâmetros do ultrassom em concretos expostos a altas temperaturas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS, D. G.; SHIOTANI, T. Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitious material. **ACI Materials Journal**. v. 105. n. 2. 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R**: nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements**. ACI 216R-89. ACI. New York, 1994.

NA DRADE, W. P. **Concretos**: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo: Pini, 1997.

ANUGONDA, P.; WIEHN, J. S.; TURNER, J. A. Diffusion of ultrasound in concrete. **Ultrasonics**. v. 39. p. 429-435. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. São Paulo, 2003.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. São Paulo, 1994.

_____. **NBR 7217**: agregados – determinação da composição granulométrica. São Paulo, 2003.

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

_____. **NBR 11578:** cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14432:** exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15200:** projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15200:** projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. São Paulo, 1998.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química – Questionando a vida moderna e o meio ambiente.** 5 ed. São Paulo: Bookman, 2012

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários - Relatividade, Oscilações, Ondas e Calor.** São Paulo: Bookman, 2013

BEHNIA, A.; CHAI, H. K.; SHIOTANI, T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission. **Construction and Building Materials.** v. 65. p. 282-302. 2014.

BRAILE, P. **Seismic wave demonstrations and animations.** Disponível em:
<<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>>. Acesso em: 25 de Fevereiro de 2015.

BRITEZ, C. **Avaliação de pilares de concreto armado de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas.** Construction Congress. São Paulo, 2013.

BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety.** Chichester: Jhon Wiley & Sons, 2002.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of concrete in structures.** 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2006. p 51-81.

CAICEDO, B.; VALLEJO, L.; MARTINEZ, A. Analysis of the abrasion and crushing of unsaturated sands using acoustic emission. **Deformation characteristics of geomaterials.** Amsterdam: IOS Press, 2011.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado.** São Paulo: PINI, 1988.

CARELLI, J. M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research.** v. 34. p. 1633-1644. 2004.

CASTIGLIONI, V. **Métodos de transmissão do calor.** 2011. Disponível em: <http://desafioseguero.blogspot.com.br/2011_03_01_archive.html>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

CORPO DE BOMBEIRO MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (CBMRJ). **Introdução à ciência do fogo: Analogias geométricas do fogo.** 2003. Disponível em:

<http://www.cbmerj.rj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=42:introducao-a-ciencia-do-fogo&catid=7:Informacoes-Tecnicas&Itemid=15>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; DE FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. Instituto Brasileiro do Concreto - 44° Congresso Brasileiro, 2002.

DÜĞENCI, O.; HAKTANIR, T.; ALTUN, F. Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**. v. 75. p. 82–88. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design**. Bruxelas, Bélgica. 2004.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Structural concrete: Textbook on behaviour, design and performance**. v. 5. Laussane, Switzerland. 2012.

FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

GEORGALLI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement & Concrete Composites**. v. 27. p. 255-259. 2005.

GONÇALVES, A. **Condução - convecção - radiação - deslocamento de corpos inflamados com imagem**. 2013. Disponível em: <http://goncalvesandreiiaipe.blogspot.com.br/2013/06/blog-post_3.html>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2015.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**. v. 61. n. 1. 2013.

HANDOO, S. K.; AGARWAL, S.; AGARWAL, S. K. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**. v. 32. p. 1009–1018. 2002.

HAUWAERT, A. V.; DELANNAY, F.; THIMUS, J. F. Cracking behavior of steel fiber reinforced concrete revealed by means of acoustic emission and ultrasonic wave propagation. **ACI Materials Journal**. v. 96. n. 3. 1999.

HAUWAERT, A. V.; THIMUS, J. F.; DELANNAY, F. Use of ultrasonics to follow crack growth. **Ultrasonics**, v. 36, p. 209–217, 1998.

HOFMANN, M. A. **Ensaio não destrutivo: Parâmetros de energia do sinal ultrassônico para detecção de danos no concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

HUANG, M. et al. Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research. **Journal of the minerals, metals & materials society**. 1998. Disponível em: <<http://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html>>. Acesso em: 24 de março de 2015.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidebook on non-destructive testing of concrete structures**. Vienna: IAEA, 2002.

JANOTKA, I.; NÜRNBERGEROVÁ, T. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. **Nuclear Engineering and Design**. v. 235. p. 2019-2032. 2005.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering Materials**, v. 2. n. 4. Abril, 2000b.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010. 237f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

KIZILKANAT, A. B.; YÜZER, N.; KABAY, N. Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**. v. 45. p. 157-161. 2013.

KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H. Attenuation of Ultrasonic Waves in Solids. **Ultrasonic Testing of Materials**. p. 107-118. 1977.

LANDIS, E. N.; BAILON, L. Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete. **Journal of Engineering Mechanics**. v. 128. p. 698-702. 2002.

LIMA, R. C. A. et al. Microstructural changes in high density concretes exposed to high temperatures. **REVISTA IBRACON**, vol 1, nº 1, p. 7-14, 2005.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Porto Alegre. Porto Alegre, 2005.

LINGARD, J.; HAMMER, T. A. **Fire resistance of structural lightweight aggregate concrete a literature survey with focus on spalling**. Disponível em: <<http://www.kunnskapsdugnad.no/ikbViewer/Content/739012/doc-21-5.pdf>>. Acesso em: 14 de março de 2016.

LINN HIGH THERM. **Industrial Furnaces**. Disponível em: <<http://www.linn-high-therm.de/industrial-furnaces.html>>. Acesso em: 19 de abril de 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto** - estrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MORENO JR, A. L.; DE SOUZA, A. A. A. Avaliação do tipo de agregado e da reidratação do concreto submetido a elevadas temperaturas. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, vol. 3, nº 4, p. 477-493, 2010. Disponível em <<http://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/viewFile/149/139>>. Acesso em: 02 de março de 2015.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. **Nondestructive testing of concrete**. 2. ed. Florida: CRC, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. Tradução de Salvador E. Giannusso. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, C. R.; MORENO JR., A. L. **Efeito do fogo nas estruturas de concreto reforçadas com FRP**. Anais do 51º congresso brasileiro do concreto. Curitiba, 2009.

PACHECO, J.; HELENE, P. **Controle da resistência do concreto: Boletim Técnico 09**. ALCONPAT, 2013, p. 3.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 1998, p. 1.

PHILLIPIDIS, T. P.; AGGELIS, D. G. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. **Ultrasonics**. v. 43. p. 584–595. 2005.

PROCEQ. Ultrasonic Pulse Velocity – Pundit Lab. Disponível em: <<http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment/concrete-testing/ultrasonic-pulse-velocity/pundit-lab.html>>. Acesso em: 14 de abril de 2015.

RILEM TC 129 MHT: **Test Methods for Mechanical properties of concrete at high temperatures**. Part 1-9. 2000.

RIOS, F. C. M. **Um estudo das propriedades mecânicas do concreto submetido a elevadas temperaturas para dar suporte ao gerenciamento de riscos de incêndio em edificações**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

ROBEYST, N; GROSSE, C. U.; BELLIE, N. D. Measuring the change in ultrasonic p-wave energy transmitted in fresh mortar with additives to monitor the setting. **Cement and Concrete Research**. v. 39. p. 868–875. 2009.

SAGAR, R. V.; PRASAD, B. K. R. An experimental study on acoustic emission energy as a quantitative measure of size independent specific fracture energy of concrete beams.

Construction and Building Materials. v. 25. p. 2349-2357. 2011.

SANTHANAM, M. Ultrasonic characterization of damage in concrete. **Tech Science Press.** v. 3, n. 2, p 111-125, 2010.

SCHNEIDER, U. Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions. **Fire and Materials.** p. 103-115. 1976.

SEITO, A. et al. **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto, 2008.

SHAH, A. A.; RIBAKOV, Y.; ZHANG, C. Efficiency and sensitivity of linear and non-linear ultrasonics to identifying micro and macro-scale defects in concrete. **Materials and Design.** v. 50. p. 905–916. 2013.

SHIOTANI, T.; AGGELIS, D. G Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. **Materials and Structures.** v. 42, p. 377-384, 2009.

SILVA, D. S. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio em concretos usados na construção civil na grande Florianópolis.** 2009. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SILVA, J. M. **Ondas e meios contínuos.** 1. ed. Porto: U Porto Editorial, 2013.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio.** 1997. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

SILVA, V. P. **Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**, São Paulo: Blucher, 2012.

SOUZA, R. G. **Processamento de Sinais de Ultrassom para Determinação da Direção de Laminação em Materiais Metálicos**. 2014. 91f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda, 2014.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo, 1998, p. 17.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção em aço**. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2003.

WASANTHA, P. L. P.; SHAO, S. S. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: Use of acoustic emission. **Ultrasonics**. v. 54. p. 217-226. 2014.

WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. 2006. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

YAMADA, K.; TSUCHIYA, H.; KOSAKA, Y. Quality evaluation of concrete exposed to high temperature by ultrasonic spectroscopy. **Journal of the Society of Materials Science**. v. 38. n. 431. p. 959 - 965. 1989.

APÊNDICE

Tabela 9.1: Resistência e massa das amostras

AMOSTRA	DIMENSÃO DA AMOSTRA (cm)	GRUPO (°C)	IDADE (dias)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	MASSA INICIAL (kg)	MASSA FINAL (kg)	PERDA DE MASSA (%)
CP01	10x20	20	28	28,29	3,615	-	-
CP02	10x20	20	28	31,34	3,630	-	-
CP03	10x20	20	28	30,65	3,640	-	-
CP04	10x20	20	28	33,73	3,590	-	-
CP05	10x20	20	28	36,65	3,630	-	-
CP06	10x20	20	28	27,61	3,690	-	-
CP07	10x30	20	28	29,76	5,155	-	-
CP08	10x30	20	28	29,32	5,145	-	-
CP09	10x30	20	28	29,03	5,120	-	-
CP10	10x30	20	28	27,49	5,160	-	-
CP11	10x30	20	28	29,64	5,135	-	-
CP12	10x30	20	28	26,79	5,090	-	-
CP13	10x20	20	63	34,75	3,585	-	-
CP14	10x20	20	63	35,80	3,560	-	-
CP15	10x20	20	63	38,51	3,585	-	-
CP16	10x20	20	63	37,98	3,605	-	-
CP17	10x20	20	63	36,94	3,600	-	-
CP18	10x20	20	63	32,34	3,640	-	-
CP19	10x30	20	63	32,74	5,170	-	-
CP20	10x30	20	63	32,74	5,145	-	-
CP21	10x30	20	63	32,13	5,170	-	-
CP22	10x30	20	63	31,65	5,115	-	-
CP23	10x30	20	63	28,72	5,155	-	-
CP24	10x30	20	63	26,27	5,200	-	-
CP25	10x30	20	300	30,84	5,060	-	-
CP26	10x30	20	300	34,96	5,140	-	-
CP27	10x30	20	300	33,82	5,120	-	-
CP28	10x30	20	300	26,76	5,155	-	-
CP29	10x30	20	300	38,09	5,140	-	-
CP30	10x30	20	300	41,86	5,145	-	-
CP31	10x30	20	300	39,09	5,100	-	-
CP32	10x30	100	300	31,76	5,155	5,100	1,067
CP33	10x30	100	300	26,10	5,105	5,055	0,979
CP34	10x30	100	300	22,02	5,140	5,090	0,973
CP35	10x30	100	300	22,21	5,075	5,020	1,084
CP36	10x30	100	300	31,33	5,145	5,090	1,069
CP37	10x30	100	300	34,59	5,135	5,085	0,974

CP38	10x30	100	300	29,14	5,185	5,130	1,061
CP39	10x30	200	300	31,68	5,120	4,800	6,250
CP40	10x30	200	300	24,28	5,130	4,825	5,945
CP41	10x30	200	300	23,72	5,195	4,890	5,871
CP42	10x30	200	300	21,88	5,155	4,840	6,111
CP43	10x30	200	300	28,01	5,120	4,805	6,152
CP44	10x30	200	300	32,31	5,115	4,810	5,963
CP45	10x30	200	300	30,89	5,170	4,860	5,996
CP46	10x30	300	300	30,48	5,145	4,785	6,997
CP47	10x30	300	300	28,27	5,185	4,825	6,943
CP48	10x30	300	300	29,30	5,185	4,820	7,040
CP49	10x30	300	300	26,05	5,205	4,835	7,109
CP50	10x30	300	300	27,84	5,125	4,770	6,927
CP51	10x30	300	300	26,96	5,145	4,775	7,191
CP52	10x30	300	300	28,12	5,155	4,795	6,984
CP53	10x30	400	300	25,60	5,175	4,815	6,957
CP54	10x30	400	300	24,86	5,200	4,825	7,212
CP55	10x30	400	300	22,34	5,160	4,800	6,977
CP56	10x30	400	300	26,09	5,105	4,740	7,150
CP57	10x30	400	300	22,50	5,175	4,795	7,343
CP58	10x30	400	300	25,86	5,130	4,750	7,407
CP59	10x30	400	300	23,54	5,175	4,805	7,150

