

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado

CAMILA FORIGO

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM
CONCRETOS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS POR
MEIO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

MARINGÁ
2017

CAMILA FORIGO

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM
CONCRETOS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS POR
MEIO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vanalli

MARINGÁ
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

F721d Forigo, Camila
Determinação da resistência à compressão em concretos expostos a altas temperaturas por meio de ensaios não destrutivos / Camila Forigo. -- Maringá, 2017.
123 f. : il. color., figs., tabs. quadro

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vanalli.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

1. Concreto - Altas temperaturas. 2. Concreto - Resistência à compressão. 3. Concreto - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. 4. Concreto - Índice esclerométrico. I. Vanalli, Leandro, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 21.ed. 620.136

AMMA-003423

Aos meus pais pelo constante apoio, incentivo e
dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por todas as oportunidades que me deu.

Aos meus pais, Laelia e Clovis, que sempre estiveram presentes, me dando força e incentivo em momentos difíceis, além da confiança que depositam em mim.

Ao meu orientador, Leandro Vanalli, por todo o conhecimento, orientação, paciência e principalmente tranquilidade que sempre me passou.

Ao meu colega de mestrado, Yuri Danilo Lopes, por todo o apoio e ajuda, estando presente do começo ao fim dos ensaios para tudo o que fosse necessário.

Aos meus colegas de sala do mestrado, Ludmila, Fernanda, Taienne e Arthur, por todos os estudos e almoços juntos, hospedagens, caronas, procura de artigos, enfim por toda a amizade durante esses dois anos.

As minhas amigas, Carolina, Isadora, Ana Caroline, Priscila por sempre ter um ombro amigo, ouvir todas as histórias da dissertação/mestrado, às vezes nem entendendo nada, pela amizade sincera e verdadeira.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil – DEC/UEM pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários e colegas da Universidade Estadual de Maringá, principalmente à Marli Silveira e ao técnico do laboratório Sidnei Coutinho pela disposição em ajudar sempre.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade e aprendizado.

A Universidade Paranaense – UNIPAR e seus funcionários, pela disponibilidade dos equipamentos e espaço para a realização dos ensaios, bem como a disposição em ajudar.

A concreteira SUPERMIX – Umuarama, por todo o material fornecido para a realização deste trabalho e em especial ao funcionário Diego Andrade, sendo sempre muito solícito.

Ao Corpo de Bombeiros da cidade de Umuarama, pela disponibilidade dos funcionários e empréstimo do equipamento de proteção individual.

A todos os amigos, familiares e professores que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste sonho. Sou muito grata!

RESUMO

Apesar da situação de incêndio ser considerada uma ação excepcional em construções, estas estão sujeitas a este acontecimento em qualquer fase da vida útil, causando redução nas propriedades mecânicas do concreto, inclusive na resistência à compressão. Neste contexto, as estruturas devem ser investigadas, podendo ser utilizados ensaios destrutivos ou não destrutivos para a análise do concreto, porém para a primeira técnica, onde há a extração de corpo de prova, na estrutura que já foi submetida a altas temperaturas pode ser ainda mais prejudicial. Por esta razão, este trabalho tem como objetivo correlacionar os resultados dos principais métodos de ensaios não destrutivos (ultrassom e esclerometria) com o ensaio destrutivo (ensaio à compressão) em concretos. Para isto foram expostos amostras de concretos de f_{ck} igual a 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa, com idades de 7, 21 e 28 dias, em temperatura ambiente (como base para análise), 150°C, 300°C, 450°C, 600°C, 750°C e 900°C, após retirado do forno os corpos de prova eram resfriados lentamente (ao ar livre) e bruscamente (submerso em água), 24 horas depois era realizado o ensaio da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e de esclerometria, com posterior ensaio à compressão. Por fim, foi obtido bom valor de correlação entre a velocidade ultrassônica e o ensaio à compressão e razoável correlação com a técnica da esclerometria, que quando estimado 0valores de resistência, se mostrou com pouca proximidade dos valores obtidos por meio do ensaio destrutivo. E em análise realizada conforme a classe de concreto ou forma de resfriamento, os valores de correlações das velocidades ultrassônicas se mostraram ainda melhores.

Palavras-chave: Altas temperaturas no concreto. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Índice esclerométrico. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Despite the fire situation is considered rarity in a building, it's subject to this event at any stage of life, causing a reduction in the mechanical properties of concrete, including the compressive strength. It is necessary to evaluation of a professional as to the efficiency of the structure as a whole, where destructive or non-destructive tests can be used for the analysis of the concrete, but the destructive ones have disadvantages in relation to the non-destructive ones. For this reason, this study aims to correlate the results of the main non-destructive testing methods (ultrasonic pulse and rebound hammer) to destructive testing (compressive strength) in concrete. For this, samples of concrete with fck equal to 20 MPa, 30 MPa and 50 MPa, at ages of 7, 21 and 28 days were exposed at environment temperature (as a base for analysis), 150 ° C, 300 ° C, 450 ° C, 600 ° C, 750 ° C and 900 ° C, after removed from the oven the specimens were cooled slowly (to the air free) and abruptly (submerged in water), 24 hours later the ultrasound velocity and the sclerometric index were read, with a subsequent compressive strength test. Finally, a correlation value was obtained between ultrasonic velocities and compressive strengths of 0.859, while between sclerometric index and compressive strength it was 0.638. However, analyzing according to concrete class or cooling form, the values of correlations of the ultrasonic velocity proved better than for the sclerometric index.

Key-words: High temperatures in concrete. Ultrasonic wave propagation velocity. Rebound hammer. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Exemplo de lascamento do concreto	16
Figura 2.1	Princípio de operação	21
Figura 2.2	Ensaio de ultrassom em concreto com diferentes situações	22
Figura 2.3	Transmissão direta	23
Figura 2.4	Transmissão indireta	23
Figura 2.5	Correlação entre os dados obtidos pela transmissão indireta	24
Figura 2.6	Transmissão semidireta	24
Figura 2.7	Correlação entre velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão na pasta de cimento, argamassa e concreto	29
Figura 2.8	Influência da dimensão máxima do agregado na correlação entre as velocidades de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão	30
Figura 2.9	Influência do tipo de cimento e da utilização de aditivos na correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto	32
Figura 2.10	Variação da velocidade das ondas ultrassônicas com o passar do tempo	33
Figura 2.11	Influência da idade do concreto em relação à velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão	34
Figura 2.12	Efeito da umidade em relação à velocidade de pulso ultrassônico na pasta, argamassa e concreto	37
Figura 2.13	Influência das barras paralelas ao percurso da onda	39
Figura 2.14	Influência das barras transversais ao percurso da onda	40
Figura 2.15	Seção vertical do esclerômetro tipo Schmidt	45
Figura 2.16	Representação esquemática do método do esclerômetro de reflexão	46
Figura 2.17	Resistência x índice esclerométrico com seixos de diferentes origens	49
Figura 2.18	Fases do incêndio no decorrer do tempo	54
Figura 2.19	Redução da resistência à compressão em concretos	56

	compostos com diferentes agregados	
Figura 2.20	Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento	57
Figura 2.21	Curvas de incêndio padrão adotadas por diversos países	58
Figura 3.1	Fluxograma metodológico da pesquisa	59
Figura 3.2	Granulometria do agregado graúdo	62
Figura 3.3	Granulometria do agregado miúdo (areia natural)	62
Figura 3.4	Granulometria do agregado miúdo (areia artificial)	63
Figura 3.5	Forno utilizado para submeter os corpos de prova a altas temperaturas	64
Figura 3.6	Aparelho utilizado nos ensaios de esclerometria	64
Figura 3.7	Aparelho utilizado nos ensaios de ultrassonografia	65
Figura 3.8	Prensa hidráulica utilizada nos ensaios à compressão	66
Figura 3.9	Resfriamento brusco	67
Figura 3.10	Ensaio de esclerometria	68
Figura 3.11	Posicionamento dos pontos para utilização do esclerômetro	68
Figura 3.12	Calibração do esclerômetro	69
Figura 3.13	Calibração do aparelho de ultrassom	70
Figura 3.14	Ensaio ultrassônico com transmissão direta	71
Figura 4.1	Médias em porcentagem das resistências à compressão residuais	74
Figura 4.2	Médias em porcentagem das resistências à compressão por classe de concreto	75
Figura 4.3	Resistência à compressão do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	76
Figura 4.4	Resistência à compressão do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	77
Figura 4.5	Resistência à compressão do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	77
Figura 4.6	Resistências à compressão conforme forma de resfriamento	78
Figura 4.7	Média das resistências à compressão por tipo de resfriamento	79
Figura 4.8	Recuperação da resistência à compressão em relação à resistência inicial do concreto em função do tempo de	79

	hidratação	80
Figura 4.9	Médias em porcentagem das velocidades ultrassônicas residuais	81
Figura 4.10	Média das velocidades das ondas de ultrassom por classe de concreto	82
Figura 4.11	Velocidade ultrassônica do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	83
Figura 4.12	Velocidade ultrassônica do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	83
Figura 4.13	Velocidade ultrassônica do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	84
Figura 4.14	Velocidade ultrassônica conforme forma de resfriamento	85
Figura 4.15	Médias em porcentagem dos índices esclerométricos residuais	86
Figura 4.16	Média dos índices esclerométricos por classe de concreto	87
Figura 4.17	Índice esclerométrico do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	88
Figura 4.18	Índice esclerométrico do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	88
Figura 4.19	Índice esclerométrico do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura	89
Figura 4.20	Índice esclerométrico conforme forma de resfriamento	91
Figura 4.21	Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão	92
Figura 4.22	Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto	93
Figura 4.23	Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento lento	94
Figura 4.24	Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento brusco	96
Figura 4.25	Curva de correlação entre índices esclerométricos e	

	resistências à compressão	
Figura 4.26	Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto	97
Figura 4.27	Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento lento	98
Figura 4.28	Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento brusco	99
Figura 4.29	Resistências obtidas pelos métodos estudados	100
Figura 4.30	Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 20 MPa	101
Figura 4.30	Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 30 MPa	101
Figura 4.32	Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 50 MPa	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores de CV para o ensaio de ultrassom	27
Tabela 2.2	Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rocha	28
Tabela 2.3	Correções para as velocidades de pulso ultrassônico devido as variações de temperatura	36
Tabela 2.4	Fatores de correção das velocidades de propagação ultrassônica – Eixo da barra paralelo ao percurso da onda	40
Tabela 2.5	Fatores de correção das velocidades de propagação ultrassônica – Eixo da barra perpendicular ao percurso da onda	41
Tabela 2.6	Normas para determinação da velocidade de ondas ultrassônicas no concreto	42
Tabela 2.7	Normas para o método de esclerometria	52
Tabela 3.1	Composição por m ³ do concreto fck 20 MPa	60
Tabela 3.2	Composição por m ³ do concreto fck 30 MPa	60
Tabela 3.3	Composição por m ³ do concreto fck 50 MPa	61
Tabela 3.4	Obtenção do fator de correção	69
Tabela 3.5	Procedimento para obtenção do valor de IE	70
Tabela 3.6	Procedimento para obtenção da velocidade de propagação da onda ultrassônica	72
Tabela 4.1	Curvas para correlação da resistência à compressão e a velocidade de ondas ultrassônicas	90
Tabela 4.2	Curvas para correlação da resistência à compressão e o índice esclerométrico	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Transformações sofridas pela pasta de cimento durante aquecimento	55
------------	---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 JUSTIFICATIVAS	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	20
2.1.1 Método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	20
2.1.1.1 Descrição do método	21
2.1.1.2 Vantagens e limitações	25
2.1.1.3 Aplicações	25
2.1.1.4 Acurácia.....	26
2.1.1.5 Fatores que influenciam os resultados do ensaio.....	27
2.1.1.5.1 Tipo, teor e graduação do agregado graúdo	28
2.1.1.5.2 Tipo de cimento e aditivos.....	30
2.1.1.5.3 Relação água/cimento e agregado/cimento	33
2.1.1.5.4 Idade do concreto	34
2.1.1.5.5 Condições da superfície e acoplamento dos transdutores ao concreto.....	35
2.1.1.5.6 Temperatura do concreto	36
2.1.1.5.7 Teor de umidade	36
2.1.1.5.8 Comprimento de propagação da onda ultrassônica, tamanho da peça e frequência do transdutores.....	38
2.1.1.5.9 Influência do estado de tensões	38
2.1.1.5.10 Presença de armaduras e fissuras	39
2.1.1.6 Normalização.....	41
2.1.1.7 Recomendações quanto às curvas de correlação	42
2.1.2 Método do esclerômetro de reflexão	44
2.1.2.1 Descrição do método	45
2.1.2.2 Vantagens e limitações	46
2.1.2.3 Aplicações	47

2.1.2.4 Acurácia.....	47
2.1.2.5 Fatores que influenciam os resultados.....	48
2.1.2.5.1 Condições e umidade da superfície de ensaio	48
2.1.2.5.2 Tipo e dimensão do agregado graúdo.....	49
2.1.2.5.3 Idade e tipo de cura do concreto	50
2.1.2.5.4 Tipo e teor de cimento	50
2.1.2.5.5 Carbonatação	51
2.1.2.6 Operação do esclerômetro	51
2.1.2.7 Normalização.....	52
2.1.2.8 Curvas de correlação	52
2.2 ESTUDO SOBRE INCÊNDIO	53
2.2.1 Fases do incêndio	53
2.2.2 Comportamento do concreto sob a ação de incêndio	54
2.2.3 Efeitos em relação às propriedades mecânicas	55
2.2.4 Simulação experimental de incêndio	57
3 METODOLOGIA.....	59
3.1 MATERIAIS	60
3.1.1 Concreto	60
3.1.1.1 Cimento	61
3.1.1.2 Agregado graúdo	61
3.1.1.3 Agregado miúdo	62
3.1.1.4 Água	63
3.1.1.5 Aditivo.....	63
3.1.2 Forno.....	63
3.1.3 Aparelho de esclerometria	64
3.1.4 Aparelho de ultrassonografia	64
3.1.5 Material acoplante.....	65
3.1.6 Prensa hidráulica.....	65
3.2 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	66
3.3 EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS E RESFRIAMENTO	66
3.4 ENSAIO DE ESCLEROMETRIA	67
3.5 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	70
3.6 ENSAIO À COMPRESSÃO.....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	73
4.1.1 Efeito da temperatura	73
4.1.2 Efeito da classe do concreto	74
4.1.3 Efeito da idade do concreto.....	76
4.1.4 Efeito da forma de resfriamento	77
4.2 VELOCIDADE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	80
4.2.1 Efeito da temperatura	80
4.2.2 Efeito da classe do concreto	81
4.2.4 Efeito da forma de resfriamento	83
4.3 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO	84
4.3.1 Efeito da temperatura	85
4.3.2 Efeito da classe do concreto	86
4.2.3 Efeito da idade do concreto.....	87
4.3.4 Efeito da forma de resfriamento	89
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	89
4.5 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	94
4.6 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO OBTIDAS PELOS DIFERENTES MÉTODOS ESTUDADOS NESTE TRABALHO	99
5 CONCLUSÃO.....	102
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A - Média das resistências à compressão em corpos de prova	111
APÊNDICE B - Média das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas em corpos de prova.....	115
APÊNDICE C - Média dos índices esclerométricos em corpos de prova.....	119
ANEXO A - Especificações das características físicas, químicas e mecânicas do cimento	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos tempos o concreto tem sido um material muito utilizado, pelo fato de ser facilmente moldável, resistente aos agentes atmosféricos e ao desgaste mecânico, sendo também uma alternativa econômica, uma vez que é constituído de matéria prima barata (SOUZA; MACHADO, 2013).

Entretanto, na grande maioria das vezes em que o concreto é utilizado em uma estrutura ele é dimensionado em relação a sua resistência à compressão em certas condições, sendo elas: temperatura e umidade controlada em determinada idade. Sendo esta propriedade mecânica considerada de fundamental importância para um projeto (MACHADO, 2005).

No entanto, embora a ocorrência de incêndios em edificações seja considerado como uma ação excepcional, qualquer fase da vida útil de uma construção esta sujeita a ela, mas deve ser combatido rapidamente na tentativa de diminuir graves consequências (MOREIRA, 2013). Mesmo o concreto sendo um material que apresenta bom desempenho nestas situações por ser incombustível, não liberar gases tóxicos e ter baixa condutividade térmica, ainda assim ele sofre redução das propriedades mecânicas, inclusive da resistência à compressão, pelos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante o incêndio (OLIVEIRA, 2006). Além dessa perda de propriedades, o incêndio também pode provocar manifestações patológicas no concreto como o lascamento (*spalling*) que é o desprendimento de camadas ou pedaços da superfície quando expostos a elevadas temperaturas (LIMA, 2005).

Figura 1.1 – Exemplo de lascamento do concreto



Fonte: Nince (2006)

Para a avaliação da resistência à compressão do concreto “*in loco*” existem duas formas: ensaios destrutivos e não destrutivos (ENDs). O ensaio destrutivo consiste em retirar amostras do concreto “*in situ*” e posteriormente romper em ensaios de compressão. Porém, Machado (2005) afirma que este método possui a desvantagem de ser restrito quanto aos locais em que os testemunhos são retirados para que não ocorra comprometimento da estabilidade estrutural, sendo então restrito o número de amostras, que consequentemente gera redução da confiabilidade dos resultados. Já os ensaios não destrutivos possuem a vantagem de maior quantidade e rapidez dos ensaios e não causam danos ao elemento estrutural, possibilitando uma investigação mais ampla da estrutura. Entretanto, deve ser ter cuidado ao analisar, correlacionando com curvas adequadas, pois são vários os fatores que podem interferir nos resultados.

Existem diversos ensaios que se encaixam neste modelo, mas os mais conhecidos no Brasil são os métodos da esclerometria e do ultrassom.

Neste contexto, este trabalho analisará a eficácia dos métodos não destrutivos para a determinação da resistência à compressão em concretos submetidos a altas temperaturas, correlacionando as leituras realizadas pelos métodos da esclerometria e do ultrassom com o método destrutivo, ensaio à compressão (mais difundido) em concretos de classes C20, C30 e C50 MPa após atingirem diversas temperaturas, até 900°C.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O comportamento mecânico residual de estruturas de concreto submetidas a situações de incêndio ainda é um assunto pouco explorado na Engenharia Civil, sobretudo com metodologias experimentais. Existem alguns trabalhos que apresentam uma dependência desse comportamento de acordo com a classe de concreto. Buchanan (2002) comenta que comparando-se o concreto de alta resistência com o concreto convencional, o primeiro em temperaturas ambientes é muito mais eficiente, porém em altas temperaturas resiste menos que os convencionais. Isso explica-se pelo fato de que os concretos tradicionais apesar de apresentarem uma menor resistência, ainda assim normalmente resistem à ação do calor pela água presente na matriz cimentícia evaporar gradualmente através da estrutura de poros existente e o concreto de alta resistência possuir poucos poros para ocorrer essa evaporação.

Portanto, é necessário o estudo experimental em diferentes faixas de resistências à compressão, pois dependendo da classe do concreto as reações diferem tanto durante o

incêndio, como nas propriedades mecânicas residuais e nos fatores que interferem os ensaios não destrutivos.

Deve-se ainda salientar que existem perdas financeiras normalmente significativas quando da ocorrência de incêndios. Não somente pelo custo de reparação da edificação, mas há casos que impactam em prejuízos sócio-econômicos, como em obras de edificações atrasadas, interrupção do tráfego em túneis, etc. Sendo ainda economicamente viável recuperar a demolir ou reconstruir, tanto no aspecto financeiro quanto em tempo necessário para a re-ocupação da construção.

Para a recuperação de edificações com problemas patológicos, sendo oriundos ou não de situações de incêndio, estudos criteriosos são muito importantes. Segundo Lopes (2016) os ensaios para avaliação da resistência à compressão do concreto se resumem a dois motivos: ou há suspeitas de que o concreto que se encontra presente na estrutura não está se comportando de acordo com as especificações de resistência de projeto, ou quando há necessidade de recuperação de alguma patologia apresentada.

Sendo assim, nesta investigação, a utilização de técnicas destrutivas e não destrutivas visam a obtenção de parâmetros de comportamento e de resistência à compressão do concreto submetido à situação de incêndio que posteriormente, possam ser adotados em perícias pós-incêndio com métodos não destrutivos, que como já comentado, podem ser mais rápidos e não causar maiores danos às estruturas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar a resistência à compressão em concretos de variadas resistências iniciais, após expostos a diversos patamares de temperaturas, por meio de ensaios não destrutivos (ultrassom e esclerometria), tendo-se como valores de referência os obtidos em ensaios destrutivos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) realizar um estudo teórico dos assuntos nos quais a pesquisa esta fundamentada, efetuando uma revisão bibliográfica a cerca dos ensaios não destrutivos (ultrassom e esclerômetro) e do comportamento do concreto após exposto ao incêndio;

- b) verificar a resistência à compressão do concreto de diferentes classes, após exposição a vários patamares de temperaturas;
- c) analisar as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas e índices esclerométricos após o concreto ser exposto a diversos patamares de temperatura, submetido ao resfriamento brusco e lento;
- d) correlacionar a velocidade ultrassônica e o índice esclerométrico com as resistências obtidas a partir do ensaio à compressão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O concreto é um material que vem sendo muito utilizado, pode ser utilizado em projetos e soluções estruturais mais arrojados devido às características diversificadas deste material. No entanto, as propriedades têm que satisfazer as propriedades solicitadas em projeto por toda a vida útil da estrutura, para a verificação destas podem ser utilizados os ensaios não destrutivos que permitem a inspeção sem danificar a estrutura.

Os ensaios não destrutivos aplicáveis em concreto podem ser classificados de duas formas distintas:

- Ensaios que realizam a medição de alguma propriedade do concreto, e então se correlaciona com a resistência, durabilidade e propriedades elásticas do material;
- Ou ensaios em que determinam posições, tamanhos e condições das armaduras, áreas de mal adensamento, vazios, fissuras.

2.1.1 Método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

De acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006) as primeiras publicações a respeito de medições da velocidade de pulsos gerados mecanicamente no concreto apareceram em meados de 1940, nos EUA. Verificou-se que a velocidade depende principalmente das propriedades elásticas do material e é quase independente da geometria.

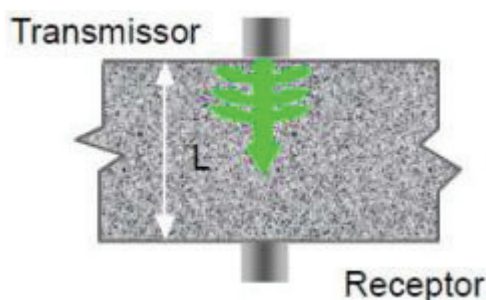
Alguns anos mais tarde no Canadá e Reino Unido foram realizados ensaios utilizando transdutores eletroacústicos, oferecendo maior controle sobre o tipo e frequência dos pulsos gerados, variando entre 20-150 kHz. Estes ensaios desenvolveram o método de ultrassom utilizado atualmente, tornando-se amplamente aceito em todo o mundo e produzido equipamentos comercializados tanto para uso em laboratórios, quanto em obra.

Segundo Chung e Law (1983) o desenvolvimento deste equipamento portátil ocorreu nos anos 60, operado com bateria e com mostrador digital do tempo de trânsito das ondas.

2.1.1.1 Descrição do método

Conforme Chies (2014) o método do ultrassom consiste em aplicar um pulso ultrassônico em um determinado local da peça utilizando o transdutor emissor e captar este pulso em outro local através do transdutor receptor, como exemplificado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Princípio de operação



Fonte: Lopes (2016)

De posse da distância entre os transdutores e o tempo decorrido entre a emissão e recepção do pulso, pode-se obter a velocidade média da propagação da onda ultrassônica, representado pela Equação 2.1 (ABNT NBR 8802:2013):

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Em que:

V – velocidade média de propagação do pulso ultrassônico (m/s)

L – distancia entre os transdutores (m)

T – tempo entre emissão e recepção da onda (s).

Entretanto, a velocidade média da propagação das ondas de pulso ultrassônico quando transita em um material sólido, depende diretamente da densidade e das propriedades elásticas deste material, conforme Equação 2.2 (BUNGEY, 1989):

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (2.2)$$

Onde:

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

V – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

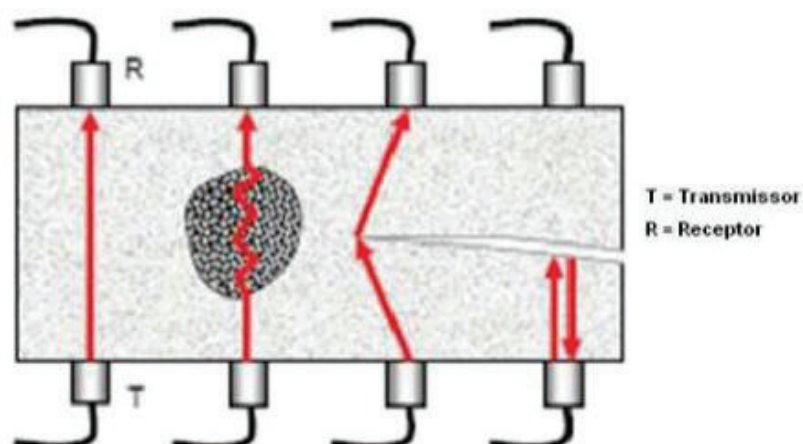
ρ – massa específica (kg/m³)

ν – coeficiente de Poisson dinâmico, 0,2 conforme ABNT NBR 6118:2014.

A velocidade da propagação das ondas depende principalmente do coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade, massa específica do concreto e a presença de armadura (BUNGEY, 1989). Contudo, também é influenciado pela qualidade do concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Na Figura 2.2 são apresentados diferentes modelos de qualidade do concreto que geram variadas situações de pulsos quando testados. No caso do concreto sólido o tempo de viagem é curto, pois não há obstáculos entre os transdutores. Já em concreto com vazios internos ou porosos, o tempo de travessia da onda é maior, o pulso é disperso, não se propagando pelos vazios e reduzindo a velocidade do pulso. Quando a onda atravessa em um local próximo à borda de uma fissura, o pulso atinge o transdutor receptor fazendo um caminho maior, pois sofre difração na borda fissura, ocasionando aparente velocidade de pulso menor que em um concreto sólido. E em casos, onde a fissura esta obstruindo completamente a passagem da onda, o pulso é refletido completamente, não sendo possível medir a velocidade de propagação (CHIES, 2014).

Figura 2.2 – Ensaio de ultrassom em concreto com diferentes situações

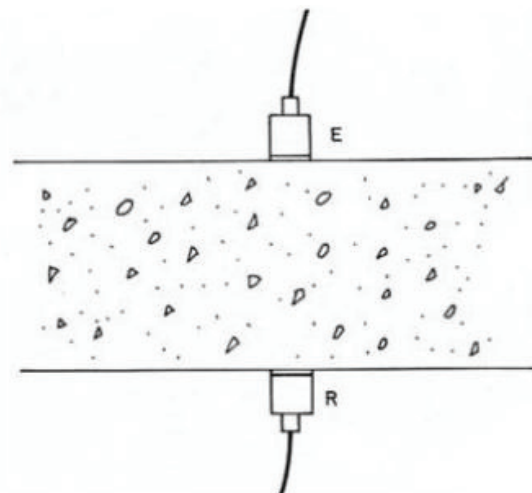


Fonte: Chies (2014)

Conforme a ABNT NBR 8802:2013 existem três maneiras de transmissão para se medir a velocidade de onda no concreto:

- Transmissão direta: Este é o arranjo mais recomendado, os transdutores se posicionam em faces opostas, como ilustrado pela Figura 2.3. Desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade.

Figura 2.3 - Transmissão direta

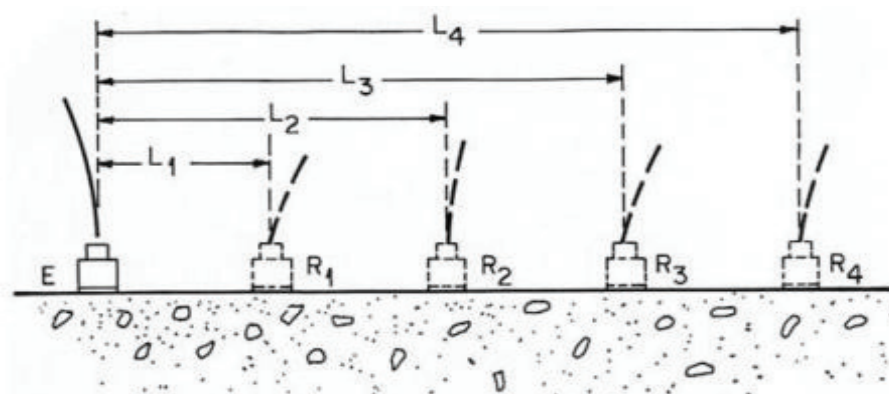


Fonte: ABNT NBR 8802:2013

- Transmissão indireta: Esta forma de transmissão é utilizada quando se tem acesso apenas a uma face do elemento, sendo que essa face deve ter comprimento suficiente para propiciar o deslocamento do transdutor-receptor.

Sendo necessário fixar o transdutor-emissor em um ponto (E) e posteriormente, realizar leituras do tempo de propagação da onda em pontos equidistantes e localizados em uma mesma reta do ponto (E), conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 – Transmissão indireta



Fonte: ABNT NBR 8802:2013.

Em seguida, local em um sistema cartesiano de eixos, as distâncias entre os pontos do transdutor-emissor e os pontos de leitura do transdutor-receptor, e os tempos lidos para que a onda ultrassônica percorra estas distâncias, a inclinação desta reta representa a velocidade de propagação de onda do material ensaiado, Figura 2.5.

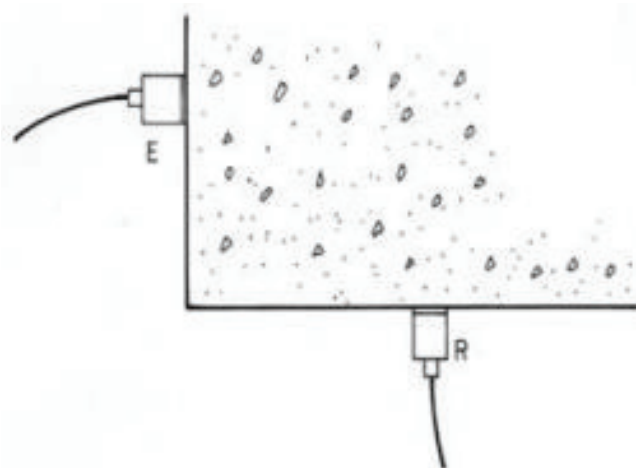
Figura 2.5 – Correlação entre os dados obtidos pela transmissão indireta



Fonte: ABNT NBR 8802:2013

- Transmissão semidireta: Este método de transmissão só deve ser utilizado quando não for possível usar o sistema direto, por não ter acesso a duas faces opostas, ou indireto, a única face não ter comprimento suficiente para serem realizadas as leituras. Neste arranjo os transdutores são posicionados em duas faces opostas, conforme Figura 2.6.

Figura 2.6 – Transmissão semidireta



Fonte: ABNT NBR 8802:2013

2.1.1.2 Vantagens e limitações

O equipamento utilizado para o método do ultrassom traz as vantagens de fácil manuseio, permitir a realização rápida das medidas das velocidades dos pulsos ultrassônicos e custo é relativamente baixo.

É um ensaio completamente não destrutivo, portanto não afeta a utilidade e durabilidade do elemento avaliado, permitindo a avaliação em diferentes idades.

Porém existem algumas limitações para este método, como por exemplo, a boa ligação entre os transdutores e o concreto é um ponto crítico, podendo acarretar em erro na determinação do tempo de propagação da onda de ultrassom (MALHOTRA; CARINO, 2004).

A interpretação dos resultados requer experiência de quem faz a leitura, para considerar diversos fatores que podem influenciar nas velocidades obtidas e não resultar em conclusões errôneas.

Os elementos de concreto com pouca idade geram valores de velocidades de onda ultrassônicas muito sensíveis a pequenas variações de resistências.

Como a velocidade de propagação da onda de ultrassom é maior no aço do que no concreto, é necessário evitar pontos com grande concentração de armadura, principalmente no sentido longitudinal ao da propagação das ondas.

No método de transmissão indireta as ondas se propagam através da camada superficial do elemento de concreto ensaiado, mas tem como limitação a possibilidade de apresentar menor velocidade se comparado a outras regiões da peça ensaiada (MALHOTRA; CARINO, 2004).

E segundo Phoon, Wee e Loi (1999) devido à influência das propriedades, proporções dos materiais constituintes, idade e teor de umidade do concreto, não existe uma relação teórica entre resistência e velocidade de propagação, sendo necessário estabelecer uma curva de correlação entre estas medidas.

1.1.1.3 Aplicações

Conforme a BS 1881: Part 201:1986 as principais aplicações deste método são:

- Determinação da uniformidade do concreto;
- Determinação da existência de fissuras;

- Estimativa da resistência à compressão do concreto, com condições de teste ideal e uso de curvas de correlação apropriada à mistura do concreto utilizado;
- Monitoramento da evolução da resistência;
- Avaliação da deterioração do concreto;
- Estimativa da espessura da camada de superfície, quando esta camada possui qualidade inferior ao interior do concreto devido à construção, intemperismo ou outros danos, como o fogo.

Porém a ABNT NBR 8802:2013, cita como principais aplicações para o método do ultrassom a verificação da homogeneidade do concreto, detecção de possíveis falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; monitoramento de variações no concreto ao longo do tempo, resultante de agressividade do meio principalmente pela ação de sulfatos.

Malhotra e Carino (2004) ainda acrescentam as seguintes aplicações:

- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico e do coeficiente de Poisson;
- Estudos relativos à hidratação do cimento e durabilidade do concreto;
- Inspeção de elementos estruturais armados submetidos à flexão.

Através do método de transmissão indireto é possível estimar a profundidade de fendas superficiais perpendiculares à superfície (MEDEIROS, 2007).

O método do ultrassom permite também verificar se houve alteração na qualidade do adensamento do concreto lançado na estrutura, a uniformidade do concreto recebido e estimar a resistência à compressão em idades mais avançadas (IRRIGARAY, 2012).

2.1.1.4 Acurácia

Na estimativa da resistência à compressão do concreto pelo método do ultrassom é possível ter limites de confiança de até 95%, com acurácia de ± 7 MPa, porém os ensaios devem ser realizados em condições ideais e utilizado a curva de correlação adequada ao concreto em estudo. É possível melhorar ainda mais esta estimativa, caso a densidade seja conhecida ou por combinação dos valores de repercussão medidos (BS 1881: Part 201, 1986).

Conforme Facaoaru (1984, apud Machado, 2005), a acurácia da estimativa de resistência por este método é a seguinte:

- 12 a 16% - quando existem corpos-de-prova ou testemunhos disponíveis e há conhecimento a respeito da composição do concreto.

- 14 a 18% - existem apenas corpos-de-prova ou testemunhos.
- 18 a 25% - apenas há conhecimento a respeito da composição do concreto.
- Acima de 30% - quando não existem corpos-de-prova ou testemunhos e não há conhecimento a respeito da composição do concreto, dependendo unicamente da experiência do profissional e da existência de dados auxiliares.

A ASTM C597:2009 afirma que a repetitividade dos resultados, coeficiente de variação (CV), do ensaio é de 2%, para distâncias entre os transdutores de 0,3m e 6m. A Tabela 2.1 apresenta a variabilidade das medições das velocidades ultrassônicas obtidas por diferentes pesquisadores.

Tabela 2.1 – Valores de CV para o ensaio de ultrassom

Referência	Coeficiente de variação, %	
	Faixa de variação dos valores de CV	Valores médios de CV
Keiller (1982)	0.5 a 1.5	1.1
Carette and Malhotra (1984)	0.1 a 0.8	0.4
Bocca (1984)	0.4 a 1.2	0.7
Yun et al. (1989)	0.4 a 1.1	0.6
Leshchinsky, Yu, and Goncharova (1990)	0.2 a 4.0	1.9
Phoon, Wee, and Loi (1999)	1.1 a 1.2	1.2

Fonte: ACI 228.1R (2003)

2.1.1.5 Fatores que influenciam os resultados do ensaio

Segundo Malhotra e Carino (2004) apesar de ser relativamente fácil o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico é importante realizar o ensaio de modo que possa ser reproduzido posteriormente e que apenas fatores resultantes da propriedade do concreto possam interferir. Separando-se em duas categorias, fatores resultantes diretamente das propriedades do concreto e fatores que afetam somente as medições de velocidade.

- Fatores que afetam as propriedades do concreto e por consequência, as medições da velocidade do pulso ultrassônico:
 - Tipo, teor, tamanho e graduação do agregado gráudo;
 - Tipo de cimento e aditivos;
 - Relação água-cimento;
 - Idade do concreto.

- Fatores que afetam apenas as medições da velocidade do pulso ultrassônico:
 - Perfeito acoplamento entre os transdutores e o concreto;
 - Temperatura do concreto;
 - Condições de umidade do concreto;
 - Comprimento de propagação da onda;
 - Tamanho e forma das amostras;
 - Nível de tensão;
 - Presença de armaduras.

Entretanto a ABNT NBR 8802:2013 apresenta como principais fatores que influenciam nos resultados do ensaio: distância entre os transdutores, presença de armadura (principalmente no sentido de propagação da onda), densidade do concreto (depende do traço e condições de concretagem), agregados (tipo, densidade e outras características), tipo de cimento e grau de hidratação, direção de ensaio da peça, tipo de adensamento do concreto, idade do concreto.

2.1.1.5.1 Tipo, teor e graduação do agregado graúdo

Diversos pesquisadores concluíram que a correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão do concreto varia em relação às características do agregado graúdo (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Segundo Chung e Law (1983) esta correlação se deve principalmente ao tipo e a proporção do agregado graúdo utilizado no concreto. Concretos produzidos com agregados graúdos mais densos ou com maiores quantidades de agregados resultam em velocidades maiores. A Tabela 2.2 apresenta a variação de velocidades para diferentes tipos de rochas normalmente utilizadas como agregados.

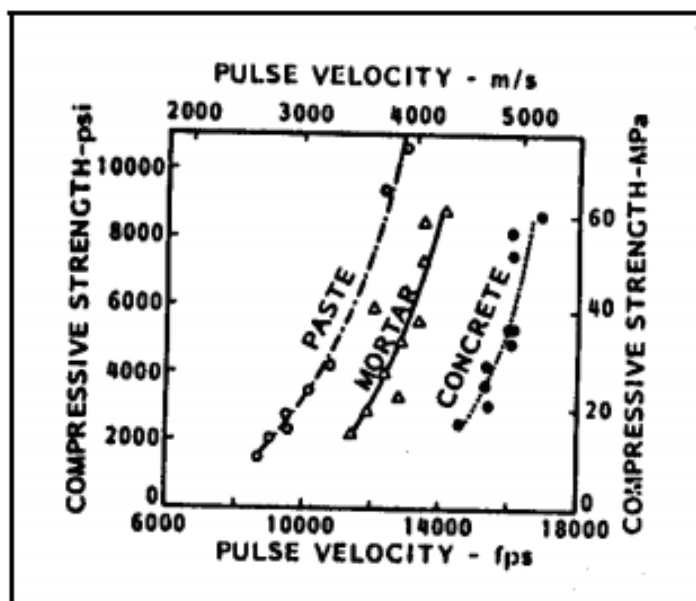
Tabela 2.2 – Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rocha

Tipo de rocha	Velocidade (m/s)
Basalto	5270 – 6020
Dolomita	4370 – 6090
Granito	4000 - 5790
Calcário	3910 – 5780
Arenito	2550 – 4230
Quartzito	5570 – 5720

Fonte: Chung e Law (1983)

Em ensaios realizados por Sturup, Vecchio e Caratin (1984) com pasta de cimento, argamassa e concreto com agregados graúdos convencionais, concluíram que para a mesma resistência à compressão a velocidade da onda de ultrassom é maior no concreto do que na argamassa, e esta maior que na pasta de cimento, conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Correlação entre velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão na pasta de cimento, argamassa e concreto

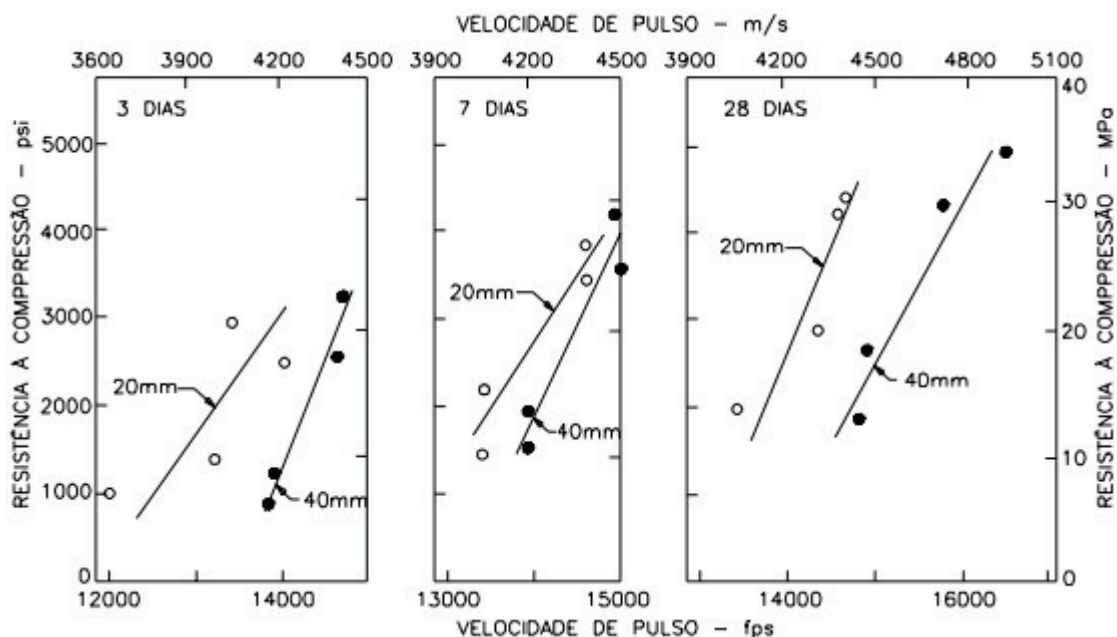


Fonte: Sturup, Vecchio e Caratin (1984)

Segundo Chung e Law (1983) o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda ultrassônica em agregados graúdos são maiores do que na pasta de cimento, então o concreto que é composto por agregados de massas específicas maiores ou com maiores quantidades de agregado apresentam maior velocidade.

Tratando-se da dimensão máxima do agregado, Sturup, Vecchio e Caratin (1984) realizaram um estudo com agregados do mesmo tipo e dimensão máxima de 20 e 40 mm, analisado nas idades de 3, 7 e 28 dias, onde verificaram que concretos produzidos com agregados de maior dimensão máxima resultaram em menor resistência para uma determinada velocidade, conforme a Figura 2.8.

Figura 2.8 – Influência da dimensão máxima do agregado na correlação entre as velocidades de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão



Fonte: Sturup, Vecchio e Caratin (1984)

Segundo Medeiros (2007) é perceptível que concretos que são confeccionados com agregados grãos maiores e/ou em maior proporção possuem maiores velocidades, mesmo que não haja nenhuma correlação direta entre a velocidade e a resistência à compressão.

Rodrigues e Figueiredo (2004) afirmam que concretos moldados com agregado de maior densidade apresentam maior velocidade de pulso ultrassônico do que aqueles compostos com agregado grão de menor densidade.

2.1.1.5.2 Tipo de cimento e aditivos

De acordo com Lorenzi (2009) o tipo e a quantidade de cimento influenciam significativamente na relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto, entretanto normalmente os estudos não quantificam a magnitude dessa influência.

Porém, de acordo com Jones (1962, apud MEDEIROS, 2007) o tipo do cimento não exerce nenhum efeito significativo na variação da velocidade da onda de ultrassom. Contudo, diferentes tipos de cimento possuem diferentes taxa de hidratação, o que influencia na velocidade de propagação de onda ultrassônica. Quando há aumento no grau de hidratação, aumenta o módulo de elasticidade e por consequência há aumento na velocidade.

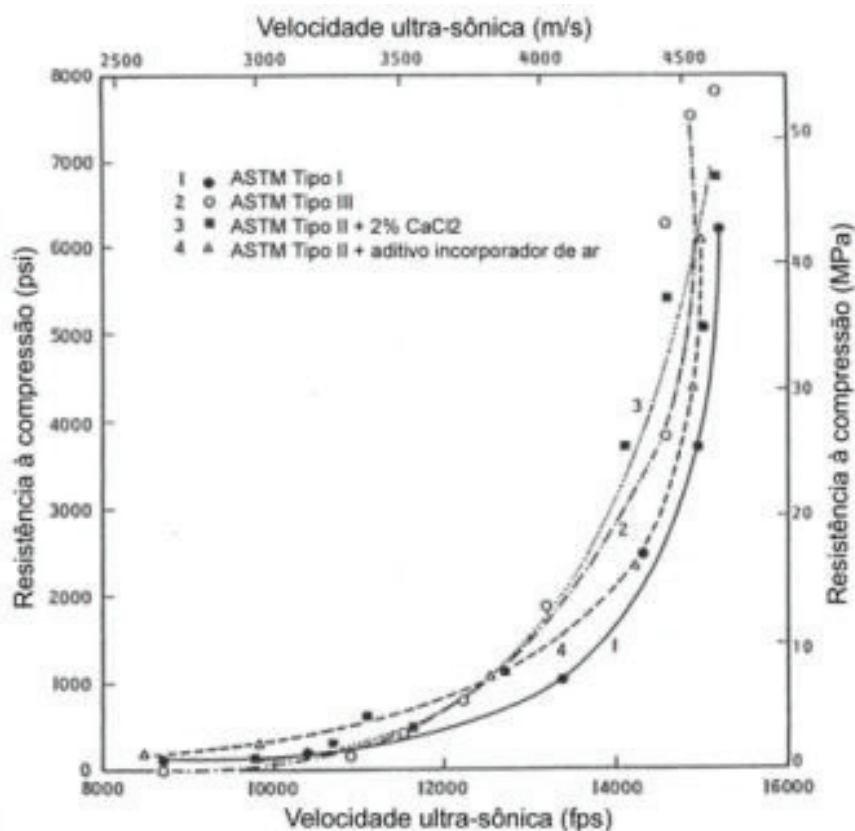
A velocidade do pulso ultrassônico é influenciada pelos aditivos semelhantemente a taxa de hidratação do cimento (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Sturup, Vecchio e Caratin (1984) realizaram um estudo buscando avaliar a influência do tipo de cimento e a utilização de aditivos na correlação entre a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto.

Os autores ensaiaram quatro composições: concreto com cimento ASTM tipo I (cimento Portland comum), concreto com cimento ASTM tipo III (cimento Portland de alta resistência inicial), com adição de 2% de cloreto de cálcio e com adição de incorporadores de ar. Em todos os casos foi utilizado 360 kg/m³ de cimento. O resultado obtido é ilustrado na Figura 2.9, onde a curva representa o aumento da idade do concreto da esquerda para direita. Nota-se que em idades iniciais há notáveis mudanças no comportamento dos diferentes concretos, as velocidades de pulso ultrassônico são muito sensíveis a pequenas variações de resistência à compressão. Entretanto em idades mais avançadas não existe uma tendência marcante que possa caracterizar influência, grandes variações de resistência correspondem a mínimas ou quase nulas variações na velocidade.

Assim como Sturup, Vecchio e Caratin (1984), Evangelista (2002) também concluiu em seus estudos que a velocidade do pulso ultrassônico nas primeiras 24 horas é influenciada pelo tipo de cimento, porém em idade igual ou superior a três dias não foi observado diferença significativa nas velocidades do pulso.

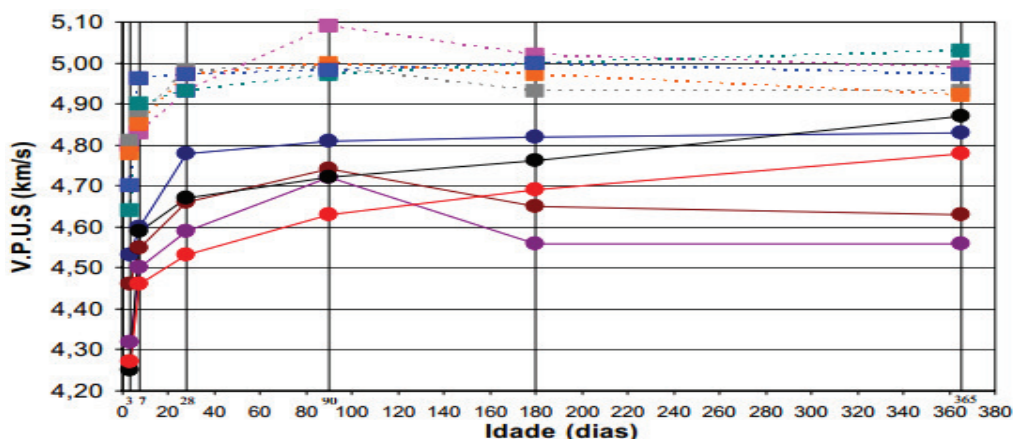
Figura 2.9 – Influência do tipo de cimento e da utilização de aditivos na correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto



Fonte: Sturup, Vecchio e Caratin (1984)

Em estudo realizado por Almeida (1993, apud MEDEIROS, 2007) em relação à influência na utilização de aditivos na velocidade da onda de ultrassom, comparou velocidades em concretos com diferentes composições. Em cinco traços foi utilizado aditivo redutor de água do tipo superplastificante, na proporção de 15 kg/m³ de concreto. Sendo notórias as maiores velocidades para as composições em que utilizaram aditivo. A Figura 2.10 ilustra os resultados, os concretos compostos por aditivos são representados pelas linhas tracejadas.