Tabela 9.2: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	VELOCIDADE DE PULSO MÉDIA (m/s)	DESVIO PADRÃO (m/s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)			
CP25	20	4444,44	4431,31	4444,44	4444,44	4437,87	4444,44	4444,44	4437,87	4437,87	4424,78	4431,31	4437,87	4424,78	4477,61	4444,44	4424,78	4418,26	4444,44	4437,87	4457,65	4439,55	12,98	0,29			
CP26	20	4484,30	4477,61	4464,29	4464,29	4477,61	4477,61	4484,30	4477,61	4477,61	4470,94	4464,29	4470,94	4464,29	4464,29	4464,29	4464,29	4464,29	4470,94	4470,94	4477,61	4470,94	4471,95	6,94	0,16		
CP27	20	4437,87	4431,31	4431,31	4431,31	4424,78	4437,87	4431,31	4431,31	4431,31	4451,04	4431,31	4431,31	4431,31	4431,31	4424,78	4451,04	4431,31	4464,29	4444,44	4431,31	4435,59	4435,59	9,85	0,22		
CP28	20	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4411,76	4411,76	4405,29	4418,26	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4405,29	4411,76	4405,29	4405,29	4405,29	4406,91	3,57	0,08		
CP29	20	4524,89	4518,07	4511,28	4497,75	4504,50	4566,21	4504,50	4504,50	4566,21	4504,50	4566,21	4538,58	4538,58	4504,50	4538,58	4531,72	4566,21	4531,72	4531,72	4531,72	4531,72	4529,10	23,25	0,51		
CP30	20	4538,58	4497,75	4497,75	4538,58	4538,58	4538,58	4538,58	4538,58	4497,75	4538,58	4566,21	4566,21	4524,89	4504,50	4566,21	4566,21	4538,58	4497,75	4538,58	4538,58	4538,58	4533,55	23,58	0,52		
CP31	20	4431,31	4431,31	4431,31	4451,04	4451,04	4451,04	4451,04	4437,87	4437,87	4437,87	4451,04	4437,87	4444,44	4437,87	4431,31	4437,87	4437,87	4437,87	4444,44	4444,44	4444,44	4440,84	7,23	0,16		
CP32	100	4297,99	4273,50	4341,53	4291,85	4322,77	4341,53	4322,77	4304,16	4322,77	4316,55	4310,34	4322,77	4341,53	4316,55	4341,53	4322,77	4329,00	4322,77	4329,00	4341,53	4329,00	4320,66	18,24	0,42		
CP33	100	4322,77	4322,77	4310,34	4310,34	4310,34	4310,34	4310,34	4322,77	4310,34	4329,00	4329,00	4329,00	4322,77	4310,34	4329,00	4329,00	4329,00	4329,00	4329,00	4329,00	4329,00	4320,91	8,34	0,19		
CP34	100	4385,96	4385,96	4360,47	4385,96	4366,81	4366,81	4354,14	4354,14	4360,47	4354,14	4360,47	4373,18	4341,53	4360,47	4360,47	4552,35	4373,18	4385,96	4385,96	4385,96	4377,72	43,32	0,99			
CP35	100	4225,35	4231,31	4273,50	4249,29	4231,31	4231,31	4249,29	4273,50	4231,31	4219,41	4249,29	4231,31	4231,31	4231,31	4219,41	4249,29	4231,31	4237,29	4231,31	4231,31	4237,94	4237,94	15,10	0,36		
CP36	100	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	4087,19	11,70	0,24
CP37	100	4354,14	4335,26	4354,14	4354,14	4354,14	4366,81	4366,81	4354,14	4354,14	4366,81	4354,14	4366,81	4335,26	4354,14	4354,14	4335,26	4451,04	4385,96	4354,14	4354,14	4354,14	4359,64	24,44	0,56		
CP38	100	4285,71	4297,99	4297,99	4310,34	4285,71	4322,77	4291,85	4297,99	4285,71	4297,99	4297,99	4267,43	4285,71	4310,34	4297,99	4322,77	4297,99	4297,99	4285,71	4297,99	4285,71	4296,80	13,04	0,30		
CP39	200	3836,32	3851,09	3826,53	3826,53	3821,66	3901,17	3851,09	3826,53	3836,32	3811,94	3851,09	3901,17	3826,53	3826,53	3826,53	3851,09	3836,32	3836,32	3826,53	3826,53	3826,53	3839,99	23,63	0,62		
CP40	200	3866,04	3816,79	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3851,09	3875,97	3846,15	3926,70	3846,15	3875,97	3851,09	3865,98	3851,09	3851,09	3851,09	3926,70	3861,00	3851,09	3862,40	25,21	0,65			
CP41	200	3778,34	3787,88	3851,09	3787,88	3787,88	3778,34	3787,88	3802,28	3851,09	3778,34	3851,09	3778,34	3778,34	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3794,74	25,20	0,66		
CP42	200	3575,69	3778,34	3754,69	3787,88	3754,69	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3787,88	3772,35	72,37	1,92		
CP43	200	3875,97	3901,17	3880,98	3901,17	3875,97	3870,97	3901,17	3875,97	3901,17	3901,17	3870,97	3875,97	3901,17	3952,57	3901,17	3875,97	3880,98	3901,17	3886,01	3875,97	3890,38	19,19	0,49			
CP44	200	3866,04	3875,97	3851,09	3875,97	3875,97	3875,97	3875,97	3875,97	3851,09	3875,97	3851,09	3875,97	3846,15	3846,15	3856,04	3846,15	3826,53	3841,23	3846,15	3846,15	3851,09	3865,85	14,79	0,38		
CP45	200	3821,66	3851,09	3831,42	3821,66	3821,66	3851,09	3851,09	3821,66	3851,09	3851,09	3831,42	3831,42	3851,09	3851,09	3816,79	3821,66	3841,23	3851,09	3851,09	3826,53	3837,35	13,75	0,36			
CP46	300	3397,51	3397,51	3397,51	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3397,51	3397,51	3393,67	3397,51	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3393,67	3394,82	1,81	0,05		
CP47	300	3325,94	3325,94	3325,94	3337,04	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3322,26	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3322,26	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3325,94	3326,31	2,91	0,09		
CP48	300	3318,58	3488,37	3512,88	3504,67	3500,58	3512,88	3512,88	3500,58	3521,13	3512,88	3521,13	3500,58	3575,69	3504,67	3512,88	3500,58	3521,13	3521,13	3521,13	3500,58	3503,25	46,83	1,34			
CP49	300	3359,46	3355,70	3359,46	3562,95	3359,46	3359,46	3359,46	3354,50	3355,70	3359,46	3359,46	3359,46	3359,46	3355,70	3359,46	3355,70	3359,46	3355,70	3359,46	3359,46	3359,46	3388,01	73,01	0,15		
CP50	300	3322,26	3325,94	3325,94	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3318,58	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,26	3322,63	2,36	0,07		
CP51	300	3500,58	3484,32	3492,43	3500,58	3484,32	3500,58	3484,32	3480,28	3533,57	3480,28	3492,43	3492,43	3533,57	3533,57	3533,57	3533,57	3500,58	3533,57	3533,57	3533,57	3503,36	35,36	21,36	0,61		
CP52	300	3567,18	3575,69	3584,23	3575,69	3584,23	3567,18	3575,69	3575,69	3584,23	3567,18	3575,69	3575,69	3567,18	3575,69	3567,18	3575,69	3567,18	3575,69	3575,69	3567,18	3575,69	3575,69	3575,69	14,60	0,41	
CP53	400	2932,55	2932,55	2929,69	2932,55	2932,55	2929,69	2932,55	2929,69	2932,55	2932,55	2932,55	2932,55	2932,55	2932,55	2929,69	2929,69	2932,55	2929,69	2932,55	2932,55	2932,55	2931,55	1,40	0,05		
CP54	400	2859,67	2859,67	2859,67	2857,14	2859,67	2857,14	2857,14	2857,14	2859,67	2865,33	2857,14	2857,14	2849,00	2857,14	2857,14	2859,67	2857,14	2857,14	2857,14	2865,33	2866,33	2857,69	4,72	0,17		
CP55	400	2811,62	2811,62	2811,62	2801,12	2811,62	2801,12	2803,74	2803,74	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2803,74	2811,62	2811,62	2811,62	2811,62	2808,73	4,89	0,17		
CP56	400	2979,15	2979,15	2982,11	2982,11	2979,15	2979,15	2982,11	2982,11	2994,01	2982,11	2982,11	2979,15	2979,15	2994,01	2994,01	2979,15	2979,15	2979,15	2982,11	2982,11	2979,15	2982,71	5,42	0,18		
CP57	400	2832,86	2798,51	2806,36	2811,62	2801,12	2811,62	2798,51	2798,51	2798,51	2801,12	2806,36	2801,12	2811,62	2793,30	2806,36	2798,51	2811,62	2806,36	2811,62	2806,36	2805,60	8,55	0,30			
CP58	400	2944,06	2935,42	2938,30	2932,55	2935,42	2938,30	2938,30	2944,06	2932,55	2938,30	2938,30	2932,55	2932,55	2935,42	2944,06	2932,55	2949,85	2935,42	2938,30	2938,30	2937,30	2805,60	4,73	0,16		
CP59	400	2780,35	2782,93	2782,93	2782,93	2780,35	2782,93	2782,93	2782,93	2782,93	2780,35	2782,93	2782,93	2782,93	2782,93	2780,35	2782,93	2780,35	2782,93	2780,35	2782,93	2780,35	2782,16	1,21	0,04		

Tabela 9.3: Velocidade de propagação de pulso ultrassônico para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	VELOCIDADE DE PULSO MEDIA (m/s)	DESVIO PADRAO (m/s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)			
CP25	20	4477,61	4464,29	4470,94	4470,94	4457,65	4464,29	4470,94	4470,94	4464,29	4464,29	4470,94	4477,61	4477,61	4484,30	4497,75	4464,29	4484,30	4477,61	4484,30	4472,96	9,72	0,22			
CP26	20	4511,28	4504,50	4497,75	4497,75	4511,28	4497,75	4497,75	4531,72	4518,07	4497,75	4545,45	4477,61	4497,75	4491,02	4511,28	4497,75	4497,75	4511,28	4511,28	4503,89	16,58	0,37			
CP27	20	4464,29	4484,30	4431,31	4497,75	4470,94	4470,94	4484,30	4484,30	4484,30	4431,31	4484,30	4470,94	4484,30	4497,75	4484,30	4464,29	4497,75	4470,94	4484,30	4477,02	18,91	0,17			
CP28	20	4444,44	4431,31	4431,31	4437,87	4424,78	4451,04	4437,87	4437,87	4444,44	4437,87	4451,04	4437,87	4431,31	4431,31	4444,44	4444,44	4431,31	4431,31	4431,31	4436,90	7,76	0,12			
CP29	20	4573,17	4566,21	4573,17	4587,16	4573,17	4566,21	4566,21	4566,21	4566,21	4566,21	4566,21	4587,16	4566,21	4566,21	4569,27	4573,17	4566,21	4566,21	4566,21	4566,21	4573,17	4569,70	6,98	0,15	
CP30	20	4524,89	4497,75	4504,50	4504,50	4511,28	4524,89	4511,28	4511,28	4518,07	4524,89	4504,50	4518,07	4518,07	4524,89	4491,02	4524,89	4491,02	4497,75	4497,75	4510,29	11,69	0,26			
CP31	20	4477,61	4470,94	4464,29	4470,94	4464,29	4464,29	4464,29	4470,94	4464,29	4484,30	4470,94	4464,29	4470,94	4491,02	4470,94	4470,94	4464,29	4470,94	4464,29	4470,94	4464,29	4470,94	4464,29	7,15	0,16
CP32	100	4322,77	4341,53	4329,00	4484,30	4310,34	4316,55	4322,77	4310,34	4354,14	4291,85	4316,55	4310,34	4341,53	4341,53	4316,55	4310,34	4329,00	4341,53	4310,34	4334,36	40,85	0,94			
CP33	100	4366,81	4354,14	4360,47	4360,47	4354,14	4360,47	4347,83	4341,53	4354,14	4385,96	4347,83	4341,53	4360,47	4360,47	4347,83	4360,47	4341,53	4354,14	4347,83	4354,48	10,78	0,25			
CP34	100	4385,96	4341,53	4392,39	4379,56	4385,96	4373,18	4385,96	4405,29	4392,39	4405,29	4373,18	4385,96	4373,18	4366,81	4373,18	4392,39	4373,18	4366,81	4392,39	4380,89	14,74	0,34			
CP35	100	4237,29	4249,29	4304,16	4237,29	4267,43	4249,29	4261,36	4219,41	4249,29	4261,36	4243,28	4279,60	4261,36	4261,36	4243,28	4249,29	4267,43	4243,28	4249,29	4254,79	17,77	0,42			
CP36	100	4322,77	4341,53	4322,77	4322,77	4329,00	4322,77	4322,77	4322,77	4322,77	4316,55	4322,77	4329,00	4329,00	4322,77	4329,00	4297,99	4316,55	4304,16	4354,14	4322,77	4329,00	4323,73	11,67	0,27	
CP37	100	4398,83	4347,83	4354,14	4341,53	4373,18	4398,83	4484,30	4373,18	4366,81	4385,96	4418,26	4385,96	4398,83	4398,83	4398,83	4398,83	4335,26	4385,96	4385,96	4385,96	4385,96	4385,96	4385,96	32,09	0,73
CP38	100	4304,16	4304,16	4304,16	4316,55	4322,77	4322,77	4304,16	4329,00	4322,77	4316,55	4304,16	4322,77	4310,34	4322,77	4304,16	4329,00	4329,00	4329,00	4329,00	4322,77	4316,26	10,17	0,24		
CP39	200	3851,09	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3861,00	3836,32	3846,15	3875,97	3875,97	3875,97	3861,00	3856,04	3861,00	3861,00	3926,70	3836,32	3875,97	3862,58	19,12	0,49	
CP40	200	3978,78	3891,05	3891,05	3875,97	3880,98	3870,97	3911,34	3911,34	3875,97	3870,97	3865,98	3880,98	3875,97	3891,05	3880,98	3865,98	3891,05	3891,05	3911,34	3889,44	25,30	0,65			
CP41	200	3792,67	3875,97	3811,94	3811,94	3811,94	3811,94	3792,67	3768,84	3773,58	3768,84	3792,67	3778,34	3773,58	3811,94	3792,67	3773,58	3792,67	3792,67	3792,67	3792,67	3796,65	24,37	0,64		
CP42	200	3802,28	3826,53	3802,28	3802,28	3792,67	3787,88	3875,97	3802,28	3787,88	3875,97	3826,53	3802,28	3802,28	3807,11	3875,97	3826,53	3792,67	3875,97	3802,28	3818,02	21,83	0,83			
CP43	200	3896,10	3886,01	3896,10	3911,34	3901,17	3901,17	3911,34	3911,34	3901,17	3901,17	3901,17	3901,17	3901,17	3901,17	3926,70	3901,17	3865,98	3926,70	3916,45	3896,10	3902,48	13,35	0,34		
CP44	200	3875,97	3901,17	3861,00	3861,00	3865,98	3861,00	3901,17	3875,97	3886,01	3861,00	3875,97	3875,97	3875,97	3875,97	3886,01	3865,98	3861,00	3865,98	3861,00	3872,26	12,90	0,33			
CP45	200	3952,57	3952,57	3846,15	3861,00	3886,01	3875,97	3865,98	3865,98	3861,00	3952,57	3846,15	3886,01	3846,15	3865,98	3886,01	3851,09	3861,00	3875,97	3865,98	3879,01	34,09	0,88			
CP46	300	3618,82	3618,82	3618,82	3605,77	3610,11	3663,00	3663,00	3627,57	3597,12	3605,77	3618,82	3618,82	3597,12	3618,82	3605,77	3605,77	3618,82	3605,77	3618,82	3605,77	3618,82	3618,82	3618,82	17,65	0,49
CP47	300	3554,50	3597,12	3546,10	3562,95	3597,12	3597,12	3597,12	3541,91	3562,95	3597,12	3562,95	3554,50	3597,12	3562,95	3554,50	3533,57	3554,50	3554,50	3533,57	3564,79	23,63	0,66			
CP48	300	3575,69	3521,13	3597,12	3533,57	3575,69	3533,57	3512,88	3533,57	3512,88	3575,69	3533,57	3508,77	3533,57	3525,26	3575,69	3508,77	3521,13	3575,69	3492,43	3539,01	29,44	0,83			
CP49	300	3562,95	3562,95	3567,18	3584,23	3618,82	3554,50	3562,95	3562,95	3575,69	3575,69	3575,69	3567,18	3562,95	3554,50	3575,69	3618,82	3575,69	3554,50	3618,82	3574,31	20,99	0,59			
CP50	300	3562,95	3575,69	3546,10	3554,50	3546,10	3512,88	3510,28	3575,69	3575,69	3546,10	3518,82	3562,95	3554,50	3541,91	3562,95	3554,50	3562,95	3554,50	3562,95	3551,37	29,37	0,83			
CP51	300	3512,88	3500,58	3500,58	3521,13	3500,58	3504,67	3504,67	3496,50	3492,43	3554,50	3554,50	3512,88	3554,50	3488,37	3512,88	3512,88	3488,37	3521,13	3492,43	3510,95	21,24	0,60			
CP52	300	3640,78	3562,95	3597,12	3571,43	3575,69	3597,12	3597,12	3597,12	3597,12	3597,12	3597,12	3597,12	3597,12	3575,69	3584,23	3597,12	3575,69	3597,12	3640,78	3554,46	22,64	0,63			
CP53	400	3134,80	3128,26	3128,26	3134,80	3134,80	3128,26	3121,75	3161,22	3128,26	3161,22	3134,80	3161,22	3177,97	3134,80	3161,22	3112,03	31128,26	3161,22	3141,13	18,06	0,57				
CP54	400	2862,60	3039,51	3080,08	3048,78	3039,51	3024,19	3080,08	3024,19	3039,51	2859,87	2859,87	2859,87	3039,51	3080,08	3039,51	3080,08	3054,99	3042,60	3064,35	3003,95	86,79	2,89			
CP55	400	2806,36	2808,99	2806,36	2808,99	2811,62	2814,26	2808,99	2808,99	2808,99	2808,99	2808,99	2808,99	2808,99	2808,99	2811,62	2814,26	2808,99	2808,99	2811,62	2811,62	2810,04	2,32	0,08		
CP56	400	2979,15	2976,19	2973,24	2973,24	2976,19	2976,19	2979,15	2979,15	2979,15	2979,15	2979,15	2976,19	2976,19	2973,24	2976,19	2973,24	2976,19	2976,19	2976,19	2976,19	2973,24	2976,04	2,03	0,07	
CP57	400	2816,90	2816,90	2816,90	2816,90	2814,26	2811,62	2814,26	2816,90	2814,26	2816,90	2816,90	2816,90	2816,90	2811,62	2816,90	2811,62	2816,90	2811,62	2814,26	2814,26	2816,90	2815,18	2,15	0,08	
CP58	400	2921,13	2921,13	2926,83	2921,13	2921,13	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2921,13	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2926,83	2,59	0,09
CP59	400	3018,11	2970,30	3018,11	3018,11	2994,01	2994,01	3018,11	2982,11	2988,05	3018,11	2988,05	3018,11	2997,00	2973,24	2979,15	2973,24	2958,58	3018,11	3018,11	2995,79	20,69	0,69			

Tabela 9.4: Velocidade de grupo para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)																					VELOCIDADE DE GRUPO MÉDIA (m/s)	DESVIO PADRÃO (m/s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
CP25	20	2510,46	2510,46	2510,46	2510,46	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2061,86	2510,46	2510,46	2510,46	2218,87	219,53	9,89
CP26	20	1558,44	1558,44	1558,44	1558,44	1558,44	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1587,30	1580,09	12,82	0,81
CP27	20	2068,97	2158,27	2158,27	2158,27	2068,97	2068,97	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2158,27	2140,41	36,65	1,71
CP28	20	2158,27	2166,06	2166,06	2166,06	2158,27	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2166,06	2164,51	3,20	0,15
CP29	20	2400,00	2090,59	2090,59	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2400,00	2369,06	95,23	4,02
CP30	20	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	2777,78	0,00	0,00
CP31	20	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2941,18	2939,74	4,42	0,15
CP32	100	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1967,21	1944,29	101,02	5,20
CP33	100	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	1699,72	0,00	0,00
CP34	100	1714,29	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1749,27	1747,52	7,82	0,45
CP35	100	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	1923,08	0,00	0,00
CP36	100	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	1744,19	0,00	0,00
CP37	100	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	2531,65	0,00	0,00
CP38	100	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	2040,82	0,00	0,00
CP39	200	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71	0,00	0,00
CP40	200	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	1515,15	0,00	0,00
CP41	200	1652,89	1652,89	1652,89	1652,89	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1680,67	1675,12	11,40	0,68
CP42	200	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	1463,41	0,00	0,00
CP43	200	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	955,41	0,00	0,00
CP44	200	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	3030,30	0,00	0,00
CP45	200	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	1265,82	0,00	0,00
CP46	300	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	1339,29	0,00	0,00
CP47	300	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	1226,99	0,00	0,00
CP48	300	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	1857,59	0,00	0,00
CP49	300	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	0,00	0,00
CP50	300	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1408,45	1,55	0,11
CP51	300	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	2739,73	0,00	0,00
CP52	300	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	0,00	0,00
CP53	400	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	1284,80	0,00	0,00
CP54	400	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1257,86	1165,12	190,29	16,33
CP55	400	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	711,74	0,00	0,00
CP56	400	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	1282,05	0,00	0,00
CP57	400	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	479,62	484,73	18,88	3,90
CP58	400	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	676,44	0,00	0,00
CP59	400	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	1481,48	0,00	0,00

Tabela 9.6: Amplitude máxima para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AMPLITUDE MÁXIMA MÉDIA (V)	DESVIO PADRÃO (V)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)			
CP25	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP26	20	497,50	491,50	493,00	491,50	488,00	491,50	498,50	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	497,58	3,98	0,80	
CP27	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP28	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP29	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP30	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP31	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP32	100	276,50	278,00	277,50	278,00	277,00	276,00	276,00	276,00	278,00	280,00	276,00	277,50	276,50	280,00	281,00	281,50	277,50	276,00	272,50	269,50	277,00	276,00	272,50	277,00	2,71	0,98
CP33	100	242,00	243,50	242,50	242,50	239,50	241,50	240,50	240,50	240,50	245,00	244,00	243,50	244,50	243,50	242,50	243,50	239,50	241,50	247,00	245,00	242,00	247,00	242,00	242,00	1,92	0,79
CP34	100	348,00	332,00	332,50	331,50	319,50	322,00	326,00	318,00	327,50	327,50	332,00	330,00	330,00	329,00	329,00	324,00	328,50	333,50	332,00	326,00	328,93	328,93	328,93	328,93	6,23	1,89
CP35	100	179,00	180,00	179,00	179,50	181,00	179,50	174,50	172,50	172,00	173,00	174,50	176,50	174,00	173,50	173,00	172,00	172,50	174,50	174,00	177,00	175,58	175,58	175,58	175,58	3,05	1,74
CP36	100	290,50	295,00	297,50	298,50	293,00	293,00	293,00	293,50	287,50	286,50	286,50	286,00	285,50	287,00	286,50	285,00	284,50	290,00	286,50	285,50	289,55	289,55	289,55	289,55	4,38	1,51
CP37	100	329,00	329,00	330,00	330,00	335,00	336,00	335,00	336,50	339,50	340,00	339,00	334,50	336,00	337,00	338,00	339,50	335,50	336,50	338,50	338,00	335,63	335,63	335,63	335,63	3,53	1,05
CP38	100	255,00	257,00	257,00	258,00	258,50	259,00	260,00	260,00	260,50	262,50	262,50	262,50	261,00	262,50	261,50	261,00	262,00	262,00	261,50	264,50	260,43	260,43	260,43	260,43	2,37	0,91
CP39	200	335,50	334,50	333,00	333,50	334,00	335,00	334,00	334,00	335,00	334,50	334,50	334,50	335,00	335,00	335,00	335,00	335,00	336,50	337,50	337,50	336,00	334,98	334,98	334,98	1,18	0,35
CP40	200	352,50	352,50	353,00	356,00	356,50	356,50	357,50	357,00	359,50	360,50	360,00	359,50	359,00	359,50	358,50	358,00	358,00	357,50	353,50	351,00	356,80	356,80	356,80	356,80	2,85	0,80
CP41	200	376,50	376,00	377,50	377,00	377,00	376,50	377,50	377,50	378,50	379,50	378,00	379,00	378,50	379,50	379,00	380,00	378,00	377,50	380,00	381,00	378,20	378,20	378,20	378,20	1,35	0,36
CP42	200	300,50	301,00	301,50	301,00	301,00	300,00	299,50	299,00	299,00	299,50	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,50	300,00	299,50	300,50	301,00	299,93	299,93	299,93	299,93	0,85	0,28
CP43	200	267,00	266,50	267,50	267,00	267,50	265,50	267,50	268,00	270,00	268,50	266,00	270,00	270,50	270,00	271,00	270,50	270,50	270,50	270,00	271,00	268,78	268,78	268,78	268,78	1,85	0,69
CP44	200	336,00	336,00	336,50	337,50	337,50	338,50	338,50	339,00	339,50	340,00	339,50	338,50	339,50	340,00	339,00	337,50	338,00	337,00	337,50	337,00	338,13	338,13	338,13	338,13	1,27	0,37
CP45	200	248,50	250,00	251,00	251,50	253,00	254,00	255,00	255,50	257,50	260,00	260,00	260,00	260,50	260,50	261,50	264,50	262,00	257,00	259,00	255,50	256,83	256,83	256,83	256,83	4,46	1,74
CP46	300	112,50	113,50	114,50	115,00	115,00	115,50	115,50	116,50	116,50	116,50	117,00	117,50	117,50	117,00	116,50	117,00	117,00	117,50	118,00	119,00	116,25	116,25	116,25	116,25	1,57	1,35
CP47	300	125,00	126,00	126,00	126,00	127,00	127,50	127,50	128,00	127,50	128,00	129,00	129,00	130,00	130,00	130,50	131,00	131,00	131,00	131,50	131,50	128,83	128,83	128,83	128,83	2,30	1,94
CP48	300	151,00	152,50	153,00	154,50	154,50	155,00	155,50	157,00	158,50	159,00	159,50	159,50	160,00	160,00	160,00	159,50	160,00	160,00	159,00	159,50	157,38	157,38	157,38	157,38	2,98	1,89
CP49	300	165,00	165,50	166,00	165,50	166,00	166,50	166,00	166,00	166,00	166,50	166,50	166,50	167,00	166,00	166,50	166,50	166,50	166,50	166,00	166,50	166,18	166,18	166,18	166,18	0,47	0,28
CP50	300	117,50	119,50	118,50	118,50	120,00	117,50	117,00	117,00	116,50	116,50	115,50	118,00	117,00	116,00	116,00	117,00	117,00	115,00	113,50	112,00	116,78	116,78	116,78	116,78	1,87	1,60
CP51	300	134,50	134,50	134,50	134,00	134,00	133,50	134,00	133,50	133,50	133,50	133,50	133,50	133,50	133,50	133,00	132,50	131,50	130,00	130,00	126,00	132,85	132,85	132,85	132,85	2,07	1,56
CP52	300	151,00	151,50	151,50	151,50	151,50	152,00	152,00	152,00	152,00	152,00	151,50	151,50	151,50	151,00	151,00	150,50	149,50	149,50	148,50	148,00	150,83	150,83	150,83	150,83	1,24	0,82
CP53	400	123,50	124,00	124,50	124,00	124,00	124,00	124,50	125,00	124,50	124,50	125,00	124,50	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	124,78	124,78	124,78	124,78	0,66	0,53
CP54	400	67,00	67,50	67,50	67,50	67,50	68,00	68,50	68,50	68,50	68,50	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	69,00	68,50	70,00	70,00	70,50	68,70	68,70	68,70	68,70	0,99	1,44
CP55	400	70,50	70,00	70,00	70,00	70,50	70,50	70,50	70,00	70,00	70,00	70,50	70,50	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,50	70,50	70,23	70,23	70,23	70,23	0,26	0,36
CP56	400	93,50	93,00	93,50	93,00	93,00	93,00	92,50	92,50	92,50	93,00	93,00	93,50	93,00	93,50	93,00	93,00	93,00	93,00	92,50	92,00	92,98	92,98	92,98	92,98	0,41	0,44
CP57	400	61,50	61,50	62,00	62,00	62,00	62,50	62,00	61,50	62,00	62,00	61,50	61,00	60,50	60,00	59,00	59,00	58,50	58,50	58,50	58,00	60,68	60,68	60,68	60,68	1,52	2,51
CP58	400	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	69,50	70,18	70,18	70,18	70,18	1,10	1,57
CP59	400	73,00	73,00	73,00	72,50	73,00	73,00	73,00	73,00	73,00	72,50	73,00	72,50	72,50	72,00	72,00	71,50	71,00	71,00	70,00	66,50	72,05	72,05	72,05	72,05	1,56	2,17

Tabela 9.7: Amplitude máxima para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	AMPLITUDE MÁXIMA MÉDIA (V)	DESVIO PADRÃO (V)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)				
CP25	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00			
CP26	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP27	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP28	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP29	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP30	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP31	20	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00		
CP32	100	496,50	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	496,50	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	496,50	495,50	490,50	490,50	494,00	497,35	2,77	0,56		
CP33	100	477,50	478,50	482,00	478,00	483,50	480,50	480,50	480,50	485,00	473,50	473,50	473,50	476,00	478,00	474,00	476,50	478,00	478,50	477,00	478,00	478,00	478,00	478,00	478,20	3,09	0,65	
CP34	100	500,00	499,00	499,00	488,50	490,50	466,00	456,00	461,00	458,50	459,50	457,50	458,50	464,00	469,00	475,50	486,00	477,50	483,00	483,00	482,00	482,00	482,00	482,00	475,70	15,18	3,19	
CP35	100	397,00	400,00	400,50	401,00	400,00	398,50	403,50	403,50	404,00	411,50	411,00	412,50	410,50	411,50	412,50	410,00	409,50	408,00	406,50	407,00	407,00	407,00	407,00	405,93	5,15	1,27	
CP36	100	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	495,50	499,78	1,01	0,20	
CP37	100	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00	
CP38	100	478,50	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	4980,93	4,81	0,96	
CP39	200	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP40	200	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP41	200	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP42	200	429,00	430,00	430,00	433,50	434,00	434,50	434,00	431,50	432,50	433,00	433,00	432,50	435,00	433,50	436,50	438,50	441,00	440,00	440,00	443,50	443,50	443,50	443,50	434,78	3,96	0,91	
CP43	200	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP44	200	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	0,00	0,00
CP45	200	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	499,00	0,00	0,00
CP46	300	287,00	292,50	297,00	292,50	298,00	297,00	298,50	299,00	298,50	298,50	301,50	304,00	302,00	306,00	311,00	313,00	315,00	320,00	322,50	317,50	317,50	317,50	317,50	303,55	9,85	3,25	
CP47	300	261,50	263,50	263,50	268,00	267,00	270,50	270,50	269,50	271,50	273,50	271,50	274,50	273,50	273,00	271,00	267,50	264,50	261,50	256,50	256,50	256,50	256,50	256,50	268,15	4,88	1,82	
CP48	300	224,50	222,50	223,50	224,50	226,50	227,50	229,00	230,00	230,50	230,00	231,00	230,00	230,00	230,00	230,00	228,00	226,50	222,00	217,00	217,00	217,00	217,00	217,00	226,50	4,31	1,90	
CP49	300	313,50	312,50	314,50	314,50	316,00	316,00	314,50	314,50	316,00	317,00	315,00	318,00	319,00	320,00	321,50	321,50	322,00	325,00	320,00	317,00	317,00	317,00	317,00	317,45	3,37	1,06	
CP50	300	197,50	197,00	197,50	197,00	198,50	199,50	201,00	201,00	201,50	201,00	200,00	201,00	200,50	201,50	201,00	200,00	200,50	199,00	196,00	195,00	195,00	195,00	199,30	1,99	1,00		
CP51	300	256,00	257,00	256,00	256,50	256,00	258,50	259,50	259,50	258,50	257,00	257,50	254,50	256,50	254,00	253,00	251,00	250,00	252,00	252,00	251,00	251,00	251,00	255,20	2,92	1,14		
CP52	300	290,00	289,50	289,00	287,00	284,50	283,00	284,00	283,00	281,50	281,00	282,00	280,00	279,50	277,50	278,50	276,00	274,00	271,00	264,00	268,00	268,00	268,00	268,00	280,15	6,97	2,49	
CP53	400	175,50	177,50	178,00	179,00	179,00	179,50	180,00	180,00	180,00	181,00	181,50	181,50	181,50	183,00	183,00	184,00	183,50	183,50	182,00	182,00	182,00	182,00	180,63	2,24	1,24		
CP54	400	138,00	134,50	135,50	136,00	134,00	134,50	135,50	135,50	135,50	137,50	139,50	140,50	142,50	147,00	148,00	150,50	151,50	153,00	153,00	153,00	153,00	153,00	153,00	141,65	7,36	5,20	
CP55	400	122,50	122,50	122,50	122,00	123,00	122,00	122,50	122,00	121,50	123,50	124,00	125,00	125,50	126,50	128,00	130,50	131,00	131,00	130,00	122,50	122,50	122,50	122,50	124,90	3,37	2,70	
CP56	400	166,00	166,50	166,00	166,50	165,50	167,00	166,50	166,50	166,00	165,00	166,00	166,00	166,00	166,50	164,50	164,50	169,00	168,50	170,00	171,00	170,00	171,50	167,15	2,10	1,26		
CP57	400	111,50	113,00	115,00	115,00	116,00	116,00	118,50	118,00	118,00	117,50	118,50	118,50	119,00	117,50	117,50	119,50	116,50	118,00	117,00	119,00	119,00	119,00	117,00	117,00	2,05	1,75	
CP58	400	113,50	115,50	114,50	116,00	116,00	116,50	117,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	119,00	118,50	119,50	119,50	119,50	120,50	120,50	123,50	123,50	123,50	118,00	2,31	1,95		
CP59	400	128,00	128,00	128,00	127,50	127,50	127,50	127,00	127,00	127,00	127,00	126,50	126,50	126,50	126,50	126,50	126,50	126,50	125,50	125,50	126,00	126,00	126,00	126,00	126,78	0,79	0,62	