Figura 2.10 – Variação da velocidade das ondas ultrassônicas com o passar do tempo



Fonte: Almeida (1993, apud MEDEIROS, 2007)

Segundo Medeiros (2007) as velocidades foram maiores para concretos com aditivo superplastificante, por este causar redução de água. Concretos com menos água, têm menos quantidade de vazios e poros mais finos, por consequência ocorreu maior velocidade nestes concretos.

2.1.1.5.3 Relação água/cimento e agregado/cimento

Kaplan (1959, apud MALHOTRA; CARINO, 2004) afirma que quando há um aumento na relação água-cimento resulta em diminuição da massa específica, da resistência à compressão, da resistência à flexão e da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Sturup, Vecchio e Caratin (1984) em sua pesquisa observou cinco concretos com materiais similares, entre as idades de 12h e 91 dias, apenas com diferentes relações água/cimento e agregado/cimento. E constatou que resistência diminui quando a relação água/cimento aumenta ou agregado/cimento aumenta.

Ao estudarem a influência da relação agregado/cimento, Elvery e Ibrahim (1976) constataram que a correlação velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão altera-se significativamente. Isto ocorre pelo fato de o agregado ter maior módulo de elasticidade que a pasta de cimento. Então ao aumentar a quantidade do volume de agregado no concreto e mantendo-se os demais parâmetros constantes, a velocidade será maior.

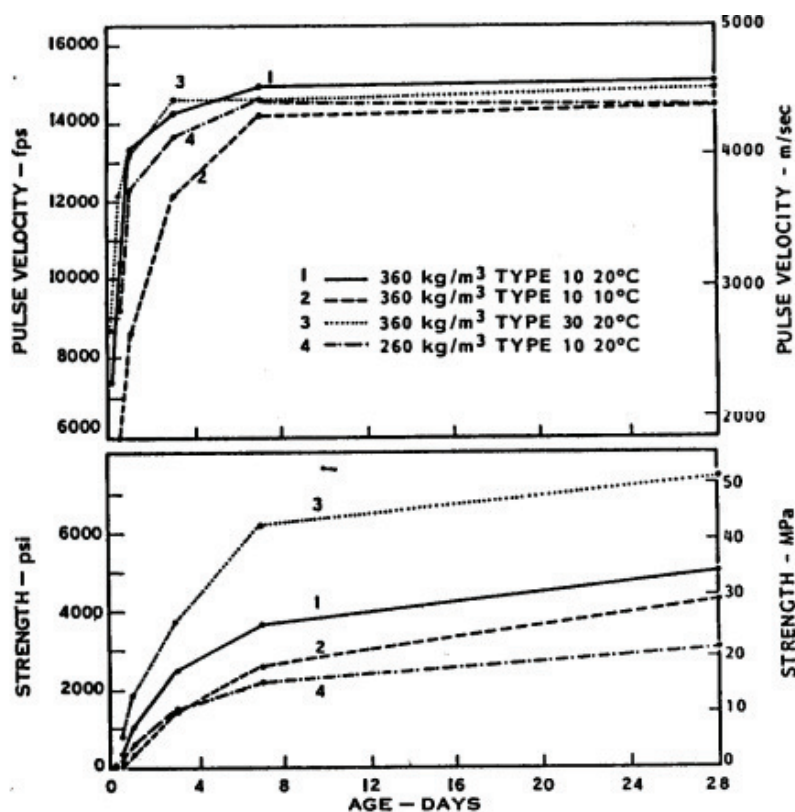
Entretanto, Elvery e Ibrahim (1976) observaram que a correlação entre a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão independem da variação da relação água/cimento.

2.1.1.5.4 Idade do concreto

Segundo Jones (1962, apud MEDEIROS, 2007) a velocidade do pulso ultrassônico aumenta muito rápido nas primeiras idades e em poucos dias se estabiliza, similar à resistência à compressão de um concreto produzido com cimentos de alta resistência inicial. Afirma então que o efeito da idade na velocidade do pulso ultrassônico (V) no concreto é semelhante ao efeito da evolução da resistência (f_c), portanto a correlação entre V e f_c independe da idade do concreto.

Em estudo realizado por Sturup, Vecchio e Caratin (1984) constataram que a velocidade aumenta rapidamente nas primeiras horas, entretanto a resistência à compressão ocorre de uma forma mais lenta e gradual. Em idade mais avançadas, existe aumento significativo de f_c e um aumento insignificante no valor de V , conforme ilustrado na Figura 2.12. Por essa razão, concluíram que apesar da velocidade da onda de ultrassom e a resistência à compressão variarem de forma semelhante em relação à idade do concreto, esta variação não ocorre na mesma proporção.

Figura 2.12 – Influência da idade do concreto em relação à velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão



Fonte: Sturup, Vecchio e Caratin (1984)

2.1.1.5.5 Condições da superfície e acoplamento dos transdutores ao concreto

A ABNT NBR 8802:2013 estabelece que a superfície dos corpos de prova ou estruturas de concreto a serem ensaiadas deve ser planas, lisas e isentas de sujeira a fim de possibilitar o bom acoplamento dos transdutores ao concreto. Quando estas forem rugosas, devem ser regularizadas através de processos mecânicos ou com camada de pasta de cimento, gesso ou resina epoxídica com espessura mínima.

Em casos onde há superfícies curvas Chung e Law (1983) fornece a possibilidade de se utilizar transdutores de contato pontual, porém ainda há restrições quanto a distância entre os transdutores no qual os pulsos não são mais recebidos.

A ABNT NBR 8802:2013 faz referência ao uso de acoplante, com o intuito de permitir o contato contínuo entre as superfícies. Indica a utilização de graxas de silicone ou mineral e vaselina, pois fornecem boa conexão.

Segundo Costa (2004) a natureza do material utilizado como acoplante pode interferir no resultado final do ensaio, por isso é tão abordada em normas, como segue:

- NT Build 213:1984: Para contato acústico entre a unidade receptora e o concreto pode ser a vaselina.
- BS 1881:Part 201:1986: Acopladores tipicamente utilizados são vaselina, graxa e pasta de kaolin/glicerol.
- Gost 17.624:1989: Deve-se utilizar um contato acústico confiável entre o concreto e a superfície de trabalho dos transdutores ultrassônicos, materiais de contato viscoso.
- NM 58:1996: Para acoplamento deve ser utilizado graxa, vaselina ou outro material viscoso, exercendo uma pequena pressão nos transdutores sobre a superfície de concreto, preenchendo assim os poros superficiais.
- ASTM C 597:2009: O acoplante correto a ser utilizado é o que possui forma e magnitude da onda recebida com decaimento senoidal, esta pode ser analisada por meio de saída de dados em um osciloscópio ou display digital do próprio equipamento.
- NBR 8802:2013: Utilizar fina camada de acoplante nas superfícies do concreto ou nas faces dos transdutores. Sugere-se o uso de graxas de silicone ou mineral e vaselina, por estas fornecerem boa conexão quando usadas em concretos de superfície lisa.

2.1.1.5.6 Temperatura do concreto

Segundo RILEM NDT 1:1972 a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas não são influenciadas significativamente caso a temperatura ambiente varie entre 5 e 30°C. A norma oferece valores de correção para temperaturas que sejam superiores a 30°C, nesse caso há uma redução da velocidade resultado de uma microfissuração interna do concreto que não corresponde à redução na resistência à compressão. E quando inferiores a 5°C, nesse caso há um congelamento do concreto, o interior se congela, ocorrendo aumento na velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos. Valores para correção das velocidades se dá de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Correções para as velocidades de pulso ultrassônico devido as variações de temperatura

Temperatura (°C)	Correção (%)	
	Concreto seco	Concreto saturado
60	5	4
40	2	1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fonte: RILEM NDT 1 (1972)

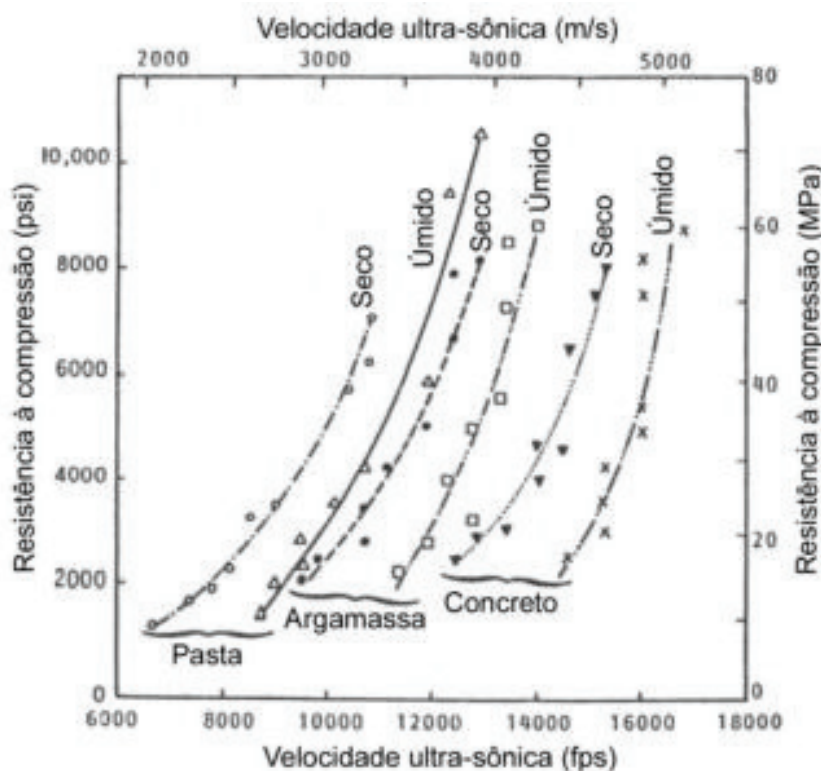
Elvery e Ibrahim (1976), Abbadi e Al-Tayyib (1996) e Meneghetti (1999) realizaram um estudo em relação a ensaios em concretos variando a temperatura de cura, a variação de temperatura no momento da preparação do concreto e em concretos mantidos em determinadas temperaturas, respectivamente. Todos concluíram que conforme há aumento de temperatura a velocidade diminui.

2.1.1.5.7 Teor de umidade

O teor de umidade exerce uma pequena influência na velocidade do pulso ultrassônico, em ensaios realizados em concreto saturado obtiveram velocidade cerca de 2% maior que em condição seca (CHUNG; LAW, 1983).

Em pesquisas realizadas por Sturup, Vecchio e Caratin (1984) comprovam o efeito da umidade em relação à velocidade na pasta, argamassa e concreto, conforme ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Efeito da umidade em relação à velocidade de pulso ultrassônico na pasta, argamassa e concreto



Fonte: Sturup, Vecchio e Caratin (1984)

Bungey (1989) explica esse aumento de velocidade em elementos de concretos saturados em razão de que a velocidade das ondas nos líquidos são maiores do que em gases, portanto quando os poros do concreto estão preenchidos com água, verifica-se aumento de até 5% nas velocidades das ondas de ultrassom.

Vários outros autores concordam desta teoria, como por exemplo Malhotra e Carino (2004), Ohdaira e Masuzawa (2000) que quanto maior a umidade em um concreto, maior será a velocidade da onda ultrassônica. O que não ocorre com a resistência à compressão, sendo que quanto maior a umidade menor será a resistência.

A NM 58:1996 afirma que de acordo com pesquisas, variações com teor de umidade inferior a 1% não causam mudanças no valor da velocidade das ondas ultrassônicas.

2.1.1.5.8 Comprimento de propagação da onda ultrassônica, tamanho da peça e frequência dos transdutores

Segundo Bungey (1989) o transdutor com frequência de 54kHz é o mais utilizado, sendo disponível em diversos países, porém existem também transdutores com frequências entre 20 e 150kHz.

Ainda conforme o autor anterior, para a escolha da frequência do transdutor é necessários observar o tamanho do elemento estrutural a ser analisado, pois a distância entre os transdutores não pode ser menor que o comprimento da onda (λ), calculado através da Equação 2.3. A dimensão máxima dos agregados graúdos também devem ser inferiores ao comprimento da onda (λ), a fim de evitar a redução na energia da onda e ocasionar perda do sinal no receptor.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.3)$$

Onde:

V – velocidade do pulso ultrassônico.

f – frequência de vibração.

A norma RILEM NDT 1:1972 recomenda para se evitar erros nas leituras das velocidades ultrassônicas, distâncias mínimas, pois a heterogeneidade do concreto afetaria significativamente nos resultados. Essas distâncias seriam de 100 mm para concretos com agregado com dimensão máxima menor que 20 mm e 150 mm para concretos com dimensão máxima entre 20 e 40 mm.

Em caso onde é utilizado transdutor com frequência de 54kHz, a norma NM 58:1996 recomenda a distância mínima entre os transdutores de 150 mm para a transmissão direta e 400 mm para a transmissão indireta.

2.1.1.5.9 Influência do estado de tensões

Não há variação nas velocidades de propagação das ondas ultrassônicas quando as tensões estão abaixo de 50% da tensão de ruptura do elemento (BUNGEY, 1989).

Em conformidade, a norma NM 58:1996 afirma que a velocidade de propagação é afetada quando as tensões alcançam entre 50% e 70% da tensão de ruptura, apresentando um acentuado decréscimo na velocidade conforme a tensão aumenta.

De acordo com Malhotra e Carino (2004) a velocidade do pulso normalmente não é afetada pelo nível de tensão no elemento em análise, porém quando as tensões atingem 65% da tensão de ruptura, se desenvolvem microfissuras no interior do concreto que reduz consideravelmente o valor da velocidade.

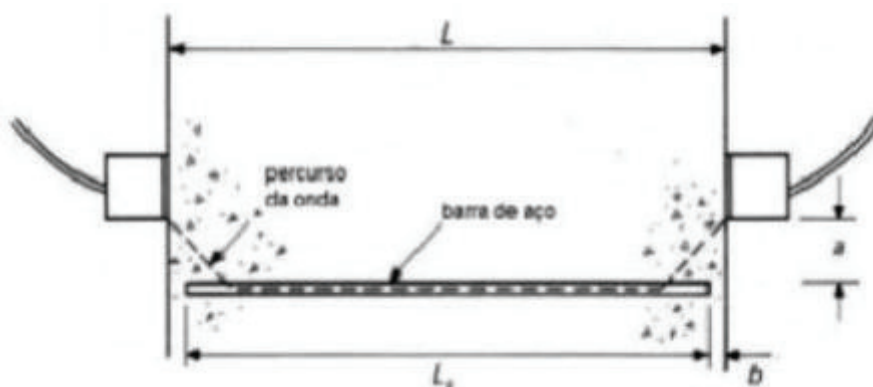
2.1.1.5.10 Presença de armaduras e fissuras

Segundo Sturup, Vecchio e Caratin (1984) um dos principais fatores que influenciam na velocidade das ondas ultrassônicas é a presença de armadura. Quando não existem armaduras, fissuras ou vazios no elemento de concreto estudado, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, uma linha reta entre os dois transdutores.

Malhotra e Carino (2004) afirmam que quando analisado um concreto armado, as velocidades ultrassônicas são maiores se comparado com o concreto simples de mesma composição. Pelo fato de que a velocidade de pulso em aço de 40% a 70% superior ao concreto e no concreto armado o pulso pelos dois materiais, acarretando em aumento da velocidade de propagação.

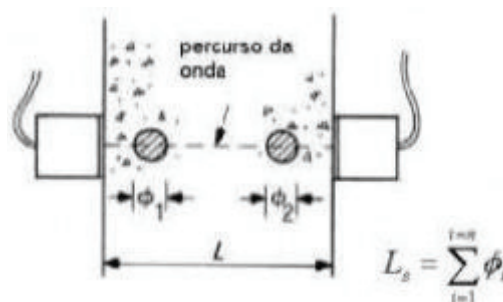
A forma de leitura pode ser tanto com as armaduras localizadas paralelamente ao comprimento das ondas como mostrado na Figura 2.14 ou em casos onde a armadura é transversal à propagação das ondas ultrassônica, conforme Figura 2.15 (BUNGEY, 1989).

Figura 2.14 – Influência das barras paralelas ao percurso da onda



Fonte: BUNGEY (1989)

Figura 2.15 – Influência das barras transversais ao percurso da onda



Fonte: BUNGEY (1989)

Bungey (1989) recomenda sempre que possível evitar a presença das barras de aço, em casos onde não é possível, é necessário utilizar fatores de correção dos valores obtidos e assim, estima-se a velocidade de propagação no concreto. Esses fatores de correção são propostos pelas normas, sendo considerado apenas dois parâmetros, a velocidade da onda ultrassônica no concreto ao redor da armadura e o caminho percorrido pela onda através do aço e do concreto, conforme Tabela 2.4 e 2.5.

Tabela 2.4 – Fatores de correção das velocidades de propagação ultrassônica – Eixo da barra paralelo ao percurso da onda

a / L	Velocidade no concreto simples (V_c) / Velocidade no concreto armado (V_e)			
	$V_c / V_s = 0,90$	$V_c / V_s = 0,80$	$V_c / V_s = 0,71$	$V_c / V_s = 0,60$
0	0,90	0,80	0,71	0,60
1 / 20	0,94	0,86	0,78	0,68
1 / 15	0,96	0,88	0,80	0,71
1 / 10	0,99	0,92	0,85	0,76
1 / 7	1,00	0,97	0,91	0,83
1 / 5	1,00	1,00	0,99	0,92
1 / 4	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: RILEM NDT1 (1972)

Notas: V_s – Velocidade de propagação da onda ultrassônica no aço.

Tabela 2.5 – Fatores de correção das velocidades de propagação ultrassônica – Eixo da barra perpendicular ao percurso da onda

L_s / L	Velocidade no concreto simples (V_c) / Velocidade no concreto armado (V_e)		
	$V_c = 3000 \text{ m/s}$ (qualidade muito baixa)	$V_c = 4000 \text{ m/s}$ (qualidade razoável)	$V_c = 5000 \text{ m/s}$ (qualidade muito boa)
1 / 12	0,96	0,97	0,99
1 / 8	0,94	0,96	0,98
1 / 6	0,92	0,94	0,97
1 / 4	0,88	0,92	0,96
1 / 3	0,83	0,89	0,94
1 / 2	0,75	0,83	0,92

Fonte: RILEM NDT1 (1972)

Segundo Knab, Blessing e Clifton (1983, apud Evangelista, 2002) a amplitude e a direção da propagação das ondas ultrassônicas são modificadas quando existem fissuras no elemento de concreto analisado.

Sturup, Vecchio e Caratin (1984) relacionam as fissuras com tempo maior de trânsito das ondas de ultrassom. Explica-se esse efeito pelo fato de que uma fissura intercepta o caminho normal das ondas, fazendo estas contornarem a fissura. A velocidade irá depender também do comprimento da fissura e se está preenchida com ar ou água, pois a velocidade do ultrassom é maior em água.

2.1.1.6 Normalização

A Tabela 2.6 apresenta uma lista de normas vigentes para a determinação da velocidade do pulso ultrassônico através do concreto em diversos países.

Tabela 2.6 – Normas para determinação da velocidade de ondas ultrassônicas no concreto

País	Designação	Ano
Alemanha	DIN EN 150404-4	2004
Bélgica	NBN EN 12504	2004
Brasil	NBR 8802	2013
Bulgária	BDS EN 12504-4	2005
Dinamarca	DS EN 12504-4	2004
Espanha	UNE EN 12504-4	2006
Estados Unidos	ASTM C 597	2009
Hungria	MSZ EN 12504-4	2005
Índia	BSI IS 13311-1	2004
Japão	JIS Z 2353	2003
Korean	KS F 2731	2008
Polônia	PN EN 12504-4	2005
Reino Unido	BS EN 12504-4	2004
República Tcheca	CSN EN 12504-4	2004
Romênia	SR EN 12504-4	2004
Suécia	SS EN 12504-4	2004
Irlanda	IS EN 12504-4	2004
Noruega	NS EN 12504-4	2004
Holanda	NEN EN 12504-4	2005
França	NF EN 12504-4	2005
Itália	UNI EN 12504-4	2005

Fonte: Lopes (2016)

2.1.1.7 Recomendações quanto às curvas de correlação

RILEM NDT 1:1972 sugere duas formas de estimar a resistência à compressão do concreto à partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica, sendo elas: a partir de gráficos que correlacionem a resistência à compressão (f_c) e a velocidade de propagação ultrassônica (V) ou utilizando-se expressões analíticas já conhecidas que correlacionam essas duas variáveis com ajustes a dados experimentais. Porém, de maneira geral, os gráficos de correlações apresentam resultados mais confiáveis do que as expressões analíticas, sendo a mais utilizada expressa por:

$$f_c = aV^b \quad f_c = ae^{bV} \quad f_c = aV^2 + bV + c$$

onde:

a, b, c – constantes obtidas a partir de dados experimentais.

Ainda tratando-se da RILEM NDT 1:1972 quando se tem a expressão para determinado concreto, em investigações posteriores podem ser realizadas com menos corpos de prova. Na circunstância de não haver corpos de prova e não conhecer a composição do concreto é possível obterem-se as constantes por meio de corpos de prova extraídos da estrutura e em seguida estimar a resistência por meio de uma determinada expressão. Podendo estimar a resistência à compressão do concreto por expressões analíticas nas seguintes circunstâncias:

- a) Quando existe conhecimento a respeito da composição do concreto e há pelo menos três corpos de prova da mesma idade da estrutura ou então, quando há possibilidade de extração de pelo menos três testemunhos;
- b) Quando existe conhecimento a respeito da composição do concreto “*in situ*”, mas não há corpos de prova ou possibilidade de extração, porém os materiais utilizados estão disponíveis para moldar ao menos três corpos de prova;
- c) Quando não existe conhecimento a respeito da composição do concreto estudado, mas ao menos três corpos de prova podem ser extraídos da estrutura;
- d) Quando existe apenas o conhecimento a respeito da composição do concreto.

Normalmente, a estimativa da resistência à compressão resultante da correlação “a” é mais confiável do que pela “b”, que por sua vez é mais confiável do que as obtidas pela “c” ou “d”.

Sendo que para a correlação gráfica, RILEM NDT 1:1972 sugere o ensaio de no mínimo trinta corpos de prova de mesma dimensão, obtém-se um valor médio da resistência à compressão e da velocidade de propagação para cada conjunto de três corpos de prova sujeitos as mesmas condições de ensaios. Conforme altera a quantidade de água ou o grau de compactação de cada conjunto analisado, variam-se as resistências à compressão e as velocidades de propagação necessárias para a obtenção do gráfico. Importante ressaltar que as demais características devem permanecer constantes, como o teor de cimento, tipo de graduação do agregado, aditivos, condições de cura.

Conforme a ASTM C597:2009 a correlação pode ser feita através da determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica e da resistência à compressão em um número suficiente de amostras de determinado concreto, podendo ser utilizada essa correlação posteriormente no mesmo concreto.

Para uma correlação mais confiável é preferível desenvolver com a extração de testemunhos do que com corpos de prova moldados em cilindros padrão, por estes possuírem características particulares, como diferentes condições de umidade. E a leitura das velocidades dos pulsos ultrassônicos deve ser realizada na própria estrutura em análise (ACI 228.1R:2003).

A recomendação da BS 1881: Part 203:1986 é moldar no mínimo três corpos de prova para cada betonada, sendo que deve ser feito três leituras da velocidade de pulso em cada um, não podendo variar mais que $\pm 5\%$ do valor médio das três medições. É necessário ensaiar diversas faixas de resistência à compressão, sendo aconselhável variar a relação água/cimento ou a idade do ensaio. Então a curva é obtida a partir dos resultados das médias das velocidades e da resistência à compressão do conjunto de três corpos de prova.