Tabela 9.8: 25% da energia para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 25% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIÇÃO (%)
CP25	20	0,015	0,0154	0,0154	0,0154	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0154	0,0153	0,0001	4,202
CP26	20	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148	0,0149	0,0150	0,0150	0,0149	0,0149	0,0149	0,0149	0,0149	0,0149	0,0148	0,0148	0,0150	0,0151	0,0151	0,0151	0,0149	0,0001	5,864
CP27	20	0,0161	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0159	0,0160	0,0161	0,0161	0,0161	0,0160	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0158	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0001	4,886
CP28	20	0,0142	0,0143	0,0143	0,0143	0,0142	0,0143	0,0143	0,0143	0,0142	0,0142	0,0142	0,0143	0,0143	0,0143	0,0143	0,0144	0,0144	0,0145	0,0145	0,0145	0,0143	0,0001	5,730
CP29	20	0,0153	0,0151	0,0152	0,0156	0,0158	0,0160	0,0159	0,0159	0,0160	0,0160	0,0158	0,0158	0,0157	0,0156	0,0156	0,0156	0,0157	0,0157	0,0156	0,0157	0,0157	0,0003	1,6287
CP30	20	0,0160	0,0160	0,0159	0,0160	0,0160	0,0160	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0160	0,0160	0,0158	0,0158	0,0158	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0001	5,793
CP31	20	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	0,0158	0,0158	0,0157	0,0157	0,0157	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156	0,0155	0,0156	0,0155	0,0155	0,0158	0,0157	0,0001	5,832
CP32	100	0,0079	0,0079	0,0081	0,0081	0,0078	0,0078	0,0078	0,0077	0,0078	0,0078	0,0077	0,0077	0,0076	0,0077	0,0077	0,0077	0,0076	0,0075	0,0075	0,0077	0,0077	0,0001	1,8813
CP33	100	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0073	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0073	0,0073	0,0072	0,0072	0,0000	3,800
CP34	100	0,0075	0,0072	0,0073	0,0073	0,0071	0,0071	0,0072	0,0071	0,0072	0,0072	0,0072	0,0075	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0074	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0001	1,7492
CP35	100	0,0072	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0000	4,4429
CP36	100	0,0066	0,0068	0,0068	0,0067	0,0068	0,0068	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0072	0,0001	1,9901
CP37	100	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,0074	0,0074	0,0075	0,0074	0,0074	0,0000	6,502
CP38	100	0,0076	0,0077	0,0076	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0000	2,556
CP39	200	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0115	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0113	0,0114	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0000	4,305
CP40	200	0,0119	0,0120	0,0120	0,0121	0,0120	0,0120	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0119	0,0119	0,0119	0,0118	0,0118	0,0118	0,0118	0,0001	8,210
CP41	200	0,0103	0,0105	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0102	0,0103	0,0103	0,0103	0,0001	6,925
CP42	200	0,0091	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0090	0,0090	0,0090	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0001	1,249
CP43	200	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0126	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0126	0,0000	2,755
CP44	200	0,0114	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0116	0,0117	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0118	0,0120	0,0116	0,0116	0,0117	0,0116	0,0116	0,0001	1,1430
CP45	200	0,0103	0,0102	0,0103	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0104	0,0104	0,0105	0,0103	0,0104	0,0104	0,0104	0,0001	8,584
CP46	300	0,0059	0,0059	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0059	0,0000	4,813
CP47	300	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0062	0,0063	0,0061	0,0001	1,2160
CP48	300	0,0063	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0001	1,2364
CP49	300	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0078	0,0077	0,0000	1,1726
CP50	300	0,0056	0,0057	0,0056	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0057	0,0055	0,0055	0,0054	0,0057	0,0001	1,5493
CP51	300	0,0073	0,0073	0,0074	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0074	0,0073	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0073	0,0073	0,0073	0,0071	0,0001	7,791
CP52	300	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0078	0,0077	0,0078	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0076	0,0000	4,068
CP53	400	0,0064	0,0064	0,0064	0,0063	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0000	6,229
CP54	400	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0000	7,153
CP55	400	0,0040	0,0039	0,0039	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0000	4,724
CP56	400	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0000	4,118
CP57	400	0,0043	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0043	0,0043	0,0042	0,0042	0,0043	0,0042	0,0042	0,0042	0,0043	0,0043	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0000	8,576
CP58	400	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0047	0,0047	0,0047	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0000	7,345
CP59	400	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0041	0,0039	0,0042	0,0001	1,4615

Tabela 9.9: 25% da energia para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 25% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIANÇA (%)		
CP25	20	0,0272	0,0272	0,0275	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272	0,0272
CP26	20	0,0258	0,0258	0,0258	0,0257	0,0258	0,0258	0,0258	0,0258	0,0257	0,0256	0,0255	0,0256	0,0258	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0256	0,0257	0,0257	0,0001	0,6306	
CP27	20	0,0244	0,0244	0,0246	0,0245	0,0246	0,0245	0,0244	0,0247	0,0247	0,0245	0,0244	0,0244	0,0247	0,0249	0,0246	0,0245	0,0245	0,0246	0,0246	0,0247	0,0247	0,0246	0,0001	0,5484	
CP28	20	0,0242	0,0242	0,0241	0,0238	0,0238	0,0238	0,0238	0,0239	0,0238	0,0239	0,0239	0,0238	0,0238	0,0238	0,0239	0,0239	0,0240	0,0239	0,0240	0,0240	0,0240	0,0239	0,0001	0,5601	
CP29	20	0,0233	0,0232	0,0231	0,0228	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0230	0,0229	0,0230	0,0230	0,0229	0,0231	0,0231	0,0232	0,0230	0,0002	0,6631	
CP30	20	0,0222	0,0221	0,0222	0,0225	0,0225	0,0226	0,0224	0,0225	0,0224	0,0221	0,0223	0,0222	0,0221	0,0221	0,0221	0,0222	0,0224	0,0222	0,0218	0,0219	0,0222	0,0222	0,0002	0,9371	
CP31	20	0,0266	0,0263	0,0264	0,0267	0,0268	0,0268	0,0268	0,0269	0,0269	0,0269	0,0268	0,0269	0,0269	0,0270	0,0270	0,0271	0,0270	0,0270	0,0270	0,0268	0,0266	0,0268	0,0002	0,7559	
CP32	100	0,0140	0,0141	0,0141	0,0140	0,0141	0,0141	0,0141	0,0142	0,0143	0,0143	0,0141	0,0143	0,0144	0,0142	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0140	0,0139	0,0141	0,0141	0,0001	0,8616	
CP33	100	0,0126	0,0125	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0128	0,0127	0,0130	0,0130	0,0129	0,0129	0,0129	0,0129	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0002	1,4337	
CP34	100	0,0133	0,0132	0,0131	0,0131	0,0131	0,0130	0,0129	0,0129	0,0130	0,0130	0,0130	0,0131	0,0131	0,0132	0,0131	0,0134	0,0133	0,0134	0,0134	0,0134	0,0134	0,0134	0,0001	1,1297	
CP35	100	0,0140	0,0141	0,0139	0,0139	0,0140	0,0140	0,0139	0,0139	0,0140	0,0141	0,0141	0,0141	0,0140	0,0140	0,0139	0,0140	0,0140	0,0140	0,0139	0,0140	0,0139	0,0140	0,0001	0,5599	
CP36	100	0,0138	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0140	0,0140	0,0140	0,0142	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0140	0,0140	0,0142	0,0139	0,0140	0,0141	0,0141	0,0141	0,0001	0,7055	
CP37	100	0,0137	0,0138	0,0138	0,0140	0,0139	0,0140	0,0140	0,0142	0,0142	0,0143	0,0143	0,0143	0,0142	0,0143	0,0143	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0002	1,3086	
CP38	100	0,0132	0,0139	0,0138	0,0136	0,0136	0,0134	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0134	0,0133	0,0134	0,0133	0,0133	0,0133	0,0133	0,0132	0,0132	0,0132	0,0002	1,4275	
CP39	200	0,0249	0,0248	0,0247	0,0250	0,0249	0,0248	0,0247	0,0246	0,0245	0,0245	0,0244	0,0244	0,0244	0,0243	0,0243	0,0241	0,0239	0,0238	0,0238	0,0236	0,0234	0,0244	0,0004	1,8339	
CP40	200	0,0220	0,0219	0,0219	0,0219	0,0219	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0219	0,0218	0,0219	0,0217	0,0217	0,0216	0,0215	0,0215	0,0215	0,0212	0,0208	0,0208	0,0217	0,0003	1,3360	
CP41	200	0,0202	0,0202	0,0202	0,0201	0,0200	0,0202	0,0201	0,0202	0,0201	0,0201	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0199	0,0198	0,0199	0,0197	0,0197	0,0197	0,0200	0,0002	0,8109	
CP42	200	0,0228	0,0228	0,0228	0,0229	0,0230	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0231	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0001	0,5321	
CP43	200	0,0214	0,0215	0,0216	0,0216	0,0217	0,0217	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0219	0,0219	0,0219	0,0220	0,0220	0,0221	0,0222	0,0223	0,0222	0,0222	0,0222	0,0222	0,0003	1,1517	
CP44	200	0,0234	0,0233	0,0234	0,0235	0,0233	0,0234	0,0235	0,0233	0,0233	0,0234	0,0232	0,0231	0,0232	0,0231	0,0229	0,0230	0,0229	0,0230	0,0230	0,0230	0,0229	0,0232	0,0002	0,8516	
CP45	200	0,0222	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0222	0,0223	0,0221	0,0221	0,0222	0,0222	0,0222	0,0223	0,0223	0,0222	0,0221	0,0221	0,0223	0,0223	0,0221	0,0220	0,0222	0,0001	0,4433	
CP46	300	0,0121	0,0121	0,0122	0,0121	0,0122	0,0122	0,0122	0,0123	0,0122	0,0122	0,0123	0,0123	0,0123	0,0124	0,0124	0,0125	0,0125	0,0126	0,0126	0,0126	0,0125	0,0123	0,0002	1,2644	
CP47	300	0,0109	0,0109	0,0109	0,0111	0,0111	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0116	0,0115	0,0116	0,0115	0,0115	0,0114	0,0111	0,0110	0,0110	0,0110	0,0107	0,0112	0,0003	2,4560	
CP48	300	0,0107	0,0106	0,0107	0,0107	0,0107	0,0108	0,0108	0,0108	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	0,0108	0,0108	0,0107	0,0107	0,0105	0,0102	0,0101	0,0101	0,0107	0,0002	1,8876	
CP49	300	0,0139	0,0140	0,0141	0,0141	0,0142	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0140	0,0140	0,0140	0,0139	0,0139	0,0138	0,0140	0,0140	0,0001	0,7141	
CP50	300	0,0122	0,0123	0,0123	0,0123	0,0124	0,0126	0,0126	0,0127	0,0129	0,0128	0,0123	0,0125	0,0124	0,0123	0,0124	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123	0,0122	0,0122	0,0124	0,0002	1,5741	
CP51	300	0,0125	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0127	0,0126	0,0127	0,0126	0,0127	0,0126	0,0126	0,0125	0,0125	0,0125	0,0124	0,0123	0,0125	0,0124	0,0124	0,0126	0,0001	0,8812	
CP52	300	0,0128	0,0128	0,0128	0,0127	0,0127	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0124	0,0125	0,0124	0,0125	0,0124	0,0123	0,0124	0,0123	0,0124	0,0001	1,1464	
CP53	400	0,0111	0,0112	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0113	0,0001	0,6488	
CP54	400	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0089	0,0089	0,0089	0,0090	0,0090	0,0089	0,0089	0,0089	0,0088	0,0088	0,0088	0,0086	0,0086	0,0086	0,0085	0,0085	0,0085	0,0088	0,0002	1,9079	
CP55	400	0,0074	0,0074	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0072	0,0072	0,0072	0,0071	0,0071	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0069	0,0068	0,0068	0,0068	0,0071	0,0002	2,8903	
CP56	400	0,0078	0,0078	0,0078	0,0079	0,0079	0,0080	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0079	0,0001	0,6716	
CP57	400	0,0070	0,0070	0,0071	0,0071	0,0071	0,0072	0,0073	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0072	0,0073	0,0072	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,0001	1,1714	
CP58	400	0,0075	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	0,0077	0,0076	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0001	0,7682	
CP59	400	0,0090	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0000	0,3373	

Tabela 9.10: 50% da energia para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 50% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIÇÃO (%)
CP25	20	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0308	0,0308	0,0308	0,0308	0,0307	0,0308	0,0307	0,0308	0,0307	0,0308	0,0306	0,0308	0,0307	0,0308	0,0309	0,0311	0,0308	0,0001	0,3499
CP26	20	0,0299	0,0298	0,0299	0,0298	0,0299	0,0299	0,0299	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0299	0,0300	0,0300	0,0299	0,0298	0,0297	0,0301	0,0301	0,0302	0,0299	0,0001	0,3632
CP27	20	0,0321	0,0322	0,0321	0,0321	0,0321	0,0319	0,0322	0,0324	0,0323	0,0323	0,0322	0,0320	0,0319	0,0319	0,0320	0,0321	0,0320	0,0320	0,0320	0,0322	0,0321	0,0001	0,4114
CP28	20	0,0285	0,0285	0,0286	0,0286	0,0285	0,0285	0,0286	0,0286	0,0284	0,0284	0,0285	0,0285	0,0286	0,0286	0,0287	0,0286	0,0287	0,0288	0,0289	0,0290	0,0286	0,0002	0,5438
CP29	20	0,0306	0,0302	0,0305	0,0311	0,0318	0,0320	0,0318	0,0318	0,0319	0,0320	0,0317	0,0318	0,0317	0,0315	0,0312	0,0313	0,0316	0,0315	0,0314	0,0313	0,0314	0,0005	1,6430
CP30	20	0,0321	0,0321	0,0321	0,0320	0,0320	0,0320	0,0320	0,0321	0,0320	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0321	0,0322	0,0321	0,0001	0,1594
CP31	20	0,0316	0,0316	0,0316	0,0317	0,0317	0,0317	0,0317	0,0316	0,0315	0,0313	0,0313	0,0312	0,0312	0,0313	0,0313	0,0312	0,0312	0,0312	0,0313	0,0316	0,0314	0,0002	0,8599
CP32	100	0,0158	0,0160	0,0162	0,0162	0,0157	0,0157	0,0157	0,0156	0,0158	0,0156	0,0155	0,0154	0,0153	0,0154	0,0154	0,0153	0,0152	0,0152	0,0151	0,0155	0,0156	0,0003	1,9620
CP33	100	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0146	0,0144	0,0145	0,0000	0,2654
CP34	100	0,0150	0,0145	0,0145	0,0146	0,0142	0,0143	0,0144	0,0142	0,0144	0,0144	0,0145	0,0150	0,0146	0,0147	0,0148	0,0147	0,0148	0,0145	0,0144	0,0143	0,0146	0,0002	1,6431
CP35	100	0,0143	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0141	0,0141	0,0142	0,0143	0,0143	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142	0,0001	0,3895
CP36	100	0,0134	0,0136	0,0136	0,0135	0,0137	0,0137	0,0138	0,0139	0,0139	0,0139	0,0138	0,0139	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	0,0142	0,0142	0,0142	0,0144	0,0138	0,0002	1,7956
CP37	100	0,0152	0,0151	0,0151	0,0151	0,0151	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0151	0,0150	0,0150	0,0149	0,0149	0,0149	0,0149	0,0150	0,0001	0,5033
CP38	100	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0155	0,0154	0,0155	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0153	0,0154	0,0153	0,0154	0,0154	0,0153	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0000	0,2678
CP39	200	0,0229	0,0229	0,0228	0,0228	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0228	0,0228	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0226	0,0228	0,0001	0,4178
CP40	200	0,0240	0,0240	0,0240	0,0242	0,0241	0,0241	0,0242	0,0241	0,0241	0,0241	0,0241	0,0240	0,0241	0,0241	0,0239	0,0238	0,0238	0,0237	0,0237	0,0236	0,0240	0,0002	0,7750
CP41	200	0,0208	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0210	0,0209	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0209	0,0001	0,4997
CP42	200	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184	0,0183	0,0182	0,0181	0,0181	0,0181	0,0180	0,0180	0,0180	0,0181	0,0180	0,0180	0,0181	0,0181	0,0181	0,0182	0,0002	0,8603
CP43	200	0,0252	0,0252	0,0253	0,0252	0,0253	0,0253	0,0254	0,0254	0,0254	0,0253	0,0252	0,0254	0,0254	0,0253	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0253	0,0253	0,0253	0,0001	0,2665
CP44	200	0,0228	0,0229	0,0230	0,0230	0,0230	0,0231	0,0231	0,0232	0,0232	0,0234	0,0232	0,0232	0,0233	0,0233	0,0237	0,0241	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0232	0,0003	1,1705
CP45	200	0,0206	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0206	0,0205	0,0206	0,0206	0,0207	0,0207	0,0206	0,0209	0,0210	0,0207	0,0208	0,0207	0,0206	0,0002	0,7409
CP46	300	0,0118	0,0118	0,0119	0,0119	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0119	0,0120	0,0120	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0120	0,0119	0,0119	0,0001	0,4260
CP47	300	0,0119	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0121	0,0122	0,0122	0,0122	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123	0,0125	0,0121	0,0002	1,2370
CP48	300	0,0126	0,0127	0,0127	0,0128	0,0128	0,0129	0,0130	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0002	1,2142
CP49	300	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0155	0,0155	0,0155	0,0154	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0154	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0000	0,1956
CP50	300	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0115	0,0155	0,0155	0,0155	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0112	0,0112	0,0109	0,0108	0,0113	0,0002	1,5782
CP51	300	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148	0,0148	0,0147	0,0147	0,0146	0,0145	0,0143	0,0147	0,0001	0,8464
CP52	300	0,0154	0,0154	0,0155	0,0155	0,0155	0,0156	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0155	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0153	0,0155	0,0001	0,4242
CP53	400	0,0127	0,0128	0,0128	0,0127	0,0128	0,0127	0,0128	0,0127	0,0128	0,0127	0,0127	0,0128	0,0127	0,0127	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0001	0,6399
CP54	400	0,0084	0,0084	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0082	0,0083	0,0082	0,0083	0,0083	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0083	0,0001	0,7151
CP55	400	0,0079	0,0079	0,0079	0,0080	0,0079	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080	0,0000	0,4508
CP56	400	0,0091	0,0090	0,0091	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0090	0,0000	0,3345
CP57	400	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0084	0,0084	0,0084	0,0086	0,0086	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0085	0,0001	0,8750
CP58	400	0,0092	0,0092	0,0092	0,0093	0,0093	0,0092	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0092	0,0093	0,0092	0,0092	0,0092	0,0091	0,0090	0,0092	0,0001	0,7490
CP59	400	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0083	0,0083	0,0082	0,0079	0,0084	0,0001	1,4626

Tabela 9.11: 50% da energia para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 50% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIÇÃO (%)	
CP25	20	0,0545	0,0546	0,0550	0,0546	0,0546	0,0547	0,0547	0,0546	0,0545	0,0545	0,0546	0,0545	0,0546	0,0546	0,0545	0,0546	0,0546	0,0545	0,0546	0,0547	0,0546	0,0001	0,2107	
CP26	20	0,0517	0,0517	0,0517	0,0516	0,0517	0,0517	0,0516	0,0518	0,0515	0,0516	0,0512	0,0513	0,0513	0,0515	0,0508	0,0508	0,0507	0,0509	0,0513	0,0519	0,0514	0,0004	0,8809	
CP27	20	0,0492	0,0491	0,0494	0,0492	0,0492	0,0493	0,0491	0,0496	0,0496	0,0492	0,0493	0,0493	0,0495	0,0499	0,0495	0,0492	0,0492	0,0494	0,0496	0,0495	0,0494	0,0002	0,4130	
CP28	20	0,0485	0,0485	0,0484	0,0478	0,0475	0,0477	0,0477	0,0478	0,0478	0,0478	0,0478	0,0475	0,0478	0,0478	0,0477	0,0478	0,0479	0,0478	0,0479	0,0479	0,0479	0,0479	0,0003	0,5786
CP29	20	0,0467	0,0464	0,0461	0,0459	0,0458	0,0459	0,0459	0,0458	0,0456	0,0457	0,0459	0,0459	0,0459	0,0460	0,0458	0,0460	0,0460	0,0457	0,0462	0,0466	0,0460	0,0003	0,6259	
CP30	20	0,0445	0,0442	0,0446	0,0449	0,0451	0,0451	0,0449	0,0451	0,0449	0,0444	0,0446	0,0445	0,0445	0,0443	0,0442	0,0446	0,0448	0,0446	0,0437	0,0438	0,0446	0,0004	0,8721	
CP31	20	0,0533	0,0527	0,0528	0,0536	0,0537	0,0539	0,0538	0,0539	0,0542	0,0540	0,0541	0,0540	0,0540	0,0540	0,0539	0,0542	0,0541	0,0543	0,0538	0,0532	0,0538	0,0004	0,8176	
CP32	100	0,0281	0,0284	0,0283	0,0282	0,0284	0,0284	0,0284	0,0284	0,0287	0,0288	0,0284	0,0289	0,0289	0,0284	0,0283	0,0282	0,0283	0,0281	0,0281	0,0282	0,0284	0,0002	0,8680	
CP33	100	0,0251	0,0251	0,0252	0,0251	0,0253	0,0254	0,0254	0,0258	0,0256	0,0260	0,0261	0,0259	0,0260	0,0260	0,0260	0,0261	0,0260	0,0259	0,0260	0,0261	0,0260	0,0004	1,4415	
CP34	100	0,0266	0,0265	0,0264	0,0262	0,0264	0,0261	0,0261	0,0260	0,0261	0,0261	0,0260	0,0262	0,0263	0,0263	0,0263	0,0267	0,0267	0,0267	0,0267	0,0267	0,0266	0,0003	0,9585	
CP35	100	0,0281	0,0281	0,0279	0,0280	0,0281	0,0279	0,0280	0,0280	0,0281	0,0282	0,0281	0,0282	0,0281	0,0281	0,0280	0,0280	0,0279	0,0279	0,0280	0,0279	0,0280	0,0001	0,3538	
CP36	100	0,0276	0,0278	0,0277	0,0277	0,0277	0,0278	0,0280	0,0281	0,0282	0,0282	0,0282	0,0282	0,0282	0,0280	0,0280	0,0279	0,0279	0,0280	0,0281	0,0282	0,0280	0,0001	0,7733	
CP37	100	0,0276	0,0278	0,0279	0,0280	0,0280	0,0281	0,0283	0,0284	0,0285	0,0286	0,0286	0,0286	0,0287	0,0287	0,0287	0,0287	0,0287	0,0287	0,0286	0,0287	0,0286	0,0004	1,2917	
CP38	100	0,0264	0,0279	0,0276	0,0273	0,0272	0,0271	0,0271	0,0271	0,0271	0,0270	0,0270	0,0269	0,0269	0,0269	0,0269	0,0267	0,0267	0,0266	0,0265	0,0266	0,0270	0,0004	1,3534	
CP39	200	0,0500	0,0499	0,0498	0,0499	0,0501	0,0496	0,0495	0,0492	0,0490	0,0489	0,0488	0,0489	0,0489	0,0487	0,0486	0,0482	0,0479	0,0478	0,0472	0,0468	0,0489	0,0009	1,8939	
CP40	200	0,0439	0,0438	0,0438	0,0439	0,0438	0,0438	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	0,0437	0,0435	0,0433	0,0431	0,0430	0,0429	0,0424	0,0416	0,0006	1,3351	
CP41	200	0,0406	0,0405	0,0403	0,0403	0,0402	0,0403	0,0403	0,0404	0,0402	0,0402	0,0401	0,0401	0,0399	0,0399	0,0400	0,0398	0,0398	0,0399	0,0396	0,0394	0,0401	0,0003	0,7432	
CP42	200	0,0458	0,0457	0,0457	0,0458	0,0460	0,0462	0,0460	0,0457	0,0457	0,0458	0,0459	0,0458	0,0459	0,0450	0,0460	0,0461	0,0463	0,0463	0,0463	0,0463	0,0466	0,0002	0,5339	
CP43	200	0,0428	0,0430	0,0432	0,0432	0,0432	0,0433	0,0434	0,0435	0,0437	0,0437	0,0438	0,0438	0,0440	0,0439	0,0441	0,0441	0,444	0,445	0,444	0,444	0,444	0,0005	1,1561	
CP44	200	0,0469	0,0467	0,0468	0,0471	0,0468	0,0468	0,0469	0,0466	0,0465	0,0467	0,0465	0,0464	0,0466	0,0462	0,0459	0,0460	0,0458	0,0460	0,0460	0,0457	0,0464	0,0004	0,8969	
CP45	200	0,0445	0,0445	0,0446	0,0446	0,0447	0,0447	0,0445	0,0445	0,0441	0,0442	0,0445	0,0444	0,0446	0,0447	0,0445	0,0444	0,0442	0,0445	0,0442	0,0439	0,0444	0,0002	0,4730	
CP46	300	0,0241	0,0241	0,0243	0,0242	0,0243	0,0244	0,0245	0,0245	0,0244	0,0244	0,0245	0,0246	0,0246	0,0247	0,0248	0,0249	0,0250	0,0251	0,0252	0,0250	0,0246	0,0003	1,2645	
CP47	300	0,0217	0,0219	0,0219	0,0223	0,0223	0,0226	0,0227	0,0227	0,0227	0,0228	0,0232	0,0230	0,0233	0,0231	0,0230	0,0228	0,0222	0,0221	0,0220	0,0214	0,0226	0,0005	2,3806	
CP48	300	0,0214	0,0213	0,0214	0,0214	0,0214	0,0215	0,0216	0,0216	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0217	0,0217	0,0217	0,0215	0,0214	0,0211	0,0205	0,0203	0,0214	0,0004	1,9104	
CP49	300	0,0279	0,0280	0,0281	0,0283	0,0283	0,0284	0,0284	0,0283	0,0283	0,0282	0,0282	0,0282	0,0281	0,0281	0,0281	0,0280	0,0278	0,0279	0,0277	0,0277	0,0281	0,0002	0,6904	
CP50	300	0,0245	0,0246	0,0247	0,0248	0,0248	0,0253	0,0251	0,0254	0,0256	0,0256	0,0247	0,0251	0,0247	0,0247	0,0247	0,0246	0,0246	0,0245	0,0244	0,0244	0,0248	0,0004	1,5868	
CP51	300	0,0251	0,0252	0,0252	0,0251	0,0253	0,0254	0,0255	0,0255	0,0255	0,0253	0,0254	0,0253	0,0252	0,0251	0,0250	0,0249	0,0248	0,0250	0,0249	0,0249	0,0252	0,0002	0,8424	
CP52	300	0,0255	0,0255	0,0256	0,0255	0,0253	0,0252	0,0252	0,0252	0,0251	0,0250	0,0250	0,0249	0,0249	0,0249	0,0250	0,0248	0,0249	0,0249	0,0246	0,0246	0,0251	0,0003	1,0974	
CP53	400	0,0222	0,0224	0,0225	0,0226	0,0226	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0228	0,0228	0,0228	0,0227	0,0227	0,0228	0,0227	0,0230	0,0227	0,0002	0,7312	
CP54	400	0,0181	0,0180	0,0181	0,0181	0,0179	0,0179	0,0180	0,0180	0,0179	0,0179	0,0179	0,0178	0,0177	0,0177	0,0175	0,0173	0,0172	0,0172	0,0171	0,0171	0,0181	0,0004	1,9821	
CP55	400	0,0147	0,0147	0,0147	0,0146	0,0146	0,0146	0,0145	0,0145	0,0144	0,0145	0,0144	0,0143	0,0142	0,0141	0,0140	0,0140	0,0140	0,0138	0,0136	0,0132	0,0143	0,0004	2,8333	
CP56	400	0,0157	0,0157	0,0157	0,0158	0,0158	0,0159	0,0159	0,0159	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0157	0,0160	0,0160	0,0161	0,0160	0,0160	0,0160	0,0159	0,0001	0,7223	
CP57	400	0,0139	0,0141	0,0142	0,0143	0,0143	0,0143	0,0146	0,0145	0,0144	0,0144	0,0145	0,0144	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0145	0,0146	0,0146	0,0149	0,0002	1,2033	
CP58	400	0,0151	0,0152	0,0152	0,0152	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0153	0,0156	0,0153	0,0001	0,7407	
CP59	400	0,0181	0,0181	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183	0,0182	0,0183	0,0183	0,0182	0,0183	0,0183	0,0182	0,0001	0,3412	