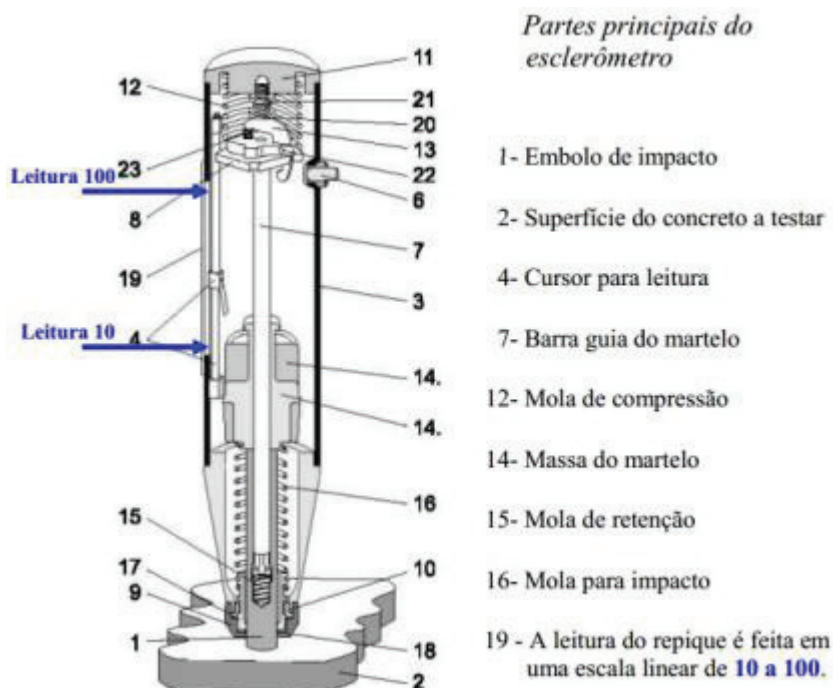
Segundo a NM 58:1996 para a confecção da curva de correlação é necessário a leitura das velocidades de propagação ultrassônica em corpos de prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, moldados e com cura conforme procedimento padrão. Posteriormente é submetido ao ensaio de compressão. Exige-se o ensaio de no mínimo dez corpos de prova para cada relação água cimento, variando de 0,40 a 0,80 e com incrementos de 0,05.

2.1.2 Método do esclerômetro de reflexão

Em 1930 ocorreram as primeiras tentativas de medir a dureza superficial do concreto, realizando medições do retorno de uma bola de aço fixa em um pêndulo ou atirada de uma pistola. Foi o primeiro método utilizado a partir do princípio do ricochete, sendo baseado no rebote de uma massa elástica que depende da dureza da superfície contra a qual é lançada (BUNGEY, 1989).

O engenheiro suíço Ernest Schmidt, em 1948, produziu um esclerômetro conhecido como “Schmidt Hammer”, fundamentado no princípio do ricochete, na Figura 2.16 está representado esquematicamente.

Figura 2.16 – Seção vertical do esclerômetro tipo Schmidt



Fonte: Thomas (2013)

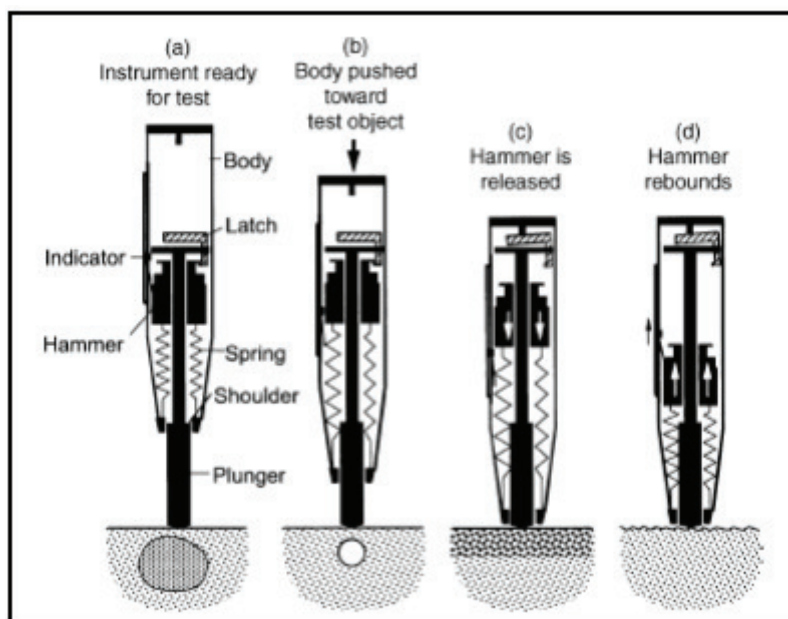
2.1.2.1 Descrição do método

O método da esclerometria é conhecido como “*reboundhammermethod*”. Neste ensaio, quando pressiona uma massa (do martelo) com uma mola, no momento em que se comprime a barra guia do martelo à superfície de concreto testada, surge uma quantidade de energia resultante da extensão da mola até uma determinada posição. Quando solta a mola, a massa sofre rebote ao se chocar contra a barra de percussão que ainda esta em contato com o concreto. É denominado índice esclerométrico (IE) a distância percorrida pela massa no retorno, em porcentagem da deformação inicial da mola (NEVILLE, 1997).

Conforme a ACI 228.1R:2003 a distância percorrida pela massa no retorno depende da energia cinética no martelo antes do impacto com o êmbolo e quanto desta energia é absorvida no impacto. O que proporciona a utilização do índice esclerométrico como um indicador das propriedades do concreto, como a resistência à compressão e rigidez do concreto, é que a energia parte é absorvida pela fricção mecânica do aparelho, enquanto a outra parcela é devido à absorção da interação do êmbolo com o concreto, sendo que a energia absorvida pelo concreto dependente da relação tensão-deformação.

Na Figura 2.17 é apresentado de forma esquemática este modelo de ensaio.

Figura 2.17 – Representação esquemática do método do esclerômetro de reflexão



Fonte: ACI 228.1R:2003

A norma ABNT NBR 7584:2012 recomenda que o ensaio seja feito em pontos do concreto pouco armados e sem vazios. E realizar para cada área ensaiada uma série entre 9 e 16 impactos, sendo o índice esclerométrico a média dessas leituras.

Evangelista (2002) complementa que o esclerômetro deve ser utilizado preferencialmente ortogonalmente à área ensaiada, caso contrário, é necessária correção do índice esclerométrico, pois há influência da gravidade sobre a força da mola do esclerômetro. E o impacto do esclerômetro não deve provocar vibração no elemento ensaiado, por isso pequenas peças devem ser apoiadas ou fixadas no momento do teste.

No entanto, Focaoaru (1984, apud EVANGELISTA, 2002) afirma que para a estimativa da resistência à compressão do concreto é realizada por meio de curvas de calibração. Assim como no método do ultrassom, não há apenas uma correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão, pelo fato de haver alguns fatores que influenciam, como o tipo e quantidade de cimento, natureza do agregado, maturidade e teor de umidade do concreto.

2.1.2.2 Vantagens e limitações

Conforme diversos autores, como Câmara (2006), Castro (2009), Lopes (2016), as principais vantagens é a leveza do aparelho, facilidade de transporte e manuseio, facilidade de

operação, baixo custo do equipamento, rapidez na obtenção de dados. E ainda, outro ponto que merece destaque é que praticamente não há danos à superfície do concreto ensaiado, podendo apenas causar pequenas marcas nos concretos de baixa idade ou de baixa resistência.

Entretanto, segundo Coutinho (1973, apud CASTRO, 2009) os resultados obtidos por este método requer cuidado quanto à interpretação, pelo fato de haver alguns fatores que podem influenciar. Sendo estes, conforme a ABNT NBR 7584:2012 o grau de umidade da superfície (diminuem o índice esclerométrico) e a carbonatação (aumenta o índice esclerométrico) que ocorrem apenas na superfície e influencia pouco nas camadas mais profundas.

Por fim, Teodoru (1988, apud CASTRO, 2009) afirma sendo a principal limitação deste ensaio o fato dos resultados serem apenas referentes à superfície, cerca de 30 mm a 50 mm de profundidade.

E Bungey (1989) complementa que este método pode apenas ser realizado em concretos com resistência à compressão superiores a 10MPa.

2.1.2.3 Aplicações

Conforme recomendações da ABNT NBR 7584:2012 este método do esclerômetro deve ser empregado principalmente nas seguintes ocasiões:

- Analisar a uniformidade da dureza superficial do concreto;
- Comparar concretos com um referencial preestabelecido;
- Estimar a resistência à compressão do concreto utilizando curvas de correlação confiável.

Este ensaio também pode ser utilizado na verificação da resistência à abrasão de pisos de concreto, pelo fato de conseguir determinar as propriedades da superfície do concreto que influenciam diretamente no seu desempenho (BS 1881: Part 202, 1986).

2.1.2.4 Acurácia

Segundo Malhotra (1984, apud MEHTA; MONTEIRO, 2008) ensaios realizados pelo método da esclerometria, com aparelho devidamente calibrado, apresenta acurácia em torno de $\pm 15\%$ a $\pm 20\%$ na estimativa da resistência do concreto em corpos de prova moldados no laboratório e em estruturas de concreto “*in situ*” aproximadamente 25%.

Conforme o ACI 228.1R:2003 é aproximadamente 10% o coeficiente de variação médio deste ensaio.

Em ensaios realizados por Yun et al. (1989) em argamassa, concreto com agregado de $D_{\text{máx}} = 25$ mm e concreto com agregado $D_{\text{máx}} = 40$ mm foi encontrado médias dos coeficientes de variação de 7,7%, 10,4% e 10,5%, respectivamente.

2.1.2.5 Fatores que influenciam os resultados

De acordo com Malhotra e Carino (2004) apesar de todas as vantagens deste método, existem vários fatores que interferem os resultados, como:

- Condições da superfície de ensaio;
- Tipo e dimensão do agregado graúdo;
- Idade e tipo de cura do concreto
- Tipo e teor de cimento;
- Carbonatação;

2.1.2.5.1 Condições e umidade da superfície de ensaio

Neville (1997) afirma que o esclerômetro deve ser utilizado em superfícies lisas, obtendo-se melhores resultados quando aplicado em faces que estiveram em contato com as fôrmas, isso porque o acabamento da camada superficial influencia o valor do índice esclerométrico. Caso as superfícies de ensaio não atendam a estas condições, antes de realizar o ensaio, devem ser alisadas com uma pedra abrasiva de carbureto de silício ou similar.

Para Petrucci (1998) o elemento primordial para o método é a superfície de ensaio. Estas devem estar limpas, secas e preferencialmente planas, para então alcançar resultados satisfatórios, com acurácia esperada.

Porém, segundo a ASTM C805:2013 mesmo que a face ensaiada seja a que estava em contato com as fôrmas, o resultado pode ainda assim ser influenciado, agora pelo tipo do material da fôrma utilizada, madeira ou aço. Conforme ACI 228.1R:2003 as fôrmas de madeira absorvem a umidade do concreto, resultando em uma camada superficial mais dura, o que não acontece quando utilizado fôrmas metálicas.

Isto pode ser comparado com o estudo realizado por Mitchell e Hoagland (1961, apud MALHOTRA; CARINO, 2004) que constataram que em corpos de prova moldados em

papelão o índice esclerométrico foi maior do que em moldados em aço, pelo fato de perder a umidade do concreto fresco, reduzindo a relação água/cimento da superfície e resultando em maior dureza superficial.

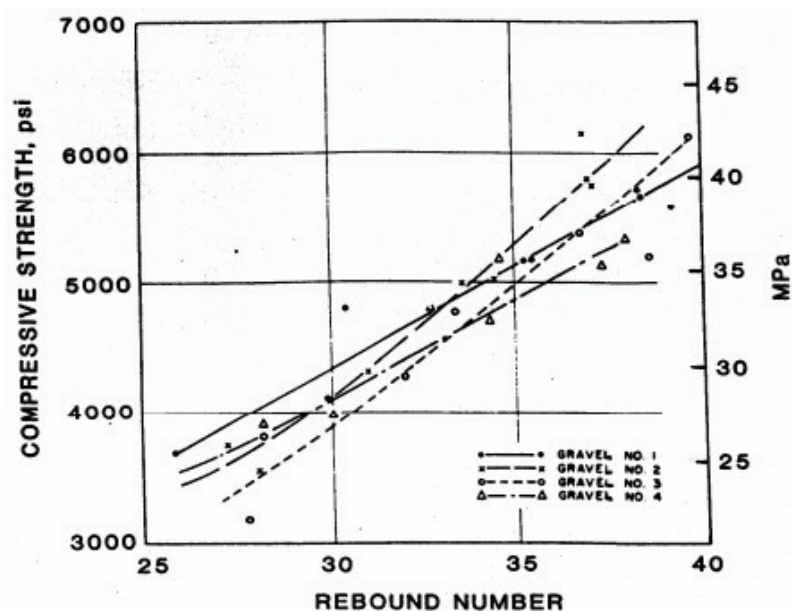
A ABNT NBR 7584:2012 complementa que o índice esclerométrico em concretos com superfícies úmidas podem subestimar a qualidade do concreto, podendo indicar valores de resistência até 20% inferiores aos concretos com superfície seca.

2.1.2.5.2 Tipo e dimensão do agregado graúdo

O tipo de agregado exerce grande influência na dureza do concreto, fazendo-se necessário obter uma curva de correlação entre a resistência e o índice esclerométrico para cada concreto em que é utilizado um diferente tipo de agregado (ACI 228.1R:2003).

E ainda, segundo Grieb (1958, apud MALHOTRA; CARINO, 2004) mesmo que seja utilizado o mesmo tipo de agregado, porém o local de origem do material for diferente, é necessário o desenvolvimento de curvas de correlações entre resistência e índice esclerométrico, conforme apresentado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Resistência x índice esclerométrico com seixos de diferentes origens



Fonte: Malhotra e Carino (2004)

A RILEM NDT 3:1984 e a BS 1881: Part 202:1986 afirmam que as curvas de correlações podem ser similares para concretos com agregados graúdos convencionais, porém isto só pode ser aceito quando ensaios disponíveis confirmem esta possibilidade.

A ABNT NBR 7584:2012 ressalta que mesmo com variação dos tipos de agregados os concretos podem ter a mesma resistência, porém diferentes índices esclerométrico. Este caso acentua-se quando se trata de agregados leves ou pesados.

Yun et al. (1989) em seus estudos concluíram que a correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico é mais influenciada pelo teor do agregado graúdo no concreto do que pela dimensão máxima em si.

E este ensaio pode resultar em um valor de índice esclerométrico muito alto quando há presença de um agregado graúdo no local onde o embolo de impacto atingir, sendo que o oposto ocorre se houver vazios (NEVILLE, 1997).

2.1.2.5.3 Idade e tipo de cura do concreto

De acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006) a variação no endurecimento inicial, cura e condições de exposição do concreto influenciam na curva de correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico, assim como a relação entre dureza e resistência varia com o tempo. Sem contar que as condições de umidade em que o concreto se encontra podem ser afetadas pelo método de cura.

Concretos curados ao ar seco possuem curvas de correlação diferentes dos concretos submetidos à cura úmida, fato este que diferentes condições de cura resultam em aceleração ou retardado na evolução da resistência à compressão (RILEM NDT 3:1984).

Conforme a ABNT NBR 7584:2012 a cura e a carbonatação são fatores que interferem a correlação entre resistência e a dureza superficial, isto ocorre pela influência da idade.

2.1.2.5.4 Tipo e teor de cimento

Segundo a ABNT NBR 7584:2012 o tipo de cimento utilizado na produção do concreto é significativo na obtenção do índice esclerométrico, o que torna necessário a realização de novas curvas de correlação sempre que houver mudança no tipo de cimento.

De acordo com a BS 1881: Part 202:1986 e RILEM NDT3:1984 independente do tipo de cimento Portland utilizado para as curvas de correlação a variação dos resultados não excede 10%. Entretanto, concretos compostos de cimento aluminoso podem ter a resistência

subestimada quando correlacionado com um concreto de cimento Portland comum, podendo ser até 100% maior. E em concretos produzidos com cimento supersulfatado, este pode ser superestimado, indicando resistência 50% menor quando correlacionado aos concretos com cimento Portland comum.

Teodoru (1988, apud EVANGELISTA, 2002) explica que se o concreto for composto por alto teor de cimento ou com cimento de alta resistência inicial, então para um determinado índice esclerométrico a resistência à compressão poderá ser maior.

A mudança no teor de cimento pode causar um erro de $\pm 10\%$ na estimativa da resistência, quando os concretos são compostos com alto teor de cimento o índice esclerométrico é menor do que nos concretos com mesma resistência à compressão, mas com teor de cimento menor (BS 1881: Part 202:1986).

2.1.2.5.5 Carbonatação

Segundo a ABNT NBR 7584:2012 a carbonatação influencia a dureza da superfície do concreto e quando feito leitura com esclerômetro ocorre uma superestimação quanto à resistência à compressão do concreto.

Sendo significativo a influência da carbonatação em concretos com idade superior a 3 meses, o que torna a camada superficial não representativa do concreto no interior do elemento analisado (BS 1881: Part 202:1986).

A ABNT NBR 7584:2012 ainda complementa que quando há carbonatação a resistência pode ser superestimada em mais de 50%, dependendo da camada carbonatada, esta podendo chegar a 20 mm.

2.1.2.6 Operação do esclerômetro

O ensaio deve ser realizado por um operador qualificado, que durante os ensaios deve exercer pressões uniformes sobre o elemento (ABNT NBR 7584:2012).

Várias são as normas técnicas que recomendam o uso do esclerômetro de forma ortogonal à área de concreto ensaiado. Em caso do ensaio ser realizado em outra posição, que não na horizontal, é necessário a correção do índice esclerométrico com coeficientes sugeridos pelo próprio fabricante do aparelho utilizado. Neville (1997) afirma que esta correção é devido ao efeito da gravidade sobre a força da mola do esclerômetro.

2.1.2.7 Normalização

São diversas as normas vigentes para o método de esclerometria em estruturas de concreto, e estão listadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Normas para o método de esclerometria

País	Designação	Ano
Alemanha	DIN EN 12504-2	2012
Bélgica	NBN EN 12504-2	2012
Brasil	NBR 7584	2012
Bulgária	BDS EN 12504-2	2012
Dinamarca	DS EN 12504-2	2012
Espanha	UNE EN 12504-2	2013
Estados Unidos	ASTM C 805/C805M-13a	2013
Hungria	MSZ EN 12504-2	2013
Índia	BSI IS 13311-2	2004
Japão	JIS A 1155	2012
Korean	KS F 2730	2008
Polônia	PN EN 12504-2	2013
Reino Unido	BS EN 12504-2	2012
República Tcheca	CSN EN 12504-2	2013
Romênia	SR EN 12504-2	2013
Suécia	SS EN 12504-2	2012
Irlanda	IS EN 12504-2	2012
Noruega	NS EN 12504-2	2012
Holanda	NEN EN 12504-2	2012
França	NF EN 12504-2	2013
Itália	UNI EN 12504-2	2012

Fonte: Lopes (2016)

2.1.2.8 Curvas de correlação

Todo aparelho de esclerômetro possui curvas de correlação fornecidas pelo próprio fabricante, porém estas se referem a concretos específicos, produzidos em outros países com materiais de propriedades diferentes dos encontrados no Brasil (ABNT NBR 7584:2012).

Segundo Lopes (2016) várias normas fazem referência ao assunto, recomendando sempre que houver mudanças nos materiais utilizados para produção do concreto deve ser produzida uma nova curva de correlação.

A ASTM C805M:2013 ressalta que os índices esclerométricos devem ser correlacionados com resultados de ensaios à compressão de testemunhos extraídos da estrutura em análise ou moldados em laboratório.

2.2 ESTUDO SOBRE INCÊNDIO

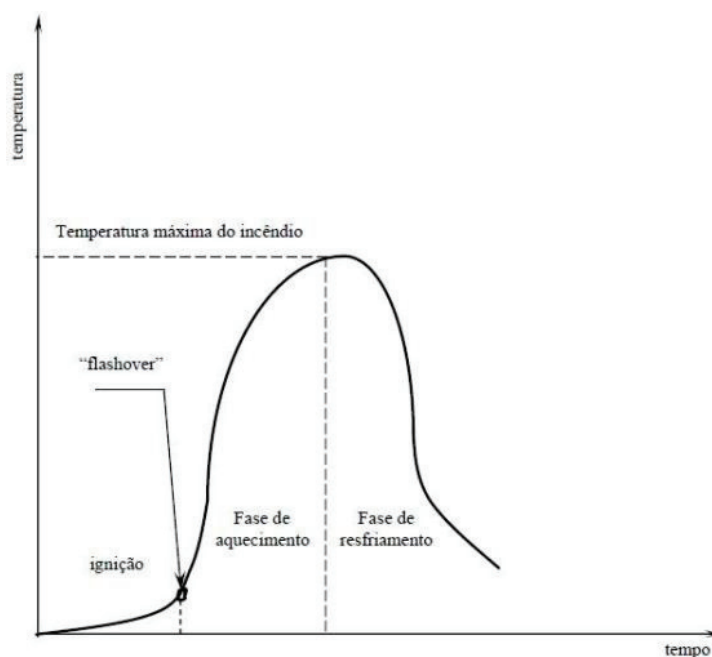
O incêndio é compreendido como uma forma de combustão, sendo necessários uma combinação de material combustível, gás comburente e fonte fornecedora de calor, para que se inicie. Ocorre um aumento brusco da temperatura quando as superfícies de todos os elementos do ambiente entram em ignição, posteriormente a velocidade de combustão acentua-se naturalmente e com a escassez de combustível o processo vai desacelerando e diminuindo as proporções (SOUZA, 1996).

2.2.1 Fases do incêndio

Segundo Landi (1986) e Alva (2000) o incêndio pode ser dividido em três fases conforme exemplificado na Figura 2.19, sendo elas:

- Fase de ignição: é a etapa em que se inicia a elevação de temperatura. Nos minutos iniciais ocorre a lenta elevação de temperatura que aquece os materiais combustíveis até atingirem suas temperaturas de ignição. Como ainda há pouco material queimando a liberação de energia térmica ainda é baixa.
- Fase de aquecimento: esta etapa é caracterizada pelo aumento de temperatura muito rápido, por isso conhecida como fase de propagação generalizada. Como os materiais absorveram uma grande quantidade de energia térmica, liberam gases que são combustíveis. Cuoghi (2006) ainda explica que nesta fase a temperatura ambiente fica em torno de 100°C e com a entrada de oxigênio alimenta o processo, podendo ocorrer o processo de *flashover*. Este fenômeno é quando ocorre a liberação de gases combustíveis que então queima com facilidade e ocorre a mudança súbita de temperatura, atingindo faixas em torno de 600°C.
- Fase de resfriamento: por fim, nesta fase acontece a redução e extinção da alta temperatura, isto ocorre devido a escassez do material combustível, não havendo mais fornecimento de energia térmica.

Figura 2.19 – Fases do incêndio no decorrer do tempo



Fonte: Alva (2000)

Entretanto, Silva (2003) ressalta que como a velocidade de queima é em função do material e das condições ambientais, estas etapas podem ter bastante variação em relação à duração e magnitude.

2.2.2 Comportamento do concreto sob a ação de incêndio

Conforme Costa e Silva (2002) normalmente as estruturas de concreto submetidas ao incêndio apresentam vantagens por ser um material incombustível, possuir baixa condutividade térmica, não exalar gases tóxicos quando submetidos ao fogo.

Porém de acordo com Lima (2005) as altas temperaturas causam transformações e degradações significativas no comportamento do concreto, sendo estas influências pela pasta de cimento e agregado. No Quadro 2.1 contêm as principais transformações que ocorre na pasta de cimento durante o processo de aquecimento.

Quadro 2.1 – Transformações sofridas pela pasta de cimento durante aquecimento

Temperatura (°C)	Transformações
20-80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Marco no aumento da permeabilidade a água
80-200	Aumento na taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada
80-850	Perda da água quimicamente combinada
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H
300+	Marco no aumento da porosidade e micro-fissuras
350	Decomposição de alguns tipos de agregados de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400-600	Dissociação do C-S-H em CaO e água
573	Transformação da fase dos agregados quartzosos e ligeira expansão
550-600+	Marco no aumento dos efeitos térmicos
700+	Dissociação do CaCO_3 em CaO e CO_2 (pasta e agregados carbonáticos)
720	Segundo pico da decomposição do C-S-H em C_2S e CS
800	Alteração das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica
1060	Início do derretimento de alguns componentes

Fonte: Lima (2005)

2.2.3 Efeitos em relação às propriedades mecânicas

As estruturas sob a ação do incêndio sofrem alterações relevantes nas características mecânicas e físicas dos materiais, pois ocorre o processo de transferência de calor, o que resulta em aumento de temperatura em toda a estrutura e gera uma série de fenômenos químicos e físicos (ITSEMAP, 1989, apud OLIVEIRA, 2006).

De acordo com Lima (2005) devido à estrutura mais densa do concreto de alta resistência em relação ao concreto convencional, eles diferem no comportamento sob altas temperaturas. Em concretos de alta resistência podem ocorrer deslocamentos explosivos, *spalling*, quando expostos a aquecimentos mais severos.