Tabela 9.12: 75% da energia para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 75% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
CP25	20	0,0465	0,0465	0,0464	0,0464	0,0463	0,0463	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,0461	0,0462	0,0461	0,0461	0,0461	0,0462	0,0461	0,0463	0,0464	0,0466	0,0463	0,0002	0,3361
CP26	20	0,0449	0,0447	0,0448	0,0447	0,0448	0,0449	0,0449	0,0450	0,0450	0,0451	0,0450	0,0449	0,0450	0,0450	0,0449	0,0448	0,0446	0,0452	0,0452	0,0453	0,0449	0,0002	0,3774
CP27	20	0,0482	0,0483	0,0482	0,0482	0,0480	0,0483	0,0485	0,0486	0,0485	0,0483	0,0480	0,0479	0,0480	0,0481	0,0481	0,0480	0,0481	0,0481	0,0480	0,0482	0,0482	0,0002	0,3982
CP28	20	0,0427	0,0428	0,0429	0,0428	0,0427	0,0427	0,0429	0,0429	0,0427	0,0426	0,0427	0,0429	0,0426	0,0430	0,0431	0,0430	0,0431	0,0432	0,0434	0,0436	0,0429	0,0002	0,5796
CP29	20	0,0460	0,0453	0,0458	0,0467	0,0477	0,0481	0,0478	0,0478	0,0479	0,0480	0,0477	0,0478	0,0475	0,0472	0,0469	0,0470	0,0474	0,0474	0,0471	0,0470	0,0472	0,0008	1,6112
CP30	20	0,0482	0,0482	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0480	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0481	0,0482	0,0481	0,0484	0,0481	0,0001	0,1573
CP31	20	0,0474	0,0475	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0474	0,0473	0,0471	0,0471	0,0469	0,0471	0,0470	0,0470	0,0469	0,0468	0,0468	0,0469	0,0475	0,0472	0,0003	0,6434
CP32	100	0,0238	0,0240	0,0243	0,0243	0,0235	0,0236	0,0235	0,0233	0,0234	0,0234	0,0233	0,0232	0,0231	0,0231	0,0231	0,0230	0,0229	0,0229	0,0226	0,0232	0,0234	0,0005	1,9253
CP33	100	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0218	0,0217	0,0217	0,0217	0,0218	0,0218	0,0217	0,0218	0,0217	0,0217	0,0217	0,0218	0,0218	0,0219	0,0216	0,0218	0,0001	0,2567
CP34	100	0,0226	0,0218	0,0218	0,0220	0,0214	0,0214	0,0216	0,0213	0,0216	0,0216	0,0217	0,0226	0,0219	0,0221	0,0222	0,0221	0,0223	0,0217	0,0217	0,0215	0,0218	0,0004	1,6448
CP35	100	0,0215	0,0214	0,0214	0,0213	0,0214	0,0213	0,0212	0,0212	0,0212	0,0214	0,0214	0,0215	0,0213	0,0213	0,0213	0,0212	0,0212	0,0213	0,0212	0,0213	0,0213	0,0004	4,2118
CP36	100	0,0201	0,0205	0,0205	0,0203	0,0205	0,0205	0,0207	0,0209	0,0208	0,0208	0,0208	0,0208	0,0207	0,0207	0,0207	0,0207	0,0212	0,0213	0,0214	0,0217	0,0208	0,0004	1,7806
CP37	100	0,0229	0,0227	0,0227	0,0227	0,0227	0,0226	0,0226	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0225	0,0224	0,0224	0,0225	0,0224	0,0224	0,0226	0,0001	0,5247
CP38	100	0,0231	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0231	0,0230	0,0231	0,0231	0,0231	0,0230	0,0231	0,0231	0,0231	0,231	0,0231	0,0001	0,2380
CP39	200	0,0344	0,0344	0,0342	0,0342	0,0343	0,0343	0,0343	0,0343	0,0344	0,0343	0,0342	0,0342	0,0341	0,0341	0,0341	0,0341	0,0341	0,0341	0,0340	0,0339	0,0342	0,0001	0,04046
CP40	200	0,0360	0,0360	0,0360	0,0360	0,0362	0,0362	0,0363	0,0362	0,0363	0,0363	0,0362	0,0360	0,0361	0,0362	0,0359	0,0356	0,0357	0,0356	0,0355	0,0354	0,0360	0,0003	0,7985
CP41	200	0,0313	0,0315	0,0316	0,0316	0,0315	0,0315	0,0316	0,0315	0,0314	0,0315	0,0315	0,0314	0,0314	0,0313	0,0313	0,0312	0,0312	0,0311	0,0311	0,0311	0,0314	0,0002	0,4848
CP42	200	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	0,0274	0,0273	0,0272	0,0272	0,0271	0,0271	0,0271	0,0270	0,0271	0,0271	0,0271	0,0271	0,0271	0,0272	0,0273	0,0002	0,8486
CP43	200	0,0379	0,0378	0,0379	0,0379	0,0379	0,0380	0,0380	0,0381	0,0381	0,0382	0,0379	0,0381	0,0381	0,0380	0,0381	0,0381	0,0381	0,0380	0,0380	0,0380	0,0380	0,0001	0,2501
CP44	200	0,0343	0,0344	0,0345	0,0345	0,0346	0,0346	0,0347	0,0347	0,0349	0,0349	0,0346	0,0348	0,0348	0,0349	0,0349	0,0355	0,0361	0,0349	0,0350	0,0350	0,0349	0,0004	1,1695
CP45	200	0,0308	0,0308	0,0308	0,0308	0,0307	0,0307	0,0308	0,0308	0,0308	0,0308	0,0309	0,0311	0,0311	0,0310	0,0309	0,0313	0,0316	0,0310	0,0313	0,0311	0,0309	0,0002	0,7408
CP46	300	0,0177	0,0177	0,0179	0,0179	0,0179	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0179	0,0180	0,0180	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0180	0,0178	0,0179	0,0001	0,4232
CP47	300	0,0178	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0181	0,0181	0,0181	0,0182	0,0182	0,0182	0,0183	0,0183	0,0184	0,0184	0,0184	0,0184	0,0185	0,0188	0,0182	0,0002	1,2436
CP48	300	0,0190	0,0191	0,0191	0,0192	0,0193	0,0193	0,0194	0,0196	0,0197	0,0196	0,0197	0,0197	0,0197	0,0197	0,0196	0,0196	0,0196	0,0196	0,0194	0,0195	0,0195	0,0002	1,2086
CP49	300	0,0231	0,0232	0,0231	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0232	0,0233	0,0233	0,0232	0,0000	0,1704
CP50	300	0,0169	0,0170	0,0169	0,0172	0,0172	0,0173	0,0172	0,0172	0,0171	0,0171	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0171	0,0171	0,0168	0,0168	0,0165	0,0163	0,0170	0,0003	1,5324
CP51	300	0,0221	0,0220	0,0221	0,0221	0,0221	0,0220	0,0221	0,0221	0,0221	0,0221	0,0222	0,0222	0,0222	0,0222	0,0222	0,0221	0,0220	0,0219	0,0218	0,0214	0,0221	0,0002	0,8350
CP52	300	0,0231	0,0231	0,0232	0,0232	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0233	0,0232	0,0232	0,0232	0,0231	0,0231	0,0231	0,0231	0,0230	0,0232	0,0001	0,4304
CP53	400	0,0191	0,0192	0,0191	0,0190	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0191	0,0192	0,0191	0,0190	0,0189	0,0189	0,0189	0,0189	0,0188	0,0189	0,0190	0,0001	0,6352
CP54	400	0,0125	0,0126	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0124	0,0125	0,0124	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0125	0,0001	0,7079
CP55	400	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120	0,0001	0,4556
CP56	400	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0136	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0135	0,0136	0,0000	0,3213
CP57	400	0,0128	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0128	0,0128	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0126	0,0126	0,0129	0,0129	0,0125	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0001	0,8699
CP58	400	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0139	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	0,0139	0,0139	0,0139	0,0138	0,0138	0,0137	0,0135	0,0139	0,0001	0,7589
CP59	400	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0127	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0125	0,0125	0,0125	0,0123	0,0118	0,0125	0,0002	1,4714

Tabela 9.13: 75% da energia para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 75% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
CP25	20	0,0818	0,0818	0,0825	0,0819	0,0819	0,0821	0,0821	0,0820	0,0820	0,0820	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819	0,0819	0,0818	0,0819	0,0823	0,0820	0,0002	0,2133
CP26	20	0,0775	0,0775	0,0774	0,0773	0,0774	0,0775	0,0774	0,0776	0,0772	0,0773	0,0768	0,0770	0,0769	0,0773	0,0762	0,0762	0,0761	0,0763	0,0770	0,0778	0,0771	0,0005	0,6692
CP27	20	0,0738	0,0736	0,0741	0,0738	0,0739	0,0738	0,0745	0,0743	0,0739	0,0740	0,0739	0,0744	0,0749	0,0743	0,0739	0,0739	0,0741	0,0745	0,0743	0,0741	0,0003	0,4297	
CP28	20	0,0728	0,0727	0,0726	0,0718	0,0713	0,0716	0,0715	0,0719	0,0717	0,0718	0,0718	0,0713	0,0717	0,0718	0,0716	0,0717	0,0719	0,0719	0,0719	0,0720	0,0719	0,0004	0,5694
CP29	20	0,0700	0,0697	0,0692	0,069	0,0688	0,0689	0,0689	0,0689	0,0686	0,0688	0,0689	0,0689	0,0689	0,0690	0,0689	0,0690	0,0689	0,0688	0,0695	0,0700	0,0691	0,0004	0,5920
CP30	20	0,0668	0,0665	0,0672	0,0677	0,0677	0,0677	0,0675	0,0678	0,0675	0,0668	0,0672	0,0670	0,0669	0,0664	0,0664	0,0671	0,0673	0,0669	0,0656	0,0659	0,0670	0,0006	0,9166
CP31	20	0,0801	0,0792	0,0793	0,0805	0,0807	0,0809	0,0810	0,0809	0,0812	0,0811	0,0812	0,0811	0,0811	0,0811	0,0810	0,0815	0,0814	0,0816	0,0808	0,0799	0,0808	0,0007	0,8246
CP32	100	0,0421	0,0426	0,0425	0,0423	0,0425	0,0426	0,0426	0,0427	0,0430	0,0432	0,0426	0,0433	0,0434	0,0426	0,0425	0,0423	0,0424	0,0421	0,0422	0,0423	0,0426	0,0004	0,8549
CP33	100	0,0377	0,0377	0,0379	0,0377	0,0380	0,0382	0,0382	0,0386	0,0384	0,0391	0,0392	0,0389	0,0391	0,0390	0,0390	0,0391	0,0390	0,0389	0,0390	0,0392	0,0386	0,0006	1,4558
CP34	100	0,0399	0,0398	0,0396	0,0394	0,0396	0,0393	0,0392	0,0390	0,0391	0,0392	0,0390	0,0394	0,0394	0,0396	0,0396	0,0401	0,0402	0,0402	0,0402	0,0401	0,0396	0,0004	1,0345
CP35	100	0,0422	0,0422	0,0419	0,0419	0,0422	0,0419	0,0420	0,0420	0,0421	0,0424	0,0423	0,0423	0,0423	0,0423	0,0421	0,0421	0,0420	0,0419	0,0421	0,0416	0,0421	0,0002	0,3849
CP36	100	0,0415	0,0416	0,0416	0,0416	0,0417	0,0418	0,0420	0,0423	0,0423	0,0425	0,0424	0,0424	0,0424	0,0423	0,0421	0,0420	0,0419	0,0420	0,0422	0,0423	0,0420	0,0003	0,7435
CP37	100	0,0414	0,0417	0,0418	0,0420	0,0421	0,0422	0,0424	0,0427	0,0428	0,0429	0,0429	0,0430	0,0430	0,0430	0,0430	0,0430	0,0430	0,0430	0,0431	0,0433	0,0426	0,0005	1,2862
CP38	100	0,0397	0,0419	0,0415	0,0410	0,0407	0,0406	0,0407	0,0407	0,0407	0,0407	0,0405	0,0405	0,0404	0,0403	0,0403	0,0400	0,0400	0,0399	0,0398	0,0399	0,0405	0,0006	1,3693
CP39	200	0,0751	0,0748	0,0747	0,0749	0,0751	0,0745	0,0743	0,0738	0,0735	0,0734	0,0733	0,0733	0,0734	0,0731	0,0730	0,0724	0,0718	0,0717	0,0709	0,0702	0,0734	0,0014	1,9020
CP40	200	0,0659	0,0659	0,058	0,0658	0,0657	0,0657	0,0656	0,0655	0,0655	0,0656	0,0655	0,0656	0,0653	0,0653	0,0650	0,0646	0,0646	0,0644	0,0637	0,0624	0,0652	0,0009	1,3398
CP41	200	0,0608	0,0608	0,0605	0,0605	0,0603	0,0605	0,605	0,0606	0,0604	0,0603	0,0602	0,0603	0,0602	0,0603	0,0599	0,0600	0,0598	0,0597	0,0598	0,0594	0,0602	0,0005	0,7503
CP42	200	0,0686	0,0686	0,0686	0,0687	0,0689	0,0682	0,0689	0,0686	0,0687	0,0688	0,0689	0,0688	0,0689	0,0690	0,0690	0,0692	0,0695	0,0694	0,0695	0,0699	0,0690	0,0004	0,5108
CP43	200	0,0644	0,0646	0,0648	0,0649	0,0650	0,0651	0,0652	0,0653	0,0656	0,0656	0,0657	0,0657	0,0660	0,0660	0,0662	0,0664	0,0667	0,0669	0,0668	0,0669	0,0657	0,0008	1,1787
CP44	200	0,0704	0,0701	0,0703	0,0707	0,0702	0,0702	0,0704	0,0700	0,0699	0,0702	0,0697	0,0697	0,0699	0,0694	0,0688	0,0691	0,0687	0,0690	0,0691	0,0687	0,0697	0,0006	0,9127
CP45	200	0,0668	0,0668	0,0669	0,0668	0,0670	0,0670	0,0667	0,0668	0,0662	0,0663	0,0668	0,0666	0,0670	0,0671	0,0667	0,0666	0,0664	0,0668	0,0664	0,0660	0,0667	0,0003	0,4433
CP46	300	0,0363	0,0363	0,0365	0,0364	0,0366	0,0367	0,0368	0,0368	0,0367	0,0367	0,0368	0,0369	0,0369	0,0371	0,0373	0,0374	0,0375	0,0377	0,0379	0,0375	0,0369	0,0005	1,2799
CP47	300	0,0326	0,0329	0,0329	0,0334	0,0334	0,0338	0,0340	0,0341	0,0340	0,0342	0,0348	0,0346	0,0349	0,0347	0,0345	0,0342	0,0334	0,0331	0,0330	0,0321	0,0337	0,0008	2,3704
CP48	300	0,0321	0,0319	0,0321	0,0320	0,0321	0,0322	0,0324	0,0325	0,0327	0,0327	0,0327	0,0327	0,0326	0,0325	0,0325	0,0322	0,0320	0,0316	0,0308	0,0304	0,0321	0,0006	1,9120
CP49	300	0,0419	0,0421	0,0422	0,0424	0,0425	0,0425	0,0425	0,0425	0,0425	0,0424	0,0423	0,0423	0,0423	0,0422	0,0422	0,0421	0,0420	0,0417	0,0419	0,0415	0,0422	0,0003	0,6735
CP50	300	0,0368	0,0368	0,0371	0,0371	0,0371	0,0380	0,0377	0,0380	0,0387	0,0383	0,0371	0,0377	0,0371	0,0370	0,0371	0,0369	0,0369	0,0367	0,0367	0,0366	0,0373	0,0006	1,6001
CP51	300	0,0377	0,0378	0,0378	0,0377	0,0380	0,0381	0,0382	0,0382	0,0382	0,0380	0,0381	0,0379	0,0378	0,0376	0,0375	0,0373	0,0373	0,0375	0,0374	0,0374	0,0378	0,0003	0,8260
CP52	300	0,0384	0,0384	0,0384	0,0382	0,0380	0,0378	0,0379	0,0377	0,0376	0,0375	0,0376	0,0375	0,0374	0,0374	0,0375	0,0373	0,0374	0,0373	0,0369	0,0373	0,0377	0,0004	1,1165
CP53	400	0,0333	0,0336	0,0337	0,0338	0,0340	0,0341	0,0340	0,0340	0,0341	0,0340	0,0341	0,0341	0,0342	0,0342	0,0342	0,0341	0,0341	0,0342	0,0341	0,0344	0,0340	0,0002	0,7226
CP54	400	0,0271	0,0270	0,0271	0,0272	0,0269	0,0269	0,0270	0,0269	0,0269	0,0269	0,0269	0,0267	0,0266	0,0266	0,0263	0,0260	0,0259	0,0258	0,0256	0,0256	0,0266	0,0005	2,0004
CP55	400	0,0221	0,0221	0,0220	0,0219	0,0220	0,0218	0,0218	0,0217	0,0217	0,0216	0,0215	0,0214	0,0211	0,0211	0,0211	0,0210	0,0207	0,0204	0,0198	0,0214	0,0006	2,8605	
CP56	400	0,0236	0,0236	0,0236	0,0238	0,0237	0,0238	0,0238	0,0238	0,0238	0,0237	0,0237	0,0238	0,0237	0,0236	0,0240	0,0240	0,0241	0,0239	0,0240	0,0240	0,0238	0,0002	0,7283
CP57	400	0,0209	0,0211	0,0213	0,0214	0,0215	0,0215	0,0218	0,0217	0,0216	0,0216	0,0217	0,0217	0,0217	0,0217	0,0218	0,0218	0,0217	0,0218	0,0219	0,0219	0,0217	0,0003	1,2060
CP58	400	0,0226	0,0228	0,0227	0,0229	0,0229	0,0229	0,0230	0,0230	0,0230	0,0231	0,0231	0,0232	0,0231	0,0232	0,0232	0,0231	0,0231	0,0231	0,0230	0,0233	0,0230	0,0002	0,7510
CP59	400	0,0271	0,0272	0,0273	0,0273	0,0274	0,0274	0,0273	0,0273	0,0274	0,0273	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,0275	0,0274	0,0274	0,0001	0,3213

Tabela 9.14: 100% da energia para o ganho de 1x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 100% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	
CP25	20	0,0620	0,0620	0,0619	0,0619	0,0618	0,0617	0,0616	0,0616	0,0616	0,0616	0,0614	0,0616	0,0615	0,0615	0,0614	0,0615	0,0615	0,0617	0,0619	0,0622	0,0617	0,0002	0,3396	
CP26	20	0,0599	0,0597	0,0597	0,0597	0,0598	0,0599	0,0599	0,0600	0,0600	0,0601	0,0601	0,0599	0,0600	0,0600	0,0599	0,0600	0,0595	0,0603	0,0603	0,0604	0,0600	0,0003	0,5080	
CP27	20	0,0643	0,0644	0,0643	0,0643	0,0643	0,0641	0,0645	0,0647	0,0648	0,0647	0,0645	0,0640	0,0640	0,0639	0,0642	0,0642	0,0640	0,0640	0,0640	0,0643	0,0640	0,0003	0,4078	
CP28	20	0,0570	0,0571	0,0572	0,0572	0,0570	0,0571	0,0572	0,0572	0,0570	0,0569	0,0570	0,0572	0,0571	0,0573	0,0575	0,0574	0,0575	0,0576	0,0579	0,0582	0,0573	0,0003	0,5746	
CP29	20	0,0614	0,0604	0,0611	0,0623	0,0637	0,0641	0,0637	0,0637	0,0639	0,0641	0,0635	0,0637	0,0634	0,0630	0,0625	0,0628	0,0632	0,0632	0,0629	0,0627	0,0630	0,0010	1,6032	
CP30	20	0,0643	0,0643	0,0642	0,0642	0,0641	0,0642	0,0640	0,0642	0,0641	0,0642	0,0641	0,0642	0,0641	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0642	0,0643	0,0645	0,0640	0,0001	0,1540	
CP31	20	0,0632	0,0633	0,0647	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	0,0633	0,0631	0,0628	0,0628	0,0625	0,0628	0,0627	0,0626	0,0626	0,0637	0,0624	0,06262	0,0633	0,0631	0,0005	0,8590	
CP32	100	0,0317	0,320	0,0337	0,0324	0,0314	0,0314	0,0314	0,0312	0,0312	0,0313	0,0310	0,0309	0,0308	0,0309	0,0308	0,0307	0,0318	0,0305	0,0302	0,0309	0,0313	0,0008	2,4351	
CP33	100	0,0290	0,0290	0,0291	0,0291	0,0290	0,0291	0,0290	0,0290	0,0290	0,0291	0,0290	0,0289	0,0291	0,0290	0,0289	0,0290	0,0290	0,0290	0,0292	0,0289	0,0290	0,0001	0,2631	
CP34	100	0,0301	0,0290	0,0291	0,0293	0,0285	0,0286	0,0288	0,0285	0,0289	0,0288	0,0290	0,0301	0,0292	0,0294	0,0296	0,0307	0,0297	0,0290	0,0289	0,0287	0,0292	0,0006	2,0286	
CP35	100	0,0286	0,0286	0,0285	0,0285	0,0286	0,0284	0,0283	0,0282	0,0283	0,0285	0,0286	0,0287	0,0284	0,0284	0,0284	0,0283	0,0296	0,0284	0,0284	0,0284	0,0285	0,0003	0,9682	
CP36	100	0,0288	0,0273	0,0273	0,0271	0,0273	0,0274	0,0276	0,0279	0,0277	0,0278	0,0277	0,0277	0,0276	0,0276	0,0277	0,0276	0,0296	0,0296	0,0297	0,0301	0,0280	0,0010	3,4541	
CP37	100	0,0305	0,0303	0,0303	0,0303	0,0302	0,0302	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0300	0,0301	0,0300	0,0301	0,0302	0,0301	0,0313	0,0299	0,0300	0,0299	0,0302	0,0003	1,0398	
CP38	100	0,0308	0,0309	0,0309	0,0309	0,0310	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0307	0,0308	0,0307	0,0308	0,0308	0,0307	0,0308	0,0308	0,0309	0,0308	0,0001	0,2456	
CP39	200	0,0459	0,0459	0,0457	0,0457	0,0458	0,0458	0,0458	0,0458	0,0459	0,0458	0,0457	0,0456	0,0455	0,0456	0,0454	0,0455	0,0455	0,0455	0,0454	0,0453	0,0456	0,0002	0,4095	
CP40	200	0,0480	0,0493	0,0480	0,0496	0,0496	0,0483	0,0484	0,0483	0,0484	0,0484	0,0482	0,0480	0,0482	0,0495	0,0503	0,0475	0,0476	0,0475	0,0486	0,0415	0,0484	0,0008	1,6988	
CP41	200	0,0417	0,0420	0,0421	0,0421	0,0420	0,0421	0,0421	0,0420	0,0419	0,0420	0,0432	0,0419	0,0419	0,0418	0,0417	0,0416	0,0416	0,0415	0,0416	0,0415	0,0419	0,0004	0,8572	
CP42	200	0,0367	0,0368	0,0368	0,0368	0,0381	0,0367	0,0366	0,0364	0,0362	0,0363	0,0362	0,0361	0,0361	0,0361	0,0374	0,0373	0,0361	0,0362	0,0361	0,0362	0,0366	0,0005	1,4709	
CP43	200	0,0505	0,0505	0,0506	0,0505	0,0506	0,0506	0,0507	0,0508	0,0508	0,0507	0,0505	0,0508	0,0507	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508	0,0507	0,0507	0,0507	0,0507	0,0001	0,2447	
CP44	200	0,0458	0,0459	0,0472	0,0461	0,0473	0,0462	0,0475	0,0463	0,0465	0,0469	0,0477	0,0464	0,0478	0,0466	0,0474	0,0507	0,0479	0,0465	0,0479	0,0467	0,0471	0,0011	2,3129	
CP45	200	0,0411	0,0411	0,0411	0,0411	0,0410	0,0410	0,0410	0,0410	0,0410	0,0411	0,0411	0,0411	0,0412	0,0414	0,0414	0,0413	0,0418	0,0421	0,0413	0,0417	0,0427	0,0413	0,0004	1,0753
CP46	300	0,0237	0,0237	0,0239	0,0239	0,0239	0,0240	0,0240	0,0240	0,0240	0,0240	0,0239	0,0239	0,0239	0,0239	0,0239	0,0239	0,0238	0,0239	0,0240	0,0238	0,0239	0,0001	0,4187	
CP47	300	0,0238	0,0240	0,0240	0,0240	0,0240	0,0241	0,0241	0,0242	0,0242	0,0242	0,0243	0,0243	0,0244	0,0244	0,0245	0,0246	0,0246	0,0246	0,0247	0,0251	0,0243	0,0003	1,2466	
CP48	300	0,0253	0,0255	0,0254	0,0255	0,0257	0,0258	0,0259	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0263	0,0262	0,0262	0,0261	0,0261	0,0259	0,0260	0,0260	0,0003	1,2047	
CP49	300	0,0308	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0310	0,0309	0,0309	0,0309	0,0310	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0309	0,0310	0,0309	0,0310	0,0310	0,0310	0,0309	0,0001	0,1843	
CP50	300	0,0226	0,0227	0,0226	0,0229	0,0230	0,0230	0,0229	0,0230	0,0228	0,0228	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0229	0,0228	0,0225	0,0224	0,0232	0,0217	0,0228	0,0003	1,3798	
CP51	300	0,0295	0,0294	0,0295	0,0294	0,0294	0,0294	0,0294	0,0294	0,0294	0,0295	0,0295	0,0296	0,0297	0,0297	0,0296	0,0295	0,0294	0,0292	0,0290	0,0286	0,0294	0,0002	0,8306	
CP52	300	0,0308	0,0308	0,0309	0,0310	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0310	0,0310	0,0310	0,0309	0,0309	0,0308	0,0308	0,0307	0,0310	0,0001	0,4453	
CP53	400	0,0255	0,0255	0,0268	0,0254	0,0255	0,0255	0,0255	0,0255	0,0267	0,0267	0,0255	0,0268	0,0267	0,0254	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0251	0,0264	0,0258	0,0006	2,5049	
CP54	400	0,0167	0,0168	0,0179	0,0167	0,0166	0,0166	0,0166	0,0166	0,0165	0,0165	0,0165	0,0166	0,0165	0,0166	0,0166	0,0166	0,0168	0,0168	0,0169	0,0169	0,0168	0,0004	2,5671	
CP55	400	0,0158	0,0158	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0159	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0173	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0003	1,9343	
CP56	400	0,0182	0,0181	0,0182	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0181	0,0180	0,0181	0,0180	0,0180	0,0179	0,0180	0,0001	0,3188	
CP57	400	0,0171	0,0170	0,0170	0,0170	0,0170	0,0171	0,0170	0,0169	0,0169	0,0170	0,0169	0,0168	0,0168	0,0173	0,0185	0,0167	0,0167	0,0168	0,0168	0,0168	0,0170	0,0004	2,1588	
CP58	400	0,0185	0,0185	0,0185	0,0186	0,0185	0,0185	0,0186	0,0186	0,0185	0,0186	0,0187	0,0187	0,0186	0,0185	0,0186	0,0185	0,0184	0,0184	0,0183	0,0181	0,0185	0,0001	0,7622	
CP59	400	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0168	0,0169	0,0169	0,0169	0,0168	0,0168	0,0167	0,0167	0,0166	0,0164	0,0158	0,0167	0,0002	1,4655	