Porém em estudos realizados por Phan (1996) observou-se em ensaios com pré-carga e sem pré-carga, temperatura variando entre 25°C e 400°C, o concreto de alta resistência

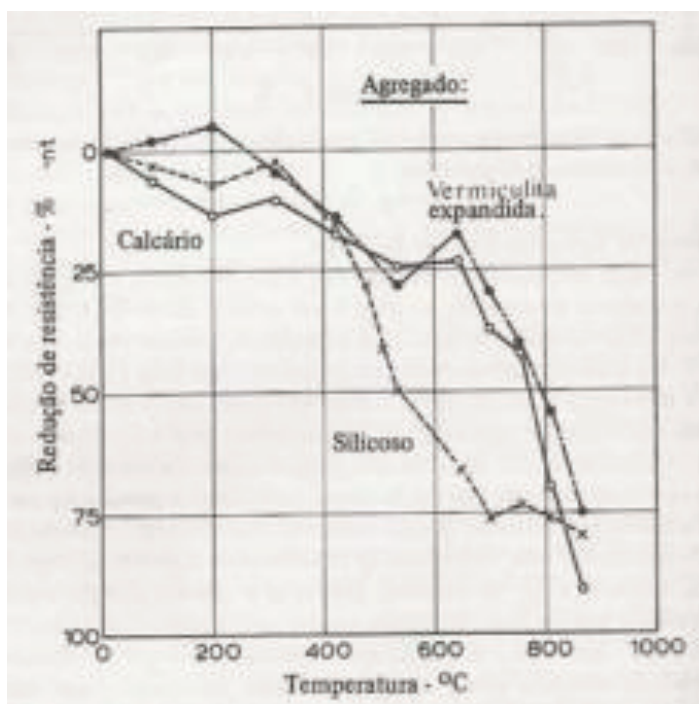
apresenta perda de resistência à compressão significativamente maior que o concreto convencional e após ultrapassar os 400°C o comportamento torna-se semelhante entre ambos os concretos. Já em ensaios de resistência residual sem pré-carga a redução da resistência à compressão é semelhante para os dois tipos de concretos.

Para Neville (1997) em temperaturas até 300°C o concreto ainda apresenta valores de resistência próximos aos iniciais, entretanto conforme há o aumento da temperatura, a capacidade resistente decresce progressivamente.

Ainda segundo Neville (1997) o aumento da temperatura tem influência significativa no módulo de elasticidade do concreto, interferindo no comportamento estrutural do elemento analisado.

Outro fator que pode alterar a perda de resistência à compressão devido à ação do fogo é o tipo de agregado, porém normalmente só após os 500°C é significativa a influência (XIAO; KONIG, 2004), isto é exemplificado na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Redução da resistência à compressão em concretos compostos com diferentes agregados

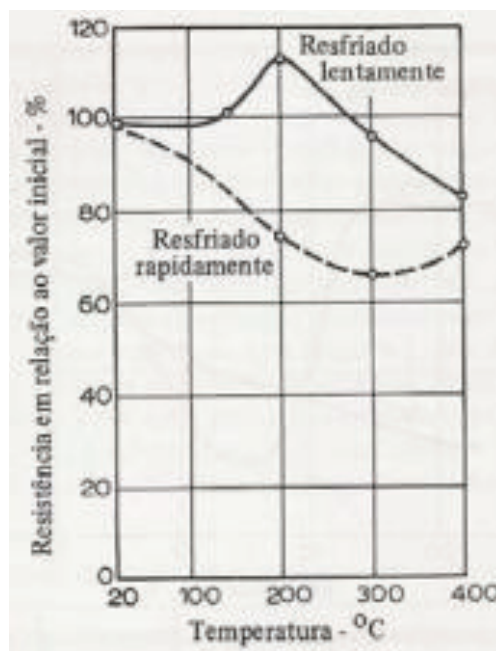


Fonte: Neville (1997)

Xiao e Konig (2004) também comentam sobre a forma de resfriamento do concreto ser um fator que interfere na redução da resistência à compressão. O resfriamento brusco (submersos em água) causa uma redução maior que em resfriamento lento (ao ar livre) em

concretos submetidos até 400°C, conforme Figura 2.21. Este fato ocorre em razão da maior quantidade de fissuras resultantes do choque térmico. Entretanto, a partir dos 600°C a redução da resistência torna-se semelhante para ambos as formas de resfriamento.

Figura 2.21 – Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento



Fonte: Neville (1997)

2.2.4 Simulação experimental de incêndio

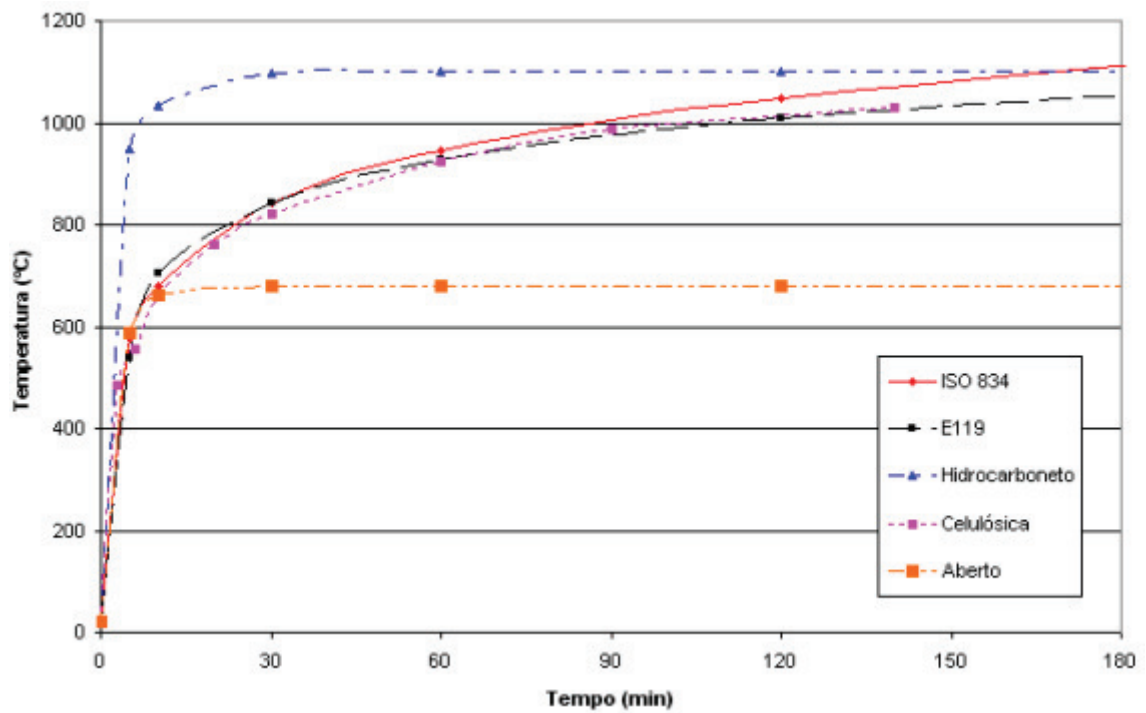
De acordo com Mazzoni (2010) em casos de incêndio em uma construção o engenheiro possui algumas soluções para os mais diversos problemas, há métodos analíticos, numéricos ou experimentos laboratoriais para reconstituir ou simular uma situação real. Sendo que experimentos realizados em laboratórios são capazes de reproduzir com maior fidelidade situações reais.

Conforme Oliveira (2006) a simulação experimental do incêndio real com a realização de ensaios tem a capacidade de verificar a capacidade resistente de estruturas a partir de curvas temperatura x tempo pré-determinadas. A curva de incêndio padrão é a mais difundida. Porém, Moreira (2013) explica que as curvas de incêndio padrão tem o intuito de representar os mesmos efeitos máximos de um incêndio real, no entanto são apenas referências teóricas e simplificadas.

Os modelos de incêndio padrão apresentados pela ASTM E119 e pela ISO-834 são os mais adotados pelas normas da maioria dos países, porém apresentam pequenas diferenças

como é apresentado na Figura 2.22. A ABNT NBR 14432:2001 segue o modelo de incêndio padrão proposto pela ISO-834, conforme a Equação 2.4.

Figura 2.22 – Curvas de incêndio padrão adotadas por diversos países



Fonte: Oliveira (2006)

$$\theta = 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) + \theta_o \quad (2.4)$$

onde,

t – tempo em minutos

θ_o – temperatura ambiente (°C)

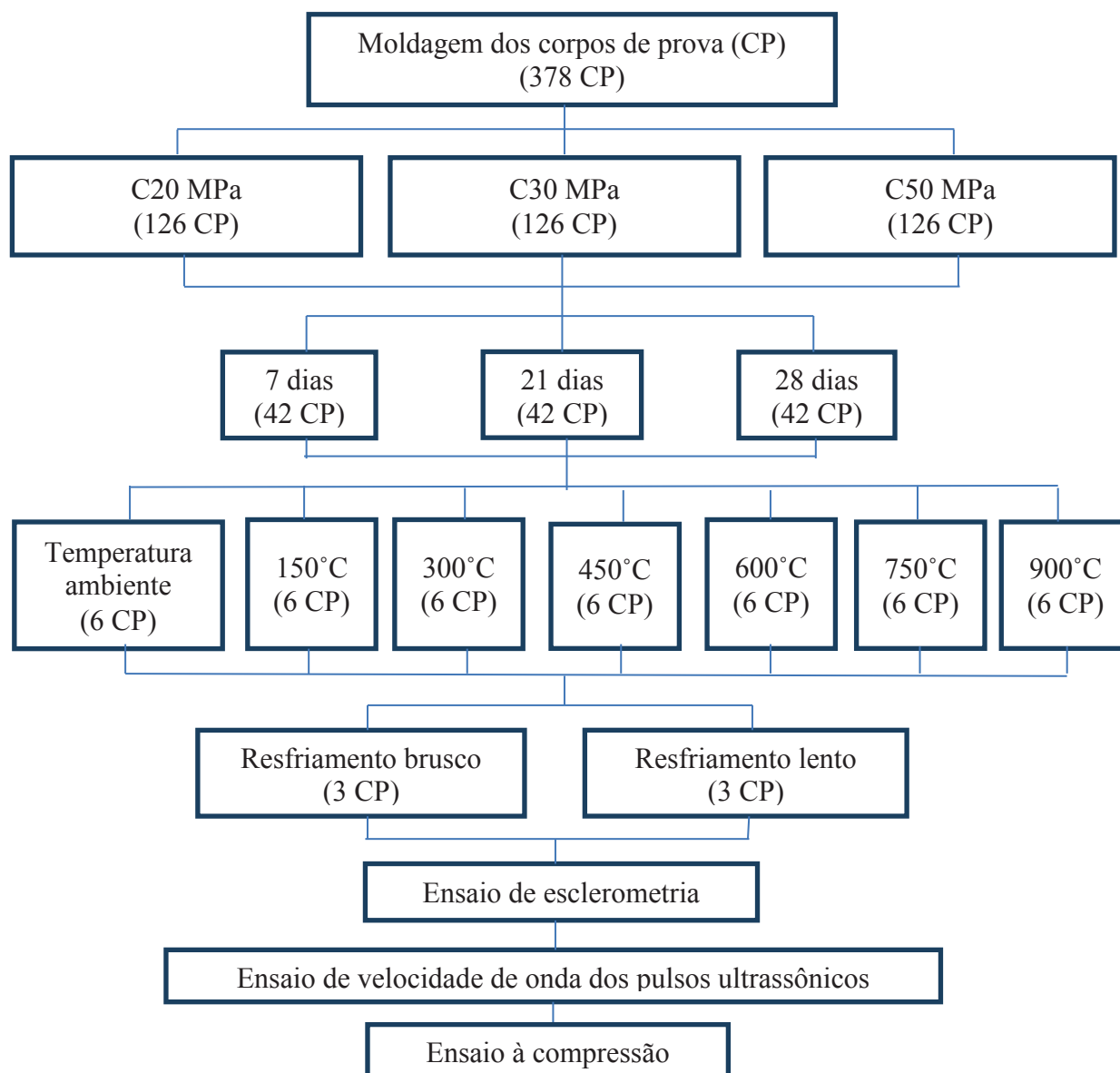
θ – temperatura no instante t

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos desta pesquisa um conjunto de ações metodológicas foi realizado, iniciando-se os estudos com uma revisão bibliográfica sobre os métodos do ultrassom e esclerômetro, bem como, os efeitos do incêndio no concreto, buscando detalhar com pesquisas nacionais e internacionais sobre o assunto.

Em seguida analisou-se a influência da classe e idade do concreto, das altas temperaturas submetidos e a forma de resfriamento na resistência à compressão do concreto correlacionando os resultados obtidos com os métodos citados anteriormente (END) aos oriundos de ensaios destrutivos. Um fluxograma metodológico da pesquisa é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Fluxograma metodológico da pesquisa



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Concreto

Foi definida a utilização de concretos com resistências característica (fck) à compressão aos 28 dias de idade de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa.

Para a confecção dos corpos de prova desta pesquisa, foram utilizados os concretos com fck de 20 MPa e 30 MPa, doados por uma central concreteira da cidade de Umuarama-PR, estes usualmente utilizados em construções da cidade. A dosagem dos concretos foram realizadas conforme recomendações da ABNT NBR 7212:2012 e foram pré-estabelecida pela central dosadora da empresa, conforme Tabelas 3.1 e 3.2. O transporte foi realizado por caminhão betoneira até o laboratório onde estavam os moldes.

Tabela 3.1 Composição por m³ do concreto fck 20 MPa

Materiais	Quantidade
Cimento (kg)	236
Agregado graúdo (kg)	1817
Agregado miúdo natural (kg)	1286
Agregado miúdo artificial (kg)	987
Aditivo (l)	1,770
Relação a/c	0,809
Slump (mm)	160±30

Tabela 3.2 Composição por m³ do concreto fck 30 MPa

Materiais	Quantidade
Cimento (kg)	303
Agregado graúdo (kg)	1896
Agregado miúdo natural (kg)	1175
Agregado miúdo artificial (kg)	901
Aditivo (l)	2,273
Relação a/c	0,634
Slump (mm)	160±30

Já o concreto com fck de 50 MPa, foi dosado conforme recomendações da ABNT NBR 12655:2015, utilizando-se betoneira situada no laboratório da Universidade Estadual de

Maringá, campus Umuarama. E para este caso, tanto a dosagem (conforme Tabela 3.3) como os materiais necessários para a produção do concreto foram cedidos, pela empresa referida anteriormente, também utilizados comercialmente.

Tabela 3.3 Composição por m³ do concreto fck 50 MPa

Materiais	Quantidade
Cimento (kg)	386
Agregado graúdo (kg)	1194
Agregado miúdo natural (kg)	445
Agregado miúdo artificial (kg)	357
Aditivo (l)	3.489
Relação a/c	0.373
Slump (mm)	80±20

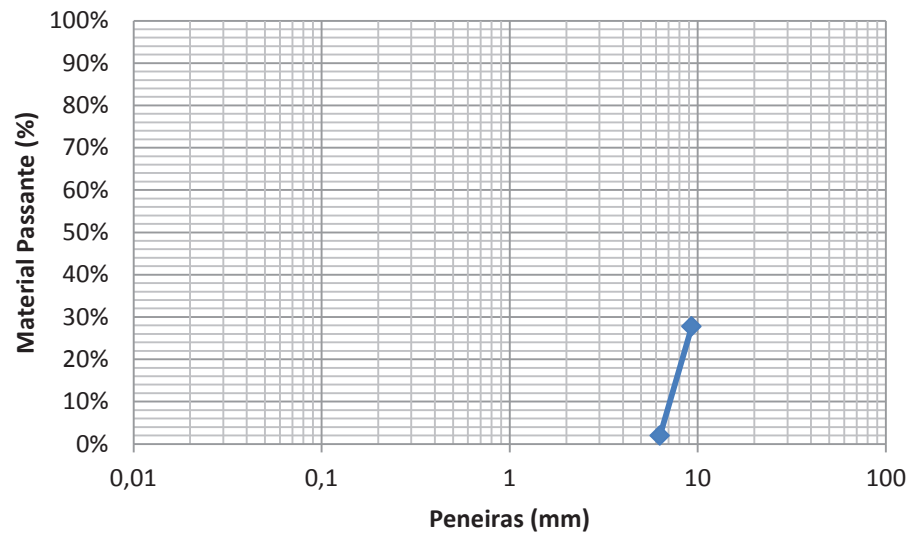
3.1.1.1 Cimento

Para a produção do concreto é utilizado o cimento Portland – CII F 40 da Votorantim Rio Branco. As especificações de suas características físicas, químicas e mecânicas estão apresentadas no ANEXO A.

3.1.1.2 Agregado graúdo

A brita utilizada é de origem basáltica, retirada da região de Umuarama-PR, caracterizada pelos ensaios propostos nas normas ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR NM 53:2009, conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Granulometria do agregado graúdo



3.1.1.3 Agregado miúdo

É utilizado areia natural e areia artificial para a composição deste concreto, ambas caracterizadas pelos ensaios descritos na norma ABNT NBR NM 248:2003, de acordo com as Figuras 3.3 e 3.4.

- Areia natural: origem quartzosa da região de Umuarama-PR.
- Areia artificial: industrializada com origem basalto grossa proveniente da região de Umuarama-PR.

Figura 3.3 – Granulometria do agregado miúdo (areia natural)

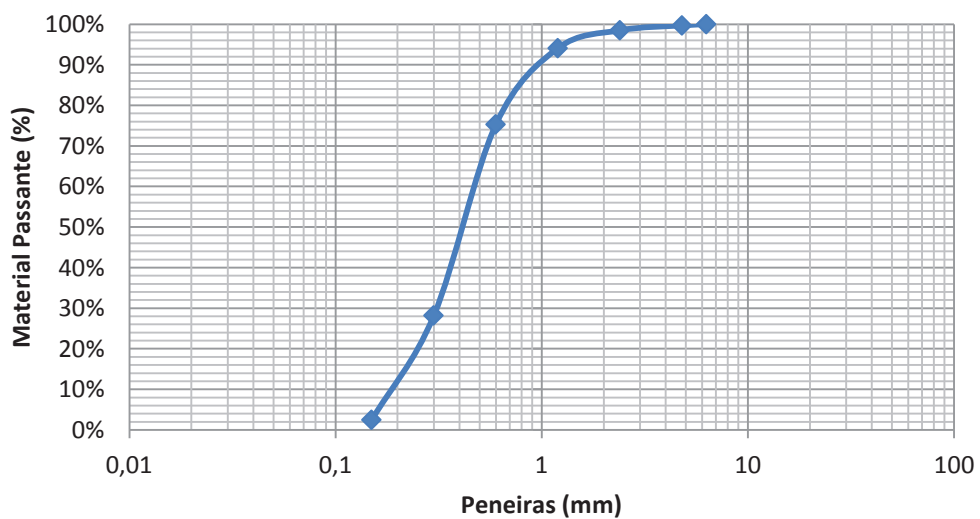
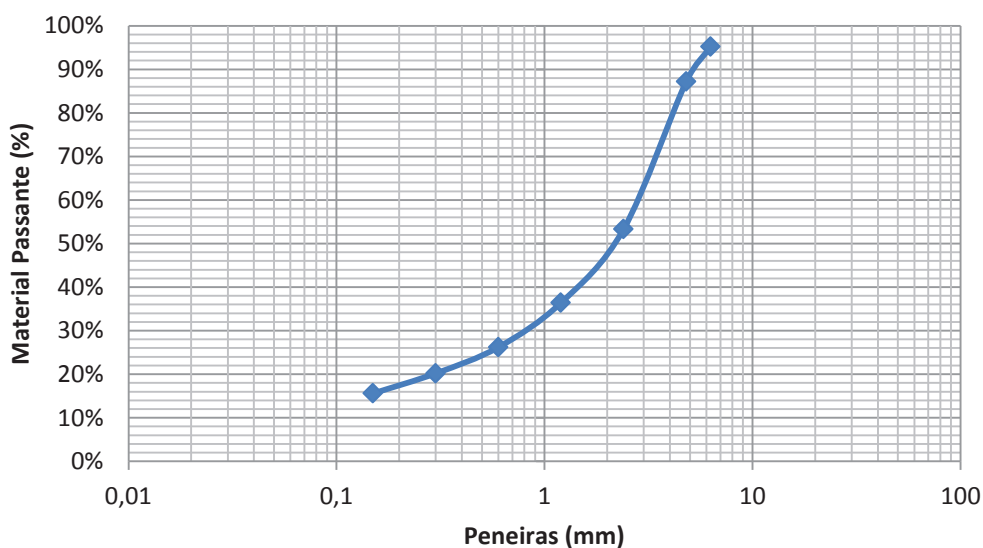


Figura 3.4 – Granulometria do agregado miúdo (areia artificial)



3.1.1.4 Água

A água utilizada é potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade Umuarama-PR.

3.1.1.5 Aditivo

É utilizado o aditivo da Mastermix BF 38 Polifuncional, sendo que de acordo com o fabricante é um aditivo líquido pronto para o uso, livre de cloretos. É indicado para a produção de concretos mais uniformes e com maior qualidade. Propicia redução de água na composição do concreto, sem alterar o tempo de pega, pois este possui componentes que atuam como dispersantes do material cimentício. Atendendo aos requisitos das normas brasileiras ABNT NBR 11768:2011.

3.1.2 Forno

É utilizado o forno do laboratório do Departamento de Tecnologia: Engenharia Civil da UEM, campus Umuarama. O forno é da marca Jung, modelo 7013 e possui o limite de temperatura de 1300°C, como o apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Forno utilizado para submeter os corpos de prova a altas temperaturas



3.1.3 Aparelho de esclerometria

O equipamento utilizado para o ensaio de esclerometria é o esclerômetro do modelo Schimidt tipo N, da marca Proceq, conforme Figura 3.6. Os valores de ricochete que consiste no rebote de uma massa elástica lançada contra uma superfície são lidos a partir de uma escala, para posteriormente calcular-se a média e correlacionar com valores de resistências à compressão.

Figura 3.6 – Aparelho utilizado nos ensaios de esclerometria



Fonte: Proceq (2016)

3.1.4 Aparelho de ultrassonografia

Para a realização das leituras das velocidades dos pulsos ultrassônicos é utilizado o equipamento de ultrassonografia da marca Proceq, modelo PunditLab, conforme Figura 3.7. Este aparelho é composto por bloco de calibração, dois cabos BNC com 1,5 m, dois

transdutores com diâmetro de 50mm, o emissor e o receptor. Com frequência utilizada de 54Hz para execução de todas as combinações, conforme especificações quanto às dimensões dos corpos de prova.

Figura 3.7 – Aparelho utilizado nos ensaios de ultrassonografia



Fonte: Proceq (2016)

3.1.5 Material acoplante

É utilizada a vaselina como material acoplante entre as faces dos transdutores e do corpo de prova ensaiado, um dos materiais recomendados pela ABNT NBR 8802:2013.

3.1.6 Prensa hidráulica

Para os ensaios de resistência à compressão é utilizada a prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC200C, com capacidade de carga de 200.000 kgf (2MN), conforme apresentada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Prensa hidráulica utilizada nos ensaios à compressão



3.2 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

As moldagens dos corpos de prova de concreto foram realizadas conforme a ABNT NBR 5738:2015, em etapas, estas divididas por classe (20, 30 e 50 MPa) de concreto estudado, a moldagem ocorreu no primeiro dia de cada etapa.

Para cada classe de resistência foram moldados 126 (cento e vinte e seis) corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, onde em cada idade analisada eram expostos 6 testemunhos em 7 diferentes temperaturas, que resultou em 42 CP por idade. Ao final da pesquisa foram moldados 378 corpos de prova para as três classes.

As desformas foram realizadas 24 h após as moldagens.

3.3 EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS E RESFRIAMENTO

Para os concretos moldados com diferentes resistências à compressão serão adotados os mesmos procedimentos.

Os corpos de prova para todas as classes de resistência foram submetidos a elevadas cargas de temperatura em um forno nas dependências da Universidade Estadual de Maringá, campus Umuarama, em idade de 7, 21 e 28 dias.

Em cada idade foram submetidos 6 (seis) corpos de prova para 7 (sete) patamares diferentes de temperatura, sendo: temperatura ambiente, 150°C, 300°C, 450°C, 600°C, 750°C,

900°C. Segundo a ISO 834 para a simulação da curva de incêndio padrão a taxa de aquecimento deve ser de 27,4°C, sendo pré-estabelecida no forno. A partir do momento em que se atingia o patamar da temperatura desejado, era necessário manter esta temperatura por mais 30 minutos.

Passados os 30 minutos de exposição a uma determinada temperatura constante eram divididos os corpos de prova, três resfriaram de forma brusca, sendo colocados em um recipiente com água em temperatura ambiente, conforme Figura 3.9, por 60 minutos, posteriormente eram retirados e deixados em temperatura e umidade ambiente, e três resfriaram de forma lenta, onde foram deixados resfriarem em temperatura e umidade ambiente desde a retirada do forno.

Figura 3.9 – Resfriamento brusco



3.4 ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

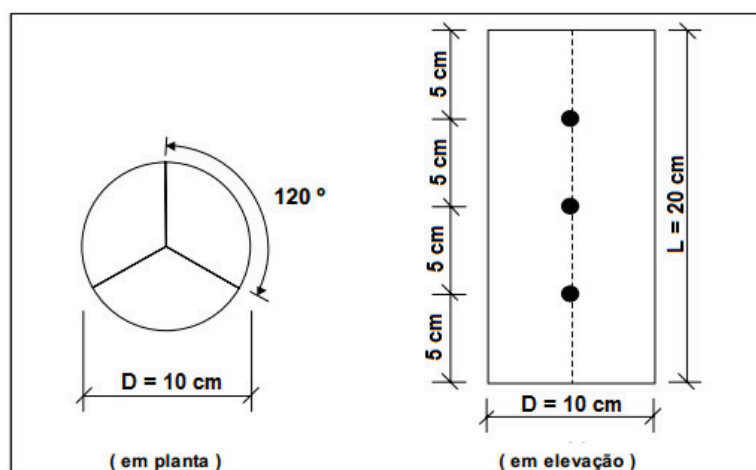
Após 24 horas da retirada dos corpos de prova do forno, era realizado o ensaio de esclerometria.

Para este ensaio foi utilizado o esclerômetro do modelo Schmidt tipo N, conforme metodologia proposta pela ABNT NBR 7584:2012, Figura 3.10. Como o corpo de prova é cilíndrico, foram realizadas nove medições do índice esclerométrico em cada CP, sendo três pontos de medição separados radialmente a cada 120°, equidistantes entre si e na vertical 5 cm distante da borda, conforme se apresenta na Figura 3.11, tendo-se o cuidado de afastar de regiões de segregação, exsudação, falhas.

Figura 3.10 – Ensaio de esclerometria



Figura 3.11 – Posicionamento dos pontos para utilização do esclerômetro



Deve ser feita a calibração do equipamento de acordo com instruções dadas pelo fabricante, sempre que for iniciar o ensaio ou após 300 impactos, sendo realizada através de 16 impactos contra uma bigorna especial de aço com massa aproximada de 16 kg, como ilustrado na Figura 3.12, gerando em cada impacto uma leitura na régua graduada do esclerômetro, para então calcular-se o fator de correção (K) para as médias de leituras esclerométricas. O cálculo de K se da pela equação 3.1 e exemplificado na Tabela 3.4.

$$K = \frac{n \times IE_{nom}}{\sum_{i=1}^n IE_i} \quad (3.1)$$

Sendo,

n = número de impactos

IE_{nom} = fornecido pelo fabricante

IE_i = IE obtido de cada impacto na bigorna de aço.

Tabela 3.4 – Obtenção do fator de correção

Aferição	
Pontos	Leitura
1	76
2	78
3	76
4	78
5	76
6	76
7	78
8	78
9	76
10	77
11	76
12	76
13	78
14	76
15	78
16	78
Soma	1231
I.E. (Fabricante)	80
Fator de correção	1,039805

Figura 3.12 – Calibração do esclerômetro



Para o cálculo do índice esclerométrico (IE) de cada corpo de prova foi realizada a média I das 9 leituras e descartados os valores em que se distanciavam em $\pm 10\%$ do valor médio I obtido e recalculado a média II, agora sem os valores descartados. Aplicando-se então o fator de correção (K) e obtendo-se o valor de rebote (R), conhecido como I.E. corrigido, conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Procedimento para obtenção do valor de IE

50 MPa - 750°C - 7 dias – Resfriamento Lento						
Pontos	CP 1		CP 2		CP 3	
1	32		34		32	
2	32		34		33	
3	38		34		38	
4	30		34		30	
5	34		34		34	
6	34		38		36	
7	34		33		30	
8	34		32		34	
9	38		32		35	
Média I	34,00	37,40	33,89	37,28	33,56	36,91
		30,60		30,50		30,20
Média II	33,33		33,38		34,00	
I.E. corrigido	34,66		34,70		35,35	

3.5 ENSAIO DE ULTRASSOM

Após realizar o ensaio de esclerometria, inicia-se o ensaio de ultrassonografia.

O aparelho deve ser calibrado antes de cada ensaio, utiliza-se o bloco de calibração para isto, sendo que o valor esperado (μs) é marcado nele, como apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Calibração do aparelho de ultrassom



As leituras de ultrassom foram realizadas do modo de transmissão direta. São realizadas de acordo com a ABNT NBR 8802:2013, conforme mostrado na Figura 3.14. Baseando-se em determinar o tempo em que a onda ultrassônica demora a atravessar o elemento de concreto, do transdutor emissor ao transdutor receptor.

Figura 3.14 – Ensaio ultrassônico com transmissão direta



Primeiramente as peças ensaiadas devem ser previamente limpas e secas superficialmente, posteriormente mede-se o comprimento do corpo de prova de concreto, distância em que a onda ultrassônica irá percorrer. Em seguida, posiciona-se o transdutor emissor em uma face e o transdutor receptor em outra, alinhados entre si e acoplados com vaselina (para evitar que exista camada de ar entre os transdutores e as superfícies de ensaio), resultando na velocidade do pulso ultrassônico. Foram realizadas 3 leituras em cada corpo de prova e em seguida obteve-se a média. A velocidade da propagação da onda ultrassônica para cada caso estudado se deu pela média obtida dos 3 corpos de prova, conforme exemplificado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Procedimento para obtenção da velocidade de propagação da onda ultrassônica

50 MPa - 150°C – 7 dias – Resfriamento Brusco	
CP	Velocidade (m/s)
1	5129
	5103
	5051
Média CP I	5094
2	4950
	4975
	4963
Média CP II	4963
3	5052
	5013
	5039
Média CP III	5034
Média situação	5030

3.6 ENSAIO À COMPRESSÃO

Na sequência do ensaio de ultrassom, realiza-se o ensaio à compressão onde é utilizada a prensa hidráulica do laboratório do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, campus Umuarama.

Para a determinação da resistência característica à compressão dos corpos de prova já ensaiados de maneira não destrutiva, segue-se os procedimentos recomendados na ABNT NBR 5739:2007. Os corpos de provas são rompidos na prensa hidráulica e a própria máquina fornece a força máxima aplicada, assim resultando na tensão de compressão máxima que o concreto suportou.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos nos ensaios à compressão, da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e índice esclerométrico obtidos nos corpos-de-prova ensaiados, dando-se ênfase nas variáveis analisadas, como aumento de temperatura, classe de resistência, idade e forma de resfriamento. Em seguida, correlaciona-se os valores obtidos das velocidades ultrassônicas e os índices esclerométricos com as resistências obtidas a partir do método destrutivo (ensaio à compressão).

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

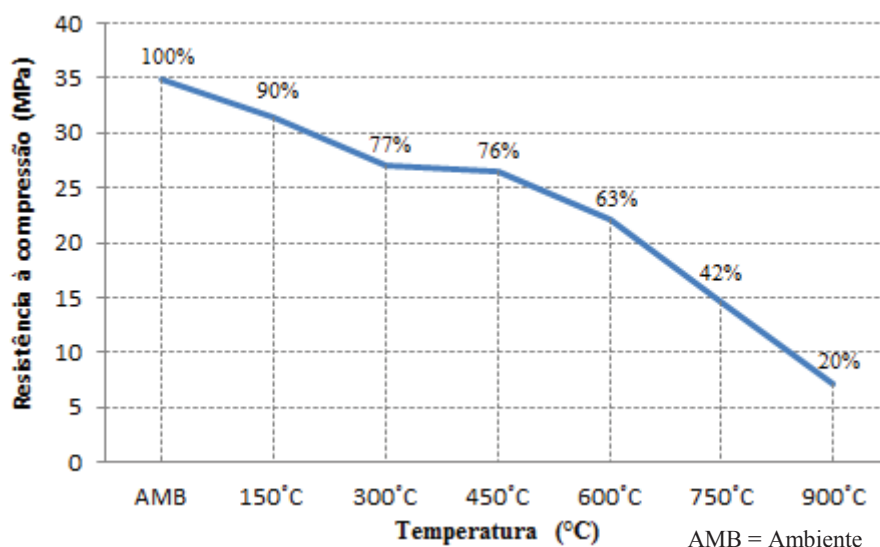
Foi realizado o ensaio à compressão em três corpos de prova para cada situação. Iniciou-se com o concreto de classe 20 MPa, posteriormente 30 MPa e por fim, o 50 MPa. Todos foram analisados aos 7, 21 e 28 dias, após serem expostos a diferentes patamares de temperatura, variando da temperatura ambiente até 900°C, sendo resfriados lentamente ou bruscamente.

Os valores obtidos através do ensaio à compressão encontram-se no APÊNDICE A, onde foram realizadas a média dos três corpos de prova, adotando-se a média como a resistência à compressão para cada situação estudada.

4.1.1 Efeito da temperatura

Não levando-se em consideração todas as variáveis do estudo, apenas considerando o efeito da temperatura no material concreto, nota-se que a resistência à compressão sofre um decréscimo gradativo quando exposto à patamares de temperaturas mais elevados. Na Figura 4.1 pode ser observado as médias das resistências observadas em porcentagens, em relação à média dos concretos mantidos em temperatura ambiente (AMB).

Figura 4.1 – Médias em porcentagem das resistências à compressão residuais



Hager (2013) ensaiou os corpos de prova ainda expostos a altas temperaturas, sem passar por nenhum tipo de resfriamento e verificou que entre as temperaturas de 20°C e 120°C houve redução de 20% a 30% na resistência residual, sendo que neste presente trabalho a variação não ultrapassou 10%. O esperado seria maior resistência residual nos corpos de prova ensaiados por Hager (2013), pois o resfriamento causa maior degradação do concreto que resulta em resistências ainda menores.

Porém, estudos realizados por Mohamedbhai (1986) atingiram intervalos de resistência residual na ordem de 77% a 85% na temperatura de 200°C, 68% a 83% a 400°C, 48% a 69% à 600°C e 29% a 34% à 800°C. Intervalos estes que abrangem, ou estão próximos dos resultados obtidos neste trabalho, os dois analisados após resfriados, entretanto com o tempo de exposição ao calor sendo menor neste caso.

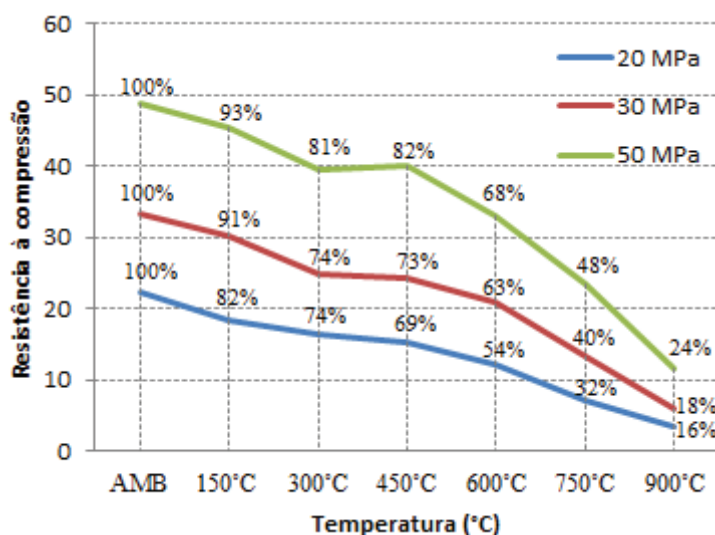
Há várias causas que podem variar a porcentagem de perda da resistência à compressão dos concretos ensaiados comparado com o concreto padrão (em temperatura ambiente), podendo ser fatores intrínsecos ao concreto ou relativo às condições de ensaios. Como exemplo a classe do concreto, relação água/cimento, taxa de aquecimento, tempo de exposição aos patamares de temperatura ou forma de resfriamento.

4.1.2 Efeito da classe do concreto

Neste momento é analisado o efeito do aumento das temperaturas sobre as diferentes classes de concreto, de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa. Na Figura 4.2 estão indicados em

porcentagem as médias das resistências à compressão residuais para cada uma das classes, para todas as idades e tipos de resfriamentos.

Figura 4.2 – Média em porcentagem das resistências à compressão residuais por classe de concreto



Observa-se na Figura 4.2 que para todas as classes de concreto a resistência à compressão ocorre decréscimo acentuado entre a temperatura ambiente e 300°C, porém para o concreto de maior f_{ck} a resistência à compressão residual em porcentagens fica 7% mais alta que para os outros concretos, que mantiveram 74% da resistência. Entre as temperaturas de 300°C a 450 °C é possível perceber que há um patamar com pouca redução ou até um pequeno aumento, mas não apresentando diferenças significativas entre essas duas temperaturas. E novamente nota-se decréscimo, ainda mais acentuada, deixando o patamar de 450°C variando de 69% a 82% de resistência residual e chegando a 900°C com variação de 16% a 24%, reduzindo em média 55%.

É importante observar que a resistência à compressão residual é sempre superior nos concretos de f_{ck} maior, em qualquer patamar de temperatura o concreto de f_{ck} 50 MPa obteve a resistência residual maior que o concreto de f_{ck} 30 MPa, e por fim o concreto de f_{ck} 30 MPa maior que o concreto de 20 MPa, contrariando Buchanan (2002), onde afirma que concretos de maior resistência característica resistem menos a altas temperaturas, perdendo mais resistência se comparado com concretos de menores resistências características.

4.1.3 Efeito da idade do concreto

Foi realizado os ensaios para diferentes idades do concreto, com o intuito de analisar o comportamento de concretos de pouca idade em caso de incêndio em uma obra em construção.

Analisando-se as Figuras 4.3 a 4.5 é possível perceber a mesma semelhança com o gráfico observado apenas a classe do concreto com o aumento de temperatura. Entretanto, é notório que aos 28 dias todas as classes de concreto apresentam resistências à compressão superior que aos 21 dias e aos 21 dias superior que aos 7 dias. E analisando separadamente as classes de concreto quando submetidos a 750°C e 900°C, as resistências residuais independem da idade, tendendo a valores muito semelhantes.

Figura 4.3 – Resistência à compressão do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

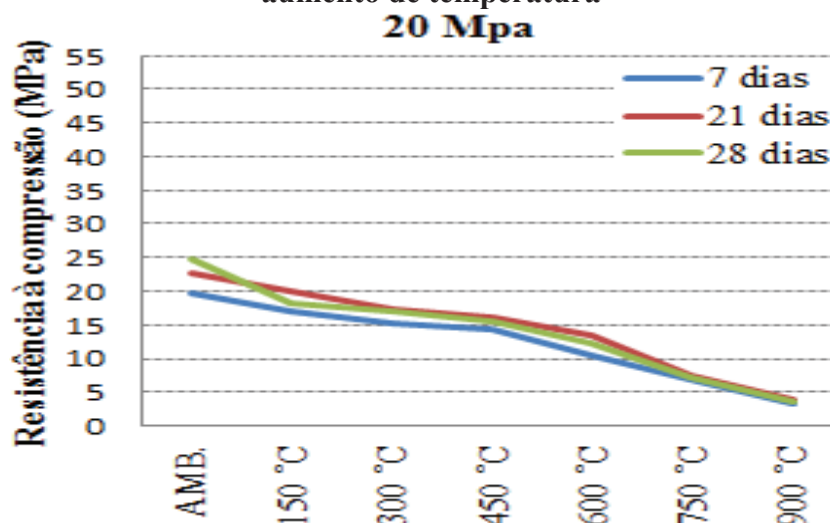


Figura 4.4 – Resistência à compressão do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

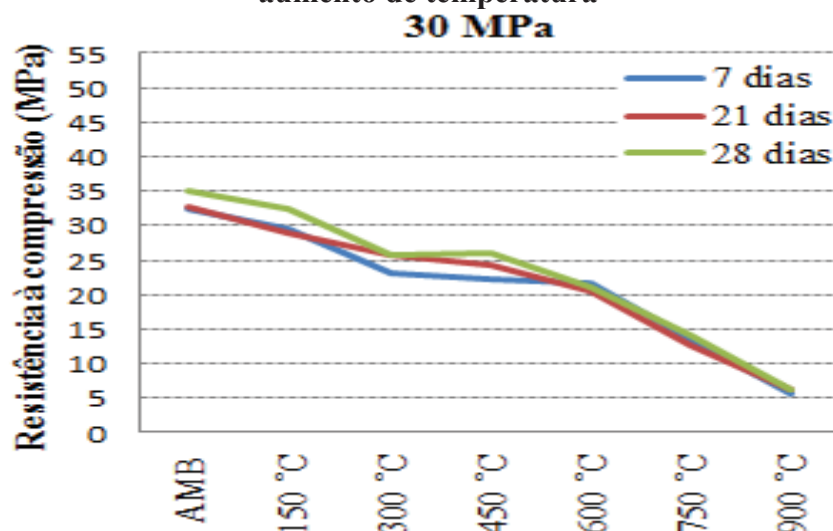
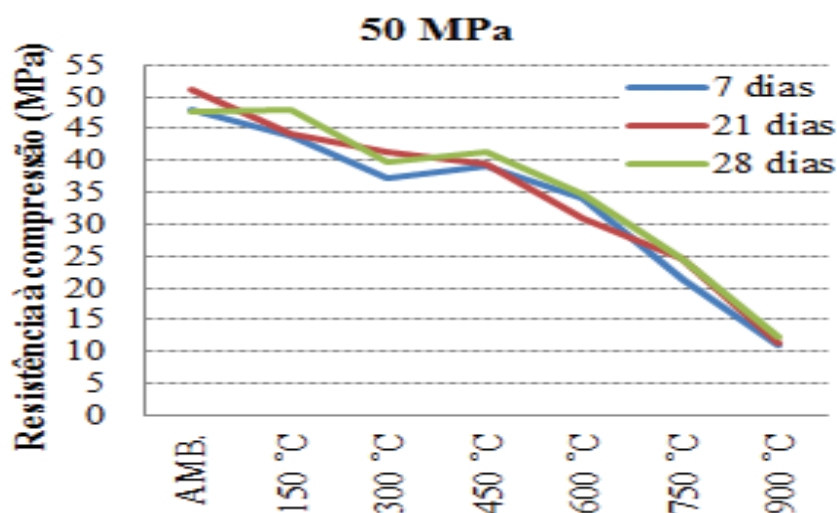


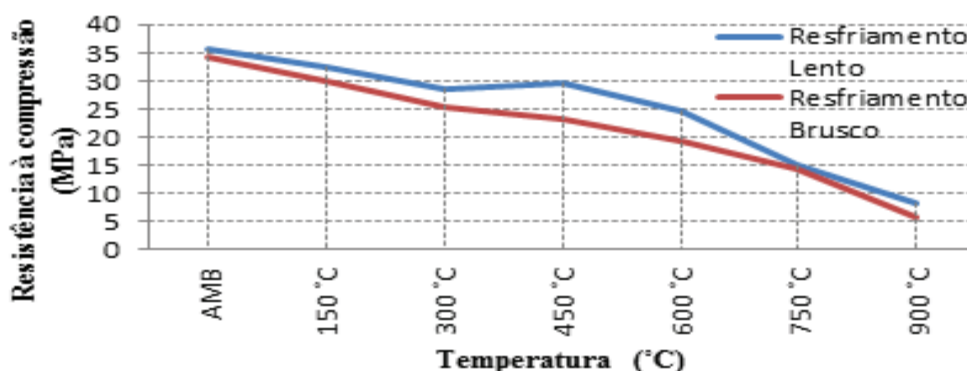
Figura 4.5 – Resistência à compressão do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura



4.1.4 Efeito da forma de resfriamento

Analizando apenas a forma como os corpos de prova foram resfriados após expostos a altas temperaturas, sem levar em consideração a classe ou idade do concreto, obteve-se decréscimos conforme apresentado na Figura 4.6.

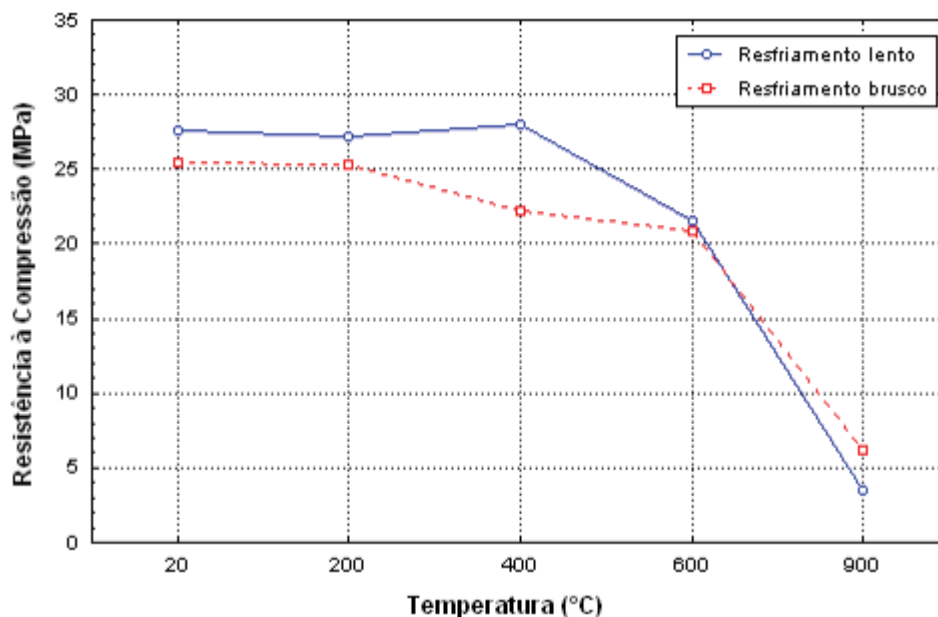
Figura 4.6 – Resistências à compressão conforme forma de resfriamento



Na Figura 4.6 observa-se a maior perda de resistência à compressão nos concretos que sofreram resfriamento brusco, imersos em água logo após serem expostos aos patamares de temperatura estudados. Nas temperaturas 300°C, 450°C e 600°C a diferença de resistência é ainda maior entre as formas de resfriamento. Por este gráfico, é possível perceber que para os casos anteriores estudados onde os concretos entre os patamares 300°C e 450°C sofriam desaceleração do decréscimo da resistência ou até pequeno incremento da resistência, é devido à forma de resfriamento do tipo lento, onde sofre aumento de quase 5% na resistência à compressão.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por Wendt (2006) que pode ser visualizado na Figura 4.7, é possível afirmar que a forma de resfriamento é um fator que realmente interfere nas resistências à compressão após os concretos serem expostos a altas temperaturas, pelo fato de os dois trabalhos mesmo não usando os mesmos agregados ou traços para confecção dos concretos, ainda assim apresentaram resultados bastante semelhantes quanto à forma de decréscimo ou incremento das resistências.

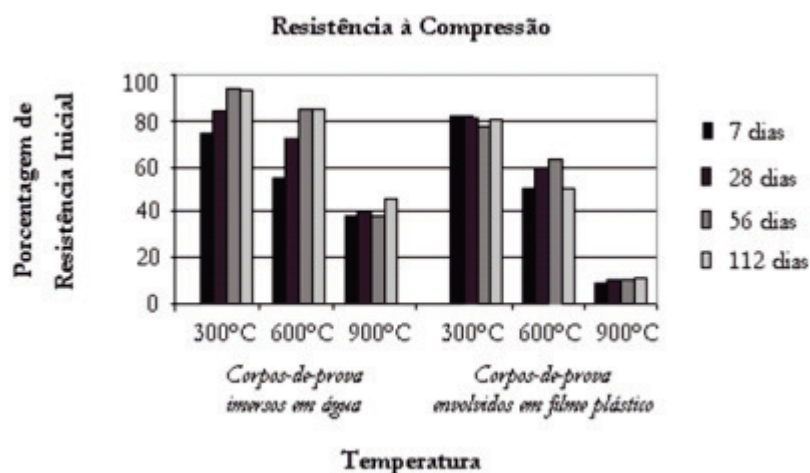
Figura 4.7 – Média das resistências à compressão por tipo de resfriamento



Fonte: Wendt (2006)

Souza e Moreno Jr. (2010) ainda concluem que a velocidade de resfriamento pode ser considerada um fator de grande influência no efeito de altas temperaturas, alterando as propriedades mecânicas do concreto, onde afirma que ocorre redução de resistência devido aos intensos gradientes que são originados no interior do mesmo. A forma encontrada pelos mesmos para a recuperação parcial foi deixando os corpos de prova imersos em água por 7 a 112 dias, onde observaram aumento das resistências com o passar do tempo, pelo fato de ocorrer reidratação. Conforme pode ser observado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Recuperação da resistência à compressão em relação à resistência inicial do concreto em função do tempo de hidratação



Fonte: Souza e Moreno Jr. (2010)

4.2 VELOCIDADE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS

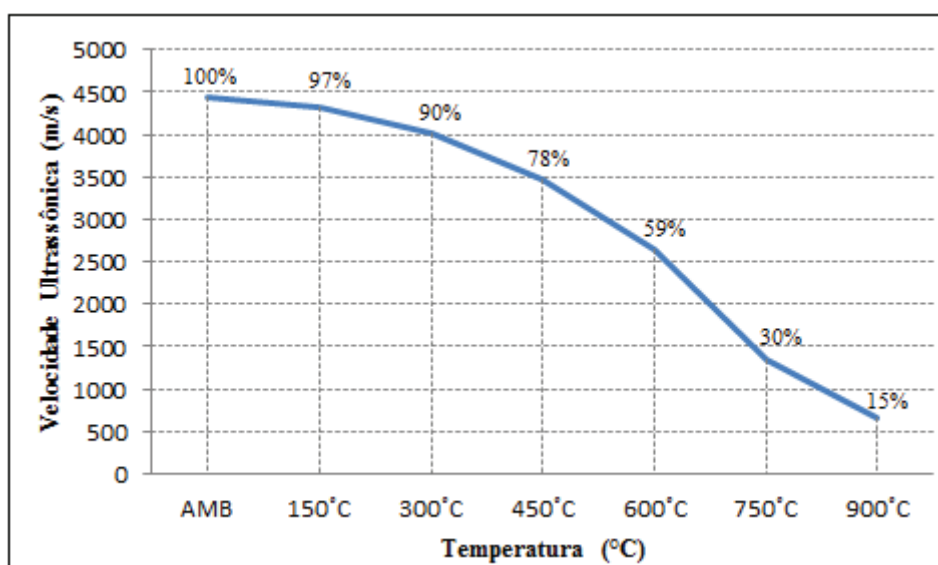
Foram realizadas leituras das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos corpos de prova, em todas as situações já comentadas anteriormente, expostos a diferentes patamares de temperaturas, alterando-se a classe e idade do concreto, bem como a forma de resfriamento.