Tabela 9.15: 100% da energia para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	MÉDIA PARA 100% DA ENERGIA (V.s)	DESVIO PADRÃO (V.s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	
CP25	20	0,1091	0,1091	0,1101	0,1093	0,0913	0,1095	0,1094	0,1094	0,1094	0,1094	0,1094	0,1094	0,1092	0,1093	0,1106	0,1105	0,1092	0,1092	0,1104	0,1093	0,1110	0,1096	0,0006	0,5084
CP26	20	0,1034	0,1033	0,1034	0,1032	0,1034	0,1033	0,1033	0,1035	0,1030	0,1032	0,1025	0,1051	0,1038	0,1031	0,1017	0,1017	0,1016	0,1018	0,1027	0,1039	0,1030	0,0009	0,8388	
CP27	20	0,0985	0,0982	0,0988	0,0984	0,0986	0,0985	0,0984	0,0993	0,0991	0,0985	0,0987	0,0986	0,0992	0,0999	0,0991	0,0985	0,0985	0,0988	0,0993	0,0991	0,0985	0,0004	0,4179	
CP28	20	0,0971	0,0970	0,0967	0,0957	0,0952	0,0955	0,0955	0,0958	0,0956	0,0958	0,0957	0,0951	0,0956	0,0957	0,0955	0,0956	0,0959	0,0958	0,0959	0,0973	0,0959	0,0006	0,6445	
CP29	20	0,0935	0,0930	0,0924	0,0919	0,0930	0,0919	0,0920	0,0919	0,0916	0,0917	0,0919	0,0918	0,0918	0,0921	0,0919	0,0921	0,0920	0,0918	0,0927	0,0934	0,0922	0,0006	0,6253	
CP30	20	0,0891	0,0887	0,0886	0,0903	0,0902	0,0903	0,0901	0,0905	0,0901	0,0891	0,0896	0,0894	0,0892	0,0886	0,0886	0,0895	0,0898	0,0892	0,0875	0,0879	0,0893	0,0008	0,9085	
CP31	20	0,1068	0,1057	0,1070	0,1074	0,1076	0,1079	0,1080	0,1079	0,1083	0,1082	0,1083	0,1081	0,0182	0,1081	0,1080	0,1086	0,1086	0,1088	0,1078	0,1068	0,1078	0,0008	0,7127	
CP32	100	0,0562	0,0569	0,0568	0,0565	0,0567	0,0568	0,0569	0,0569	0,0568	0,0588	0,0588	0,0588	0,0590	0,0579	0,0569	0,0567	0,0565	0,0566	0,0562	0,0575	0,0564	0,0571	0,0008	1,4789
CP33	100	0,0503	0,0502	0,0505	0,0503	0,0507	0,0522	0,509	0,0515	0,0512	0,0521	0,0523	0,0519	0,0522	0,0520	0,0520	0,0522	0,0521	0,0519	0,0521	0,0522	0,0515	0,0008	1,4641	
CP34	100	0,0533	0,0531	0,0529	0,0525	0,0528	0,0524	0,0523	0,0521	0,0521	0,0523	0,0521	0,0525	0,0526	0,0528	0,0529	0,0548	0,0536	0,0536	0,0536	0,0535	0,0529	0,0007	1,2992	
CP35	100	0,0575	0,0575	0,0559	0,0560	0,0563	0,0559	0,0560	0,0560	0,0562	0,0565	0,0577	0,0565	0,0564	0,0576	0,0562	0,0561	0,0561	0,0559	0,0561	0,0558	0,0564	0,0006	1,1204	
CP36	100	0,0554	0,0555	0,0555	0,0555	0,0556	0,0557	0,0561	0,0564	0,0564	0,0567	0,0565	0,0565	0,0565	0,0564	0,0561	0,0560	0,0559	0,0560	0,0562	0,0564	0,0561	0,0004	0,7400	
CP37	100	0,0553	0,0556	0,0571	0,0560	0,0561	0,0563	0,0566	0,0582	0,0571	0,0572	0,0572	0,0573	0,0586	0,0573	0,0574	0,0574	0,0573	0,0573	0,0574	0,0577	0,0570	0,0008	1,4450	
CP38	100	0,0520	0,0559	0,0554	0,0547	0,0543	0,0541	0,0542	0,0543	0,0542	0,0543	0,0541	0,0540	0,0536	0,0537	0,0538	0,0534	0,0534	0,0533	0,0530	0,0533	0,0540	0,0007	1,3725	
CP39	200	0,1014	0,0998	0,0996	0,0999	0,1002	0,0993	0,0991	0,0984	0,0980	0,0979	0,0977	0,0990	0,0991	0,0975	0,0973	0,0966	0,0957	0,0956	0,0946	0,0937	0,0980	0,0020	2,0301	
CP40	200	0,0879	0,0878	0,0890	0,0878	0,0888	0,0889	0,0874	0,0874	0,0874	0,0887	0,0886	0,0875	0,0883	0,0884	0,0867	0,0874	0,0861	0,0871	0,0849	0,0832	0,0875	0,0014	1,6167	
CP41	200	0,0811	0,0811	0,0807	0,0807	0,0804	0,0807	0,0819	0,0808	0,0805	0,0805	0,0803	0,0803	0,0800	0,0811	0,0801	0,0798	0,0796	0,0798	0,0793	0,0788	0,0804	0,0007	0,8940	
CP42	200	0,0916	0,0915	0,0915	0,0917	0,0932	0,0936	0,0920	0,0915	0,0928	0,0917	0,0919	0,0917	0,0919	0,0920	0,0920	0,0923	0,0926	0,0926	0,0927	0,0932	0,0922	0,0006	0,6967	
CP43	200	0,0859	0,0862	0,0864	0,0865	0,0867	0,0869	0,0870	0,0871	0,0875	0,0887	0,0888	0,0877	0,0880	0,0880	0,0883	0,886	0,0890	0,0892	0,0891	0,0891	0,0877	0,0011	1,2379	
CP44	200	0,0938	0,0936	0,0938	0,0955	0,0937	0,0949	0,0952	0,0946	0,0944	0,0936	0,0930	0,0929	0,0929	0,0926	0,0917	0,0934	0,0916	0,0920	0,0922	0,0916	0,0934	0,0012	1,2691	
CP45	200	0,0891	0,0891	0,0891	0,0892	0,0894	0,0894	0,0890	0,891	0,0884	0,0884	0,0890	0,0888	0,0893	0,0894	0,0890	0,0888	0,0886	0,0891	0,0885	0,0880	0,0886	0,0016	1,7721	
CP46	300	0,0484	0,0485	0,0487	0,0485	0,0488	0,0489	0,0490	0,0490	0,0489	0,0489	0,0491	0,0493	0,0492	0,0495	0,0498	0,0499	0,0501	0,0503	0,0505	0,0501	0,0493	0,0006	1,2803	
CP47	300	0,0435	0,0438	0,0438	0,0446	0,0446	0,0451	0,0466	0,0454	0,0454	0,0456	0,0464	0,0461	0,0466	0,0462	0,0460	0,0457	0,0445	0,0442	0,0452	0,0428	0,0451	0,0011	2,4374	
CP48	300	0,0441	0,0426	0,0441	0,0427	0,0428	0,0430	0,0445	0,0433	0,0448	0,0436	0,0449	0,0435	0,0435	0,0434	0,0446	0,0442	0,0427	0,0421	0,0423	0,0405	0,0434	0,0011	2,4518	
CP49	300	0,0558	0,0561	0,0563	0,0566	0,0566	0,0567	0,0567	0,0566	0,0565	0,0563	0,0564	0,0564	0,0563	0,0563	0,0563	0,0562	0,0560	0,0556	0,0559	0,0553	0,0563	0,0004	0,6724	
CP50	300	0,0503	0,0491	0,0507	0,0508	0,0496	0,0506	0,0515	0,0508	0,0516	0,0561	0,0494	0,0503	0,0495	0,0506	0,0494	0,0493	0,0492	0,0503	0,0502	0,0489	0,0504	0,0016	3,0970	
CP51	300	0,0502	0,0505	0,0504	0,0503	0,0519	0,0509	0,0510	0,0510	0,0509	0,0507	0,0521	0,0518	0,0504	0,0502	0,0513	0,0498	0,0497	0,0500	0,0499	0,0498	0,0506	0,0007	1,4037	
CP52	300	0,0512	0,0511	0,0512	0,0510	0,0507	0,0504	0,0505	0,0503	0,0501	0,0501	0,0501	0,0500	0,0499	0,0498	0,0500	0,0498	0,0499	0,0500	0,0491	0,0497	0,0502	0,0006	1,1102	
CP53	400	0,0457	0,0448	0,0450	0,0464	0,0465	0,0455	0,0466	0,0454	0,0455	0,0453	0,0454	0,0467	0,0468	0,0455	0,0468	0,0468	0,0467	0,0456	0,0455	0,0472	0,0460	0,0007	1,5832	
CP54	400	0,0374	0,0360	0,0361	0,0375	0,0359	0,0359	0,0372	0,0372	0,0358	0,0371	0,0358	0,0369	0,0367	0,0355	0,0351	0,0359	0,0345	0,0343	0,0342	0,0342	0,0380	0,0011	3,0352	
CP55	400	0,0294	0,0295	0,0294	0,0305	0,0293	0,0292	0,0291	0,0291	0,0289	0,0289	0,0289	0,0287	0,0285	0,0282	0,0281	0,0281	0,0280	0,0276	0,0272	0,0265	0,0286	0,0009	3,1810	
CP56	400	0,0314	0,0314	0,0314	0,0317	0,0316	0,0319	0,0318	0,0318	0,0317	0,0316	0,0316	0,0317	0,0315	0,0315	0,0319	0,0320	0,0322	0,0319	0,0321	0,0320	0,0317	0,0002	0,7303	
CP57	400	0,0292	0,0294	0,0285	0,0298	0,0299	0,0300	0,0304	0,0290	0,0301	0,0301	0,0302	0,0289	0,0302	0,0290	0,0290	0,0291	0,0290	0,0303	0,0292	0,0292	0,0295	0,0006	1,9871	
CP58	400	0,0314	0,0304	0,0316	0,0305	0,0318	0,0308	0,0319	0,0306	0,0307	0,0308	0,0308	0,0309	0,0309	0,0309	0,0321	0,0308	0,0308	0,0306	0,0319	0,0311	0,0311	0,0005	1,6901	
CP59	400	0,0361	0,0363	0,0364	0,0364	0,0365	0,0365	0,0364	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365	0,0365	0,0366	0,0365	0,0365	0,0365	0,0366	0,0365	0,0001	0,3203	

Tabela 9.17: Tempo correspondente a 25% da energia para o ganho de 2x

AMOSTRA	GRUPO (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	TEMPO MÉDIO CORRESPONDENTE A 25% DA ENERGIA (s)	DESVIO PADRÃO (s)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	
CP25	20	0,000178	0,000178	0,000179	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000000	0,125587
CP26	20	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000167	0,000166	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000001	0,330489
CP27	20	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000000	0,130349	
CP28	20	0,000175	0,000175	0,000175	0,000175	0,000175	0,000175	0,000174	0,000174	0,000174	0,000173	0,000173	0,000173	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000171	0,000171	0,000171	0,000171	0,000170	0,000002	0,965241	
CP29	20	0,000160	0,000160	0,000159	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000159	0,000160	0,000160	0,000000	0,526037	
CP30	20	0,000172	0,000173	0,000171	0,000172	0,000172	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000174	0,000175	0,000176	0,000000	0,879679	
CP31	20	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000155	0,000000	0,071911	
CP32	100	0,000192	0,000192	0,000192	0,000192	0,000192	0,000192	0,000192	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000193	0,000000	0,148490	
CP33	100	0,000148	0,000148	0,000148	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000149	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000001	0,342417	
CP34	100	0,000153	0,000155	0,000155	0,000155	0,000155	0,000156	0,000156	0,000156	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000157	0,000000	0,751488	
CP35	100	0,000174	0,000174	0,000173	0,000173	0,000174	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000173	0,000172	0,000001	0,334007	
CP36	100	0,000179	0,000179	0,000179	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000178	0,000001	1,319781	
CP37	100	0,000151	0,000151	0,000151	0,000152	0,000152	0,000151	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000152	0,000000	0,146742	
CP38	100	0,000160	0,000159	0,000158	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000156	0,000157	0,000157	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000158	0,000001	0,888089	
CP39	200	0,000190	0,000190	0,000190	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000191	0,000192	0,000192	0,000193	0,000193	0,000193	0,000001	0,503582	
CP40	200	0,000203	0,000203	0,000203	0,000203	0,000204	0,000205	0,000206	0,000207	0,000209	0,000209	0,000211	0,000211	0,000211	0,000211	0,000211	0,000209	0,000209	0,000208	0,000208	0,000207	0,000207	0,000003	1,479564	
CP41	200	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000195	0,000196	0,000195	0,000197	0,000197	0,000197	0,000197	0,000197	0,000198	0,000000	0,454488	
CP42	200	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000264	0,000000	0,077755	
CP43	200	0,000211	0,000211	0,000211	0,000211	0,000211	0,000211	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000212	0,000213	0,000213	0,000213	0,000213	0,000213	0,000213	0,000001	0,950231	
CP44	200	0,000231	0,000231	0,000231	0,000231	0,000231	0,000231	0,000231	0,000230	0,000230	0,000230	0,000229	0,000229	0,000229	0,000229	0,000229	0,000229	0,000229	0,000228	0,000226	0,000226	0,000226	0,000002	0,768660	
CP45	200	0,000226	0,000226	0,000226	0,000227	0,000227	0,000226	0,000226	0,000226	0,000226	0,000226	0,000226	0,000226	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000224	0,000224	0,000224	0,000001	0,422612	
CP46	300	0,000265	0,000264	0,000262	0,000262	0,000261	0,000261	0,000260	0,000258	0,000258	0,000257	0,000257	0,000257	0,000257	0,000256	0,000256	0,000256	0,000256	0,000255	0,000254	0,000253	0,000253	0,000000	1,325758	
CP47	300	0,000314	0,000313	0,000313	0,000313	0,000314	0,000314	0,000314	0,000314	0,000314	0,000315	0,000316	0,000317	0,000317	0,000317	0,000316	0,000316	0,000315	0,000314	0,000314	0,000313	0,000313	0,000001	0,434390	
CP48	300	0,000232	0,000233	0,000235	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000232	0,000233	0,000233	0,000234	0,000235	0,000236	0,000237	0,000238	0,000240	0,000000	1,199718	
CP49	300	0,00239	0,00239	0,00239	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00238	0,00239	0,00239	0,00239	0,000000	0,191637	
CP50	300	0,000308	0,000308	0,000309	0,000309	0,000309	0,000311	0,000310	0,000312	0,000312	0,000305	0,000309	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000304	0,000305	0,000305	0,000305	0,000000	0,000003	0,855423
CP51	300	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000241	0,000242	0,000241	0,000242	0,000242	0,000000	0,081741	
CP52	300	0,000245	0,000246	0,000246	0,000246	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000244	0,000244	0,000245	0,000245	0,000245	0,000245	0,000001	0,292529	
CP53	400	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000341	0,000000	0,074781	
CP54	400	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000356	0,000356	0,000355	0,000355	0,000355	0,000356	0,000356	0,000355	0,000000	0,274314	
CP55	400	0,000421	0,000421	0,000421	0,000422	0,000422	0,000422	0,000422	0,000422	0,000420	0,000418	0,000418	0,000418	0,000417	0,000417	0,000416	0,000416	0,000414	0,000414	0,000413	0,000410	0,000410	0,000000	0,812013	
CP56	400	0,000330	0,000331	0,000331	0,000330	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000331	0,000333	0,000333	0,000333	0,000333	0,000333	0,000331	0,000331	0,000331	0,000001	0,258852	
CP57	400	0,000408	0,000407	0,000407	0,000405	0,000405	0,000406	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000403	0,000403	0,000403	0,000404	0,000403	0,000403	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000403	0,000001	0,369613	
CP58	400	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000385	0,000384	0,000384	0,000384	0,000384	0,000384	0,000384	0,000385	0,000385	0,000385	0,000000	0,115357	
CP59	400	0,000392	0,000392	0,000392	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000393	0,000394	0,000393	0,000393	0,000394	0,000394	0,000394	0,000394	0,000394	0,000393	0,000001	0,165689	