Os valores obtidos através das leituras das velocidades ultrassônicas encontram-se no APÊNDICE B, onde foi realizada a média das três leituras de cada corpo de prova, posteriormente calculando-se a média das velocidades dos três corpos de prova de cada situação, sendo adotada a média como a velocidade ultrassônica para cada caso.

4.2.1 Efeito da temperatura

Levando-se em consideração apenas o efeito da temperatura no material concreto, nota-se que a velocidade da onda ultrassônica sofre um decréscimo gradativo quando exposto a patamares de temperaturas mais elevados, o que indica que há o aumento na degradação do concreto, gerando mais vazios e consequentemente diminuição da velocidade. Na Figura 4.9 pode ser observado as médias das velocidades em porcentagens com relação à média dos corpos de prova mantidos em temperatura ambiente.

Figura 4.9 – Médias em porcentagem das velocidades ultrassônicas residuais



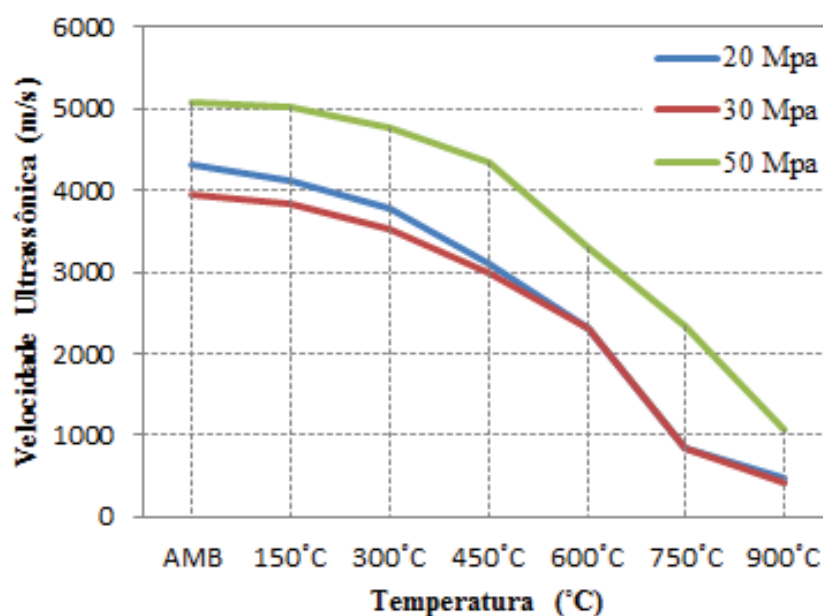
Analisando o trabalho realizado por Wendt (2006) e Lima, Caetano e Silva Filho (2004) os resultados apresentados neste trabalho se mostram em conformidade, pelo fato de ser bastante semelhante aos obtidos por eles. Sendo que no primeiro trabalho aos 400°C a velocidade ultrassônica residual foi de 87% enquanto no segundo de 85% e neste foi em torno de 82%. Wendt em 600°C obteve velocidade ultrassônica residual de 54% e de aproximadamente, 25% em 800°C, semelhantes aos resultados deste trabalho, que em 600°C apresentaram diferença de apenas 5% e em 800°C, a velocidade ultrassônica residual é aproximadamente a mesma.

O mesmo acontece em 900°C comparando com o trabalho de Wendt (2006) que obtem 10% e com o trabalho de Silva (2009), onde o resultado é de aproximadamente 13%, apontando boas médias de valores obtidos.

4.2.2 Efeito da classe do concreto

Nesta etapa é analisado o efeito do aumento das temperaturas sobre as diferentes classes de concreto, de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa em relação as leituras das velocidades ultrassônicas. Na Figura 4.10 estão indicados os valores médios das velocidades das ondas de ultrassom para cada uma das classes.

Figura 4.10 – Média das velocidades das ondas de ultrassom por classe de concreto



Observa-se na Figura 4.10 que as velocidades ultrassônicas das diferentes classes de concreto possuem a mesma tendência de decréscimo, desenhando linhas bastante semelhantes.

Entretanto, o esperado era que as velocidades do pulso ultrassônico se comportassem da mesma forma em que as resistências à compressão, com valores menores para classes inferiores e vice-versa. Porém, é possível notar que ao realizar a leitura das velocidades até os 600°C a média dos resultados dos concretos C20 foi mais elevada que os C30. No entanto, Silva (2009) observou resultados muito semelhantes em estudo realizado com concretos de fck 28MPa e 35MPa, o concreto de fck maior obtendo velocidade menor, apenas aos 900°C que isto inverteu. Diferenciando-se os trabalhos à partir dos 600°C, que neste as médias praticamente se igualaram neste patamar de temperatura.

4.2.3 Efeito da idade do concreto

Foi realizado leituras para diferentes idades do concreto, com o intuito de analisar a eficiência do equipamento de ondas de ultrassom em concretos com pouca idade.

Nas Figuras 4.11 a 4.13 é notório a semelhança de valores nas diferentes idades para cada classe de concreto, não sendo possível verificar velocidades maiores ou menores para determinada idade. Apenas no concreto de 30 MPa é possível observar aos 750°C e 900°C maior velocidade para os concretos mais novos, podendo ser explicado pela falta de precisão que o aparelho de ultrassom apresentou nestes patamares de temperatura para os concretos C20 e C30.

Figura 4.11 – Velocidade ultrassônica do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

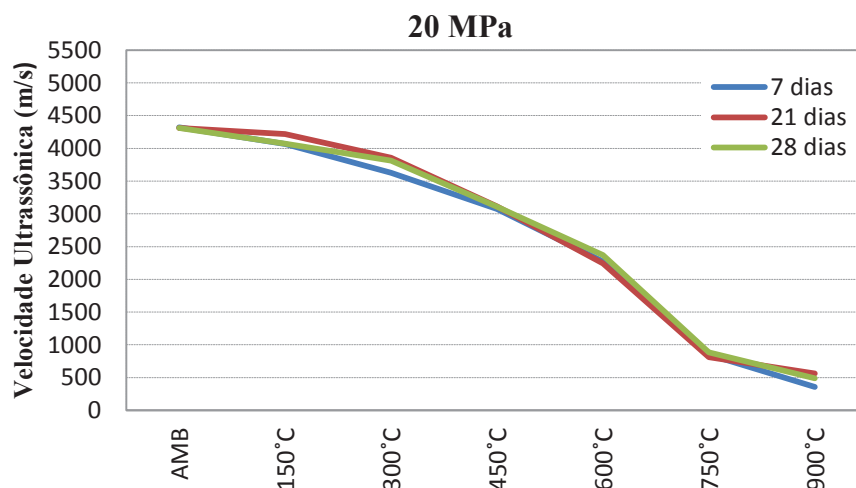


Figura 4.12 – Velocidade ultrassônica do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

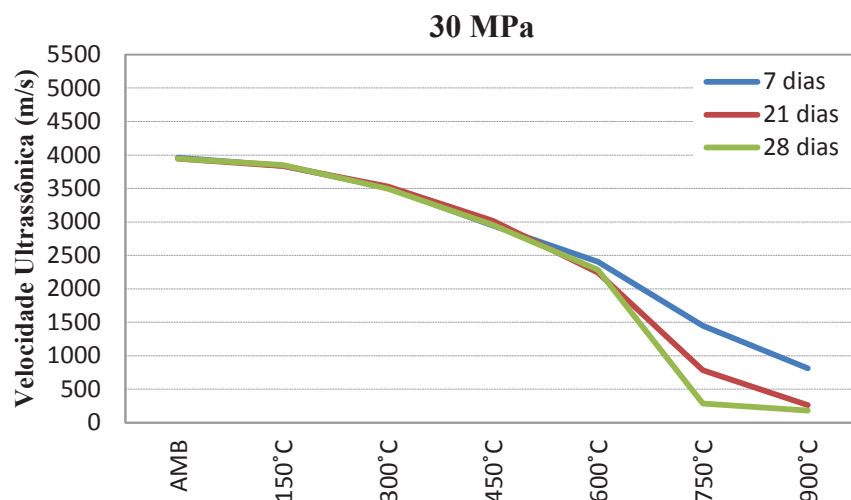
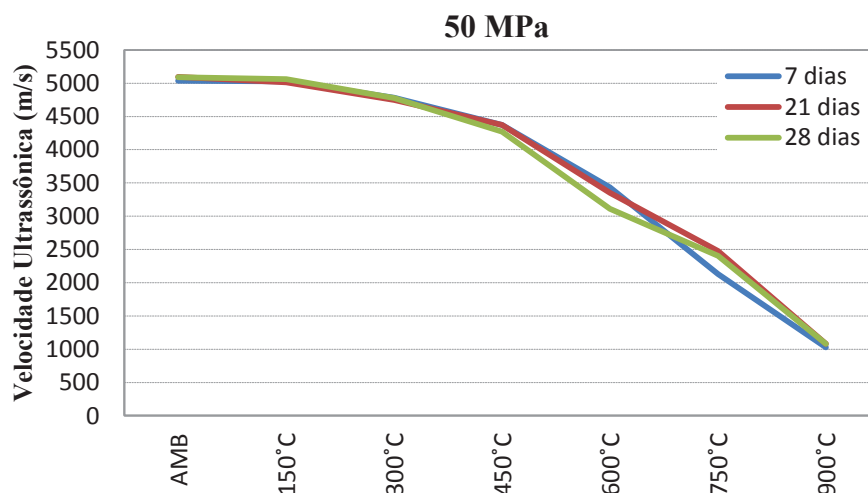


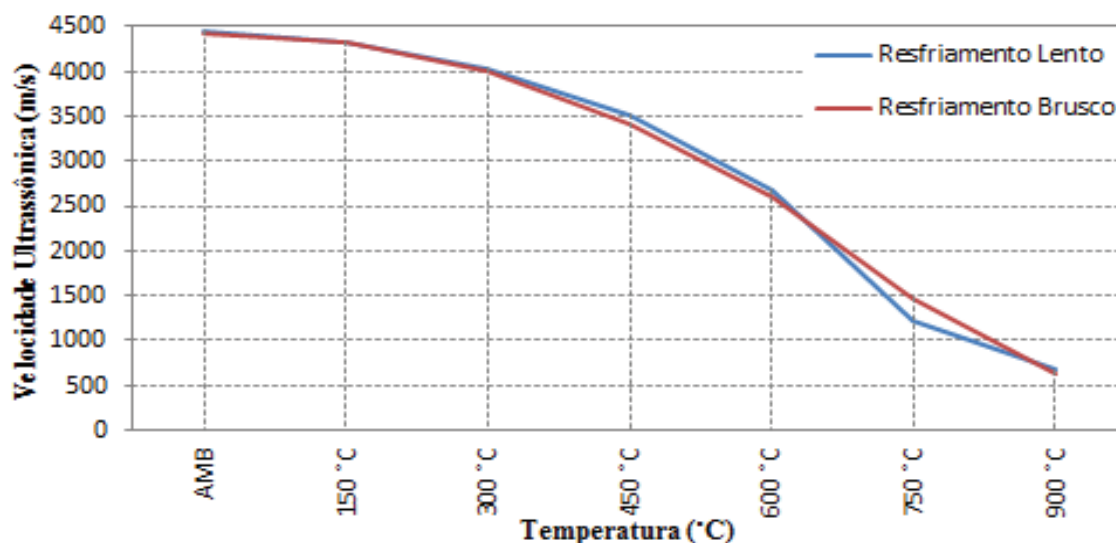
Figura 4.13 – Velocidade ultrassônica do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura



4.2.4 Efeito da forma de resfriamento

Neste momento são analisadas as velocidades das ondas de ultrassom apenas na forma como os corpos de prova foram resfriados após expostos a altas temperaturas, sem levar em consideração a classe ou idade do concreto, conforme Figura 4.14.

Figura 4.14 – Velocidade ultrassônica conforme forma de resfriamento



Na Figura 4.14 nota-se que diferentemente do que foi observado para esta variável na análise da resistência a compressão, houve pouca influência na leitura das velocidades de ultrassom pela forma em que foi resfriado os concretos. O mesmo foi obtido no trabalho de Wendt (2006). Entretanto, são dados já esperados, pois como comentado anteriormente, um dos fatores que influenciam na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é a presença de água, umidade, então os corpos de prova resfriados bruscamente absorvem a água, resultando em velocidades maiores.

4.3 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO

Foi realizado o ensaio com o aparelho esclerômetro em nove pontos de cada corpo de prova, sendo três corpos de prova para cada situação. Iniciou-se com o concreto de classe 20 MPa, posteriormente 30 MPa e por fim, o 50 MPa. Todos foram analisados aos 7, 21 e 28 dias, após serem expostos a diferentes patamares de temperatura, variando da temperatura ambiente até 900°C e sendo resfriados lentamente ou bruscamente.

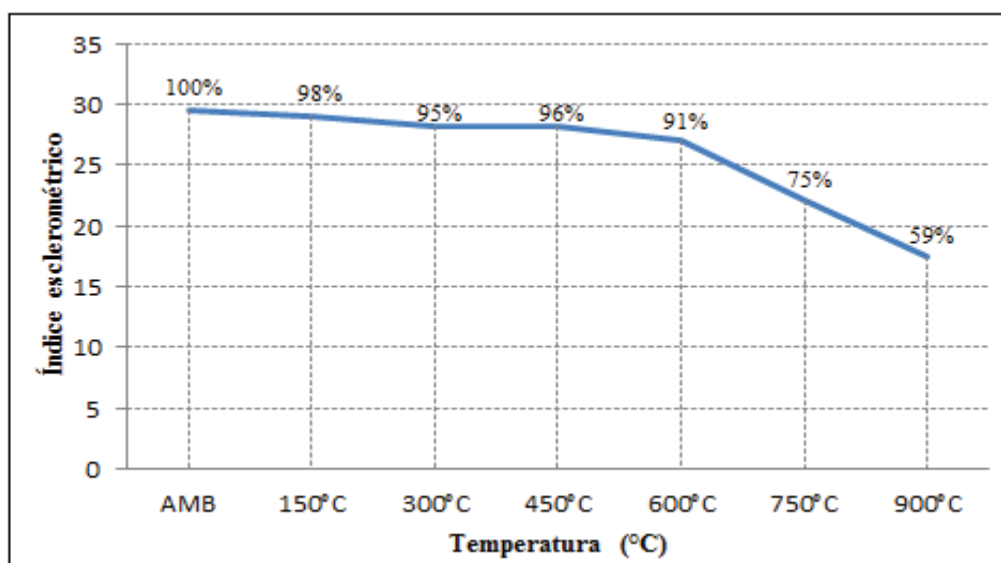
Os valores obtidos através dos ensaios à esclerometria encontram-se no APÊNDICE C, onde foram realizadas as médias das leituras, excluindo-se os valores que variam $\pm 10\%$, recalculando-se. Nesta média aplica-se o fator de correção, obtido através da aferição do esclerômetro e assim resulta-se o índice esclerométrico de cada corpo de prova. Após é feito a média dos índices esclerométricos obtidos nos três corpos de prova, portanto sendo este o índice esclerométrico da situação estudada.

4.3.1 Efeito da temperatura

Neste item é observado o concreto sem levar em consideração a sua classe, idade, ou forma de resfriamento, apenas o aumento de temperatura.

Na Figura 4.15 pode ser observado os índices esclerométricos percentualmente em relação à média dos corpos de prova mantidos em temperatura ambiente.

Figura 4.15 – Médias em porcentagem dos índices esclerométricos residuais



Na Figura 4.15 nota-se que o índice esclerométrico sofre descréscimo gradativo a quase todos os aumentos de temperaturas, exceto quando trata-se de 300°C para 450°C que há aumento e após os 600°C o caimento da curva se torna mais íngreme do que nas temperaturas inferiores.

Segundo gráficos expostos por Ercolani, Ortega e Señas (2007), apesar do estudo ter sido realizado apenas para os patamares de temperatura igual a 250°C, 500°C e 750°C, causando um pouco de perdas de dados nestes intervalos, é perceptível que o índice esclerométrico se mantém até os 250°C e a partir de 250°C até os 750°C a queda é acentuada, chegando ao último patamar de temperatura estudado com valores bem inferiores ao encontrado neste estudo. Os valores podem ser considerados semelhantes até aos 250°C onde em ambos os trabalhos eles se mantêm com pouca queda, após isto até os 500°C há uma disparidade, os resultados obtidos no trabalho deles se deu de forma muito mais abrupta e após os 500°C em ambos a redução se deu de forma abrupta, não reduzindo tanto neste

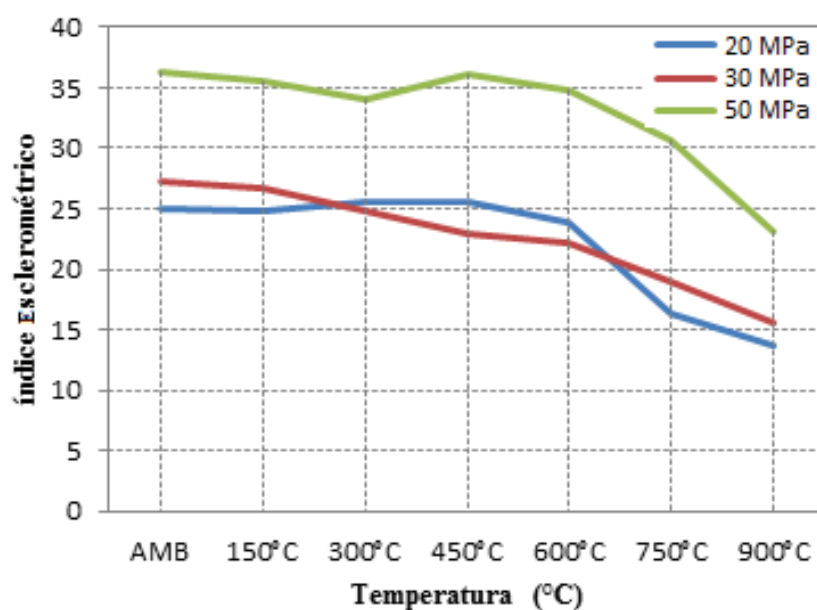
trabalho o índice esclerométrico aos 750°C pelo fato de ter havido intervalos com redução mais suave.

Ainda conforme Ercolani, Ortega e Señas (2007) há declínio mais acentuado no índice esclerométrico nos casos onde o concreto possui uma estrutura mais porosa, fato que foi possível observar a olho nu nos concretos expostos a temperaturas igual ou superior a 600°C.

4.3.2 Efeito da classe do concreto

Nesta etapa é analisado o efeito do aumento das temperaturas sobre as diferentes classes de concreto, de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa em relação aos índices esclerométricos resultantes. Na Figura 4.16 estão indicados os valores médios dos índices esclerométricos para cada uma das classes.

Figura 4.16 – Média dos índices esclerométricos por classe de concreto



Observa-se na Figura 4.16 que os índices esclerométricos das diferentes classes de concreto possuem na maioria das temperaturas tendências de quanto mais elevadas, menor serem os índices, porém em alguns patamares há aumento. Sendo perceptível maiores índices esclerométricos para concretos com f_{ck} maiores, exceto entre a temperatura de 300°C e 600°C que os concretos de f_{ck} 20 MPa e 30 MPa não seguem este padrão.

Pode ser explicado as diferenças de índices esclerométricos através do fato em que estruturas de concretos mais porosas, tendem a diminuir os índices esclerométricos, fato esse

que ocorre não somente pelo aumento de temperatura, mas pelo fator da relação a/c, que apesar de não ser esse o fator considerado, e sim a resistência característica inicial, acaba sendo determinante para a obtenção de tais resistências. Sendo assim, quanto maior a relação a/c, menor será o índice esclerométrico.

4.2.3 Efeito da idade do concreto

Foi realizado leituras dos índices esclerométricos para diferentes idades do concreto, com o intuito de analisar a eficiência do equipamento em concretos com pouca idade, para caso ocorra incêncio em uma construção.

Nas Figuras 4.17 a 4.19 apresenta os valores como vem sendo apresentado anteriormente, com índices esclerométricos normalmente de valores menores com o aumentar da temperatura, bem como quanto maior a idade do concreto, maior os índices esclerométricos, assim como ocorreu com a resistência à compressão e a velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Figura 4.17 – Índice esclerométrico do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

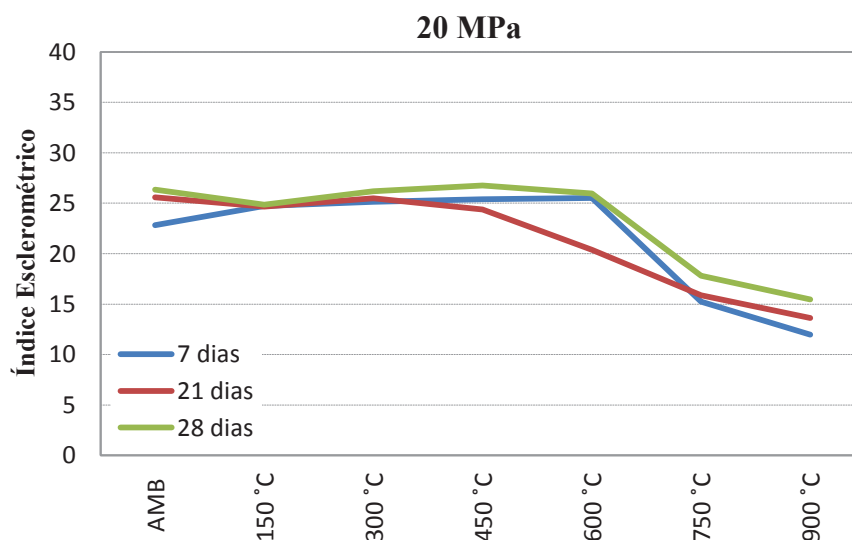


Figura 4.18 – Índice esclerométrico do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura

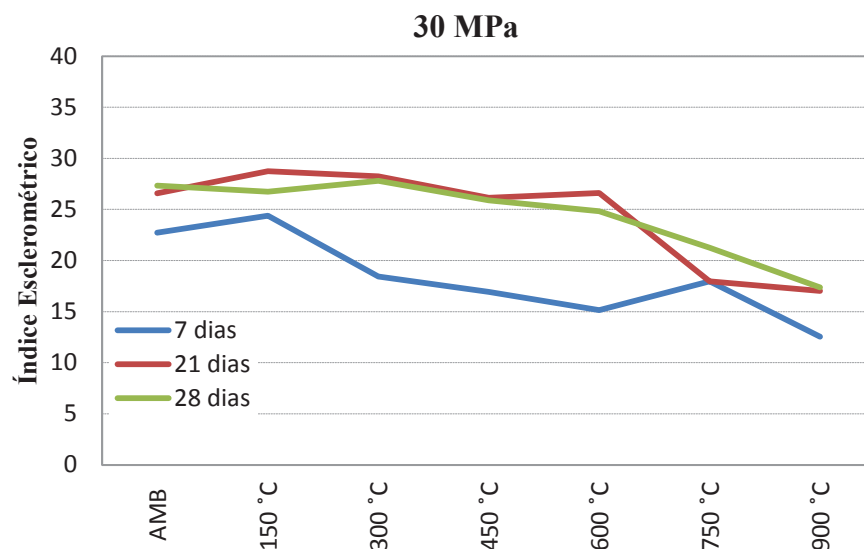
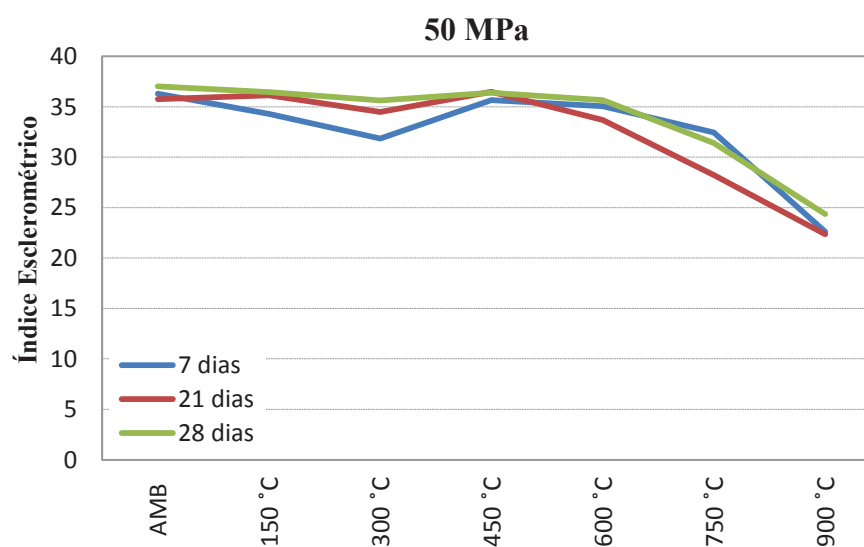


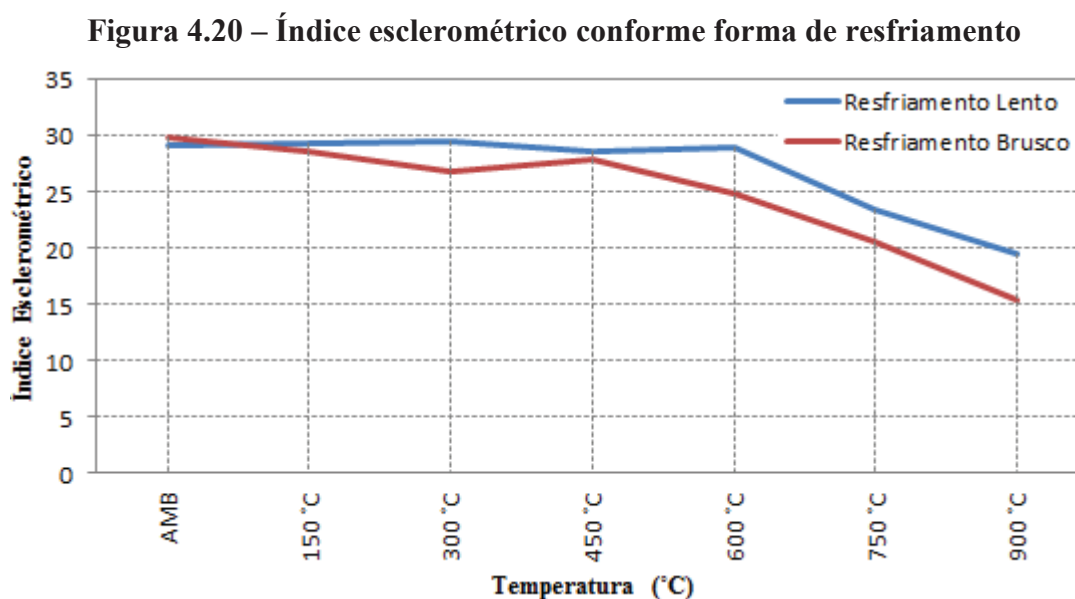
Figura 4.19 – Índice esclerométrico do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura



Nas Figuras 4.17 a 4.19 a única informação que ocorre para todas as classes e idades do concreto é o decréscimo íngreme do índice esclerométrico a partir dos 600°C. Para cada concreto, tanto o de fck 20 MPa, quanto o de 50 MPa observa-se valores bem próximos em todas as idades até os 600°C, não possuindo diferença significativa nos resultados. Já para o concreto de fck 30 MPa não foi possível observar uma regra para os índices resultantes.

4.3.4 Efeito da forma de resfriamento

Neste item são analisados os índices esclerométricos apenas na forma como os corpos de prova foram resfriados após expostos a altas temperaturas, sem levar em consideração a classe ou idade do concreto, conforme Figura 4.20.



Na Figura 4.20 nota-se que houve pouca influência na leitura dos índices esclerométricos a forma de resfriamento até o patamar de 600°C, se lenta ou brusca, onde em 600°C os concretos que tiveram o resfriamento brusco já sofrem um grande declínio, o que com o resfriamento lento só acontece a partir dos 750°C.

Resultados semelhantes foram obtidos por Ercolani, Ortega e Señas (2007), chegando à conclusão que o declínio do índice esclerométrico é mais acentuado para concretos resfriados bruscamente, em contato direto com a água.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Levando-se em consideração todas as vantagens do ensaio de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas já comentadas anteriormente e comparando-se ao ensaio de resistência à compressão, que exige extrações de corpos de prova para a avaliação do material, em casos onde os concretos são expostos a altas temperaturas, comprometeriam ainda mais a estrutura avaliada. Fazendo-se necessário a obtenção de curvas de correlação,

com o intuito de prever a resistência à compressão. Para isto estudou-se a possibilidade da correlação da resistência à compressão com as velocidades de ondas de ultrassom para os concretos analisados neste trabalho.

Foi utilizado modelos de ajuste para os dados obtidos, sendo testadas a regressão exponencial, linear, logarítmica, polinomial de 2º grau e potência.

A Tabela 4.1 mostra o ajuste realizado pelos cinco modelos, sendo que o valor do coeficiente de correlação (R) que mede o grau de ajuste dos dados em relação ao tipo de equação admitida para o ajuste apresentou melhor resultado para a curva de ajuste do tipo exponencial ($R = 0,859$), por ser este coeficiente, entre todos, o mais próximo de 1. O coeficiente de determinação (R^2) para este modelo indica que cerca de 74% da variação dos dados podem ser explicados pelo modelo.

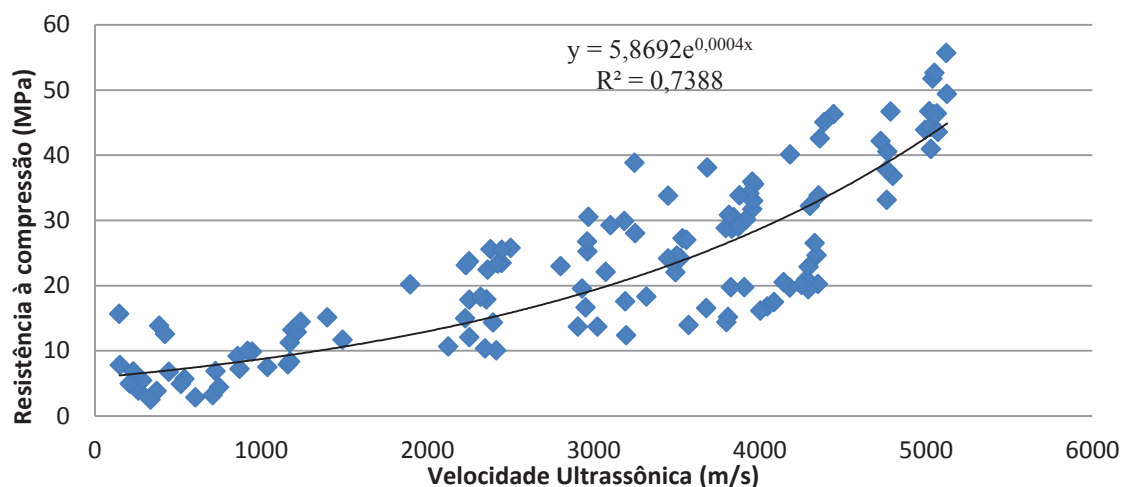
Tabela 4.1 – Curvas para correlação da resistência à compressão e a velocidade de ondas ultrassônicas

Método de ajuste	Equação	R^2	R
Exponencial	$y = 5,8692e^{0,0004x}$	0,7388	0,859
Linear	$y = 0,0072x + 1,7898$	0,6945	0,833
Logarítmica	$y = 10,952\ln(x) - 61,582$	0,5245	0,724
Polinomial	$y = 1E-06x^2 + 0,0007x + 7,5533$	0,7313	0,855
Potência	$y = 0,1135x^{0,6614}$	0,6753	0,822

O valor do coeficiente de correlação obtido para a curva de ajuste do tipo exponencial indica que o modelo de previsão da resistência à compressão a partir dos dados ensaiados de velocidade ultrassônica apresenta boa correlação, conduzindo a boas estimativas da resistência à compressão, portanto, tornando-se viável a utilização do modelo para previsão aproximada do comportamento da resistência à compressão dos concretos utilizados neste trabalho.

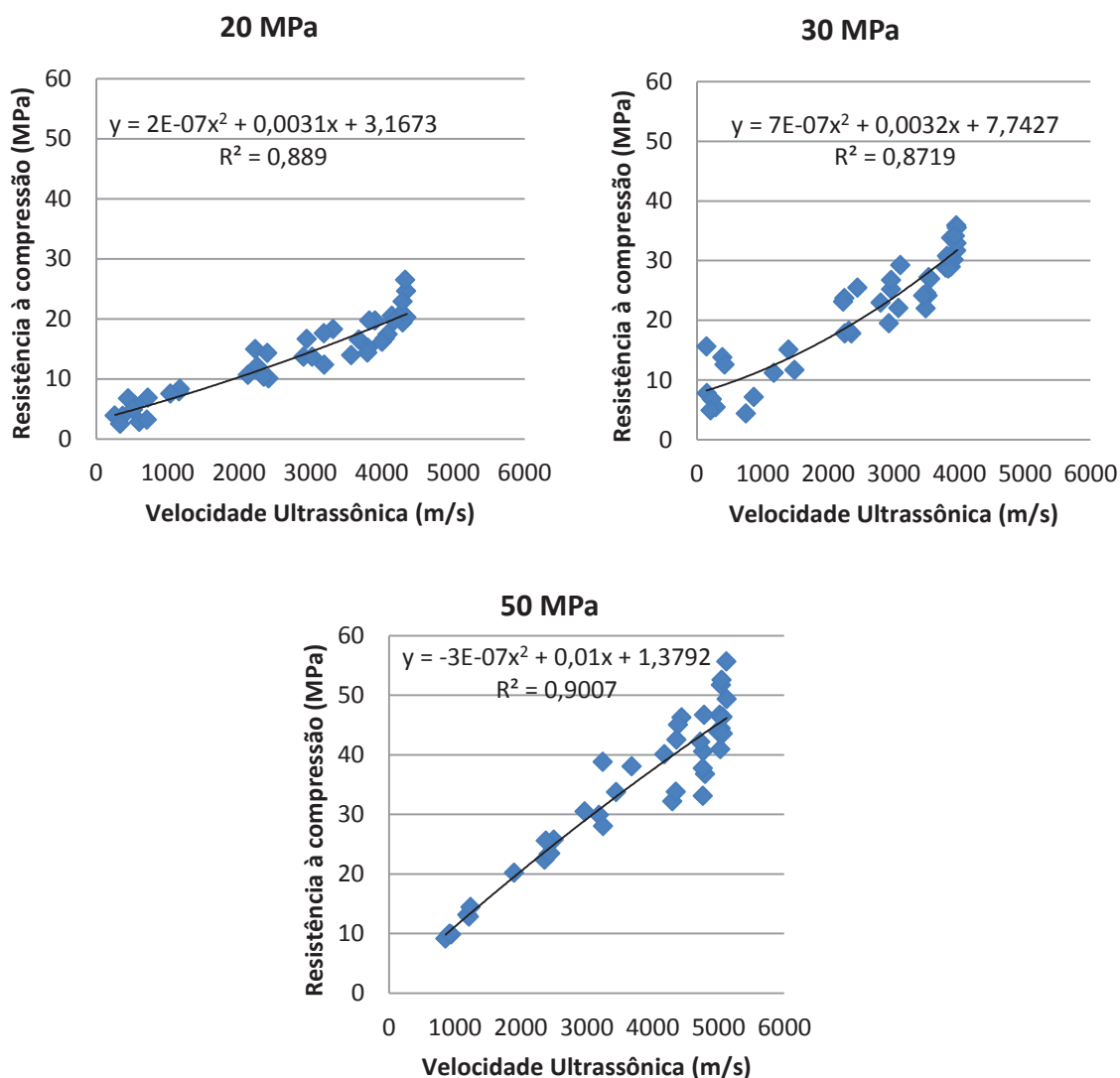
A Figura 4.21 apresenta graficamente os dados das velocidades ultrassônicas em relação a resistência à compressão e curva de ajuste do tipo exponencial.

Figura 4.21 – Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão



Mesmo havendo uma boa correlação entre as variáveis, ainda assim existe uma dispersão de dados no gráfico, podendo se dar pela forma como as variáveis independentes deste estudo interferem na resistência à compressão e na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Na tentativa de melhorar o coeficiente de correlação foi verificado a curva de ajuste para cada classe de concreto separadamente, obtendo-se para 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa a curva do tipo polinomial ($R = 0,943$), polinomial ($R = 0,934$) e potência ($R = 0,978$), respectivamente, como visualizado na Figura 4.22.

Figura 4.22 – Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto



E ainda, no intuito de melhorar ainda mais a correlação, levou-se em consideração a classe do concreto com a forma de resfriamento adotada, conforme as Figuras 4.23 e 4.24. Onde obteve-se para o concreto de classe 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa que passou pelo resfriamento lento a curva de ajuste do tipo potência ($R = 0,979$), polinomial ($R = 0,934$) e potência ($R = 0,982$), respectivamente. E para os concretos de 20, 30 e 50 MPa que teve o resfriamento do tipo brusco a curva de ajuste do tipo potência ($R = 0,967$), polinomial ($R = 0,937$) e potência ($R = 0,981$).

Figura 4.23 - Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento lento

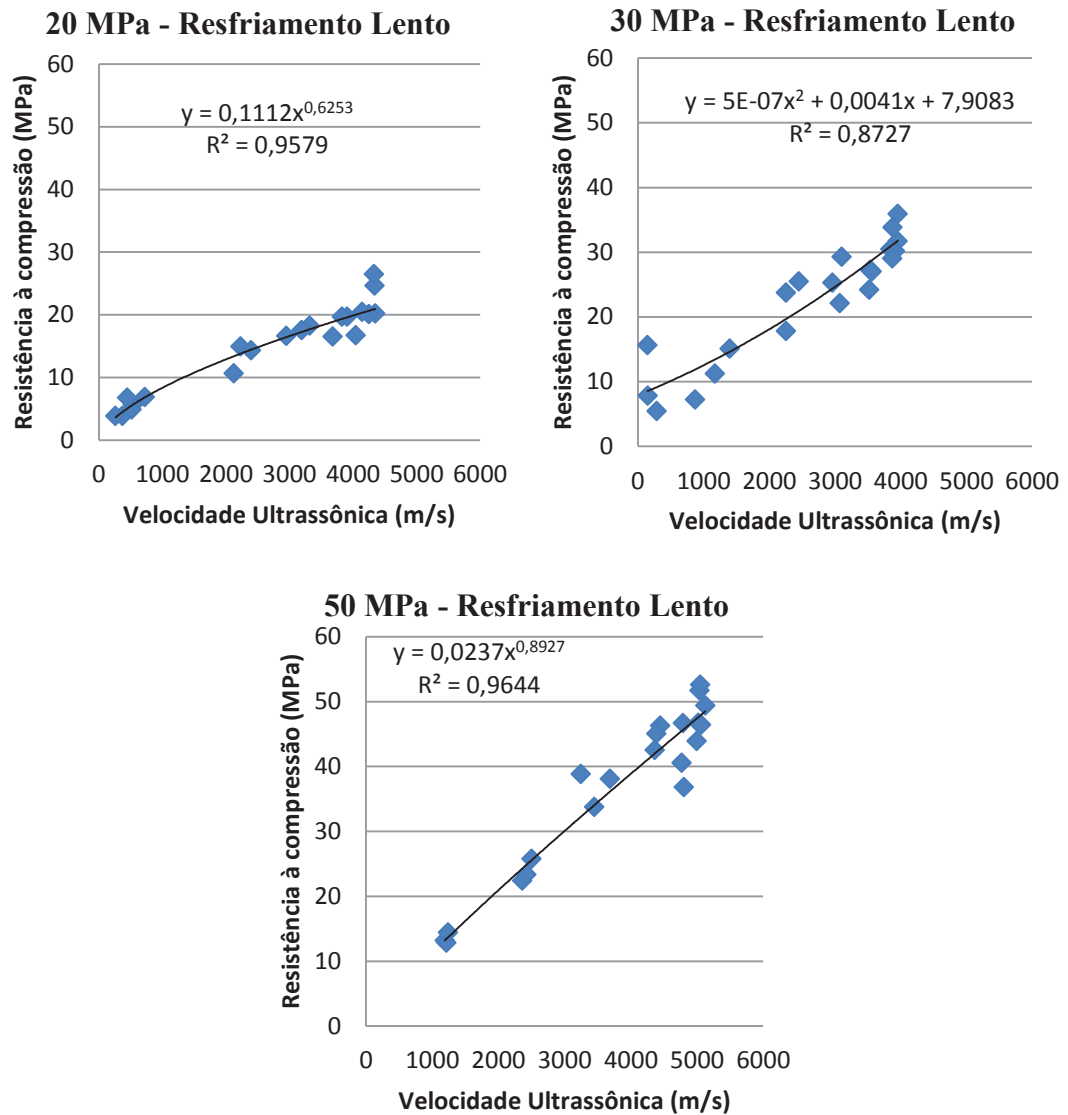
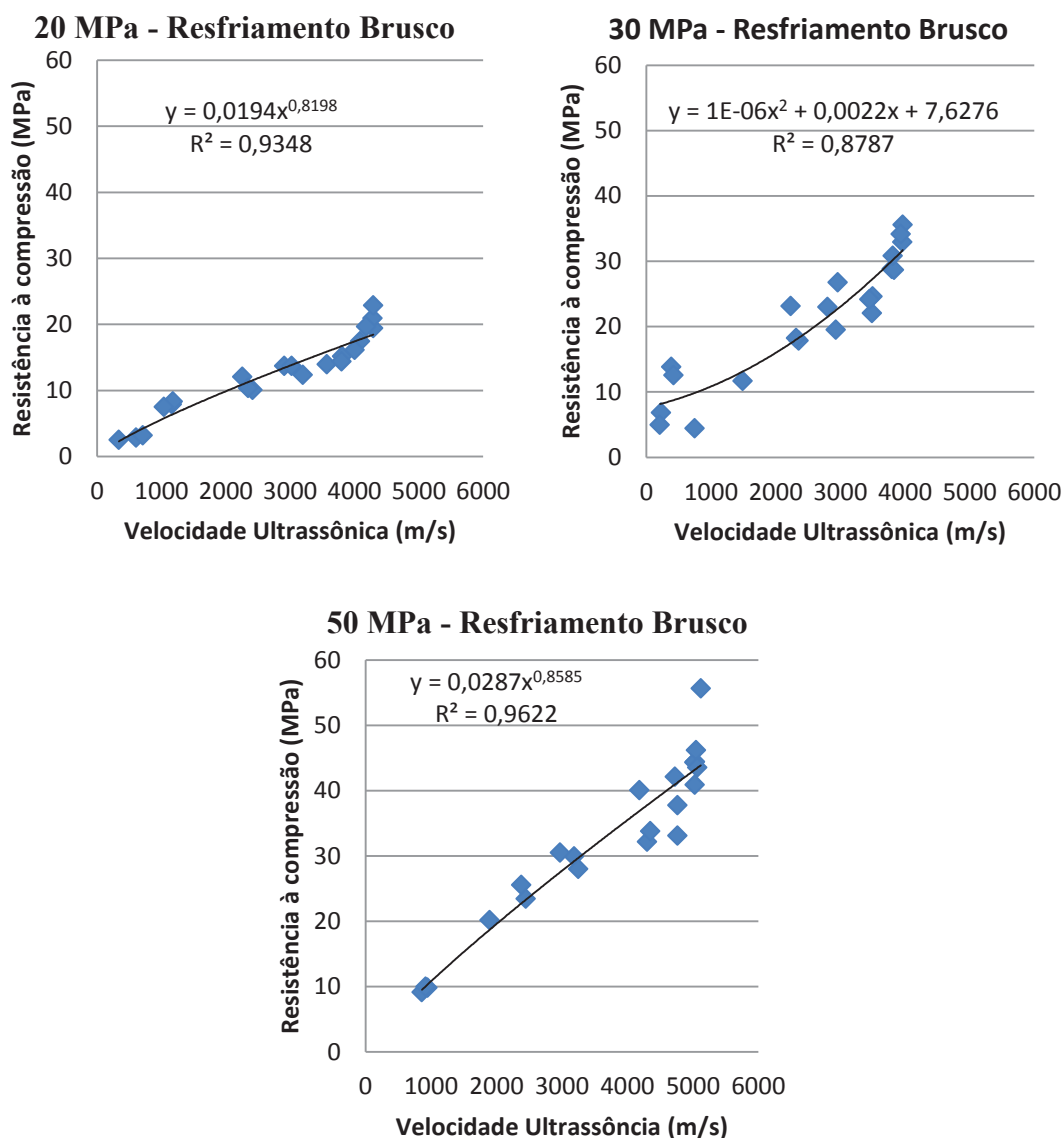


Figura 4.24 - Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento brusco



4.5 CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como já comentado anteriormente o ensaio de esclerômetro possui várias vantagens, como a fácil execução, baixo custo, que comparado ao ensaio de resistência à compressão traria maior benefícios.

Contanto, faz se necessário a obtenção de curvas de correlação, com o intuito de prever a resistência à compressão, com isso estudou-se a possibilidade da correlação da resistência à compressão com os índices esclerométricos analisados nos corpos de prova deste

trabalho. Foi utilizado modelos de ajuste para os dados obtidos, sendo testadas a regressão exponencial, linear, logarítmica, polinomial de 2º grau e potência.

A Tabela 4.2 mostra o ajuste realizado pelos cinco modelos, sendo que o valor do coeficiente de correlação (R), que mede o grau de ajuste dos dados em relação ao tipo de equação admitida para o ajuste, quanto mais próximo de 1 melhor é. Apresentou melhor resultado para a curva de ajuste do tipo polinomial ($R = 0,638$). O coeficiente de determinação (R^2) para este modelo indica que cerca de 41% da variação dos dados podem ser explicados pelo modelo.

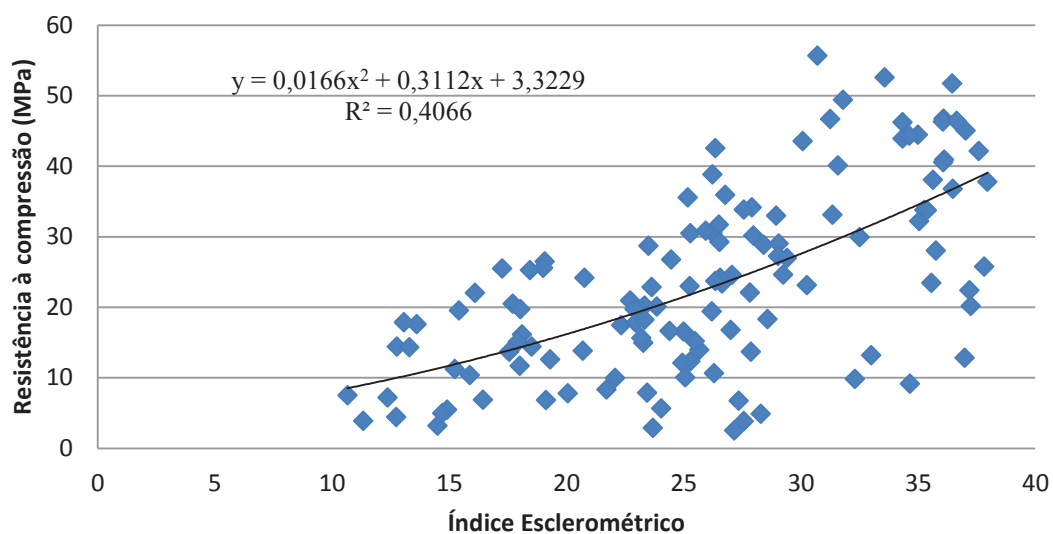
Tabela 4.2 – Curvas para correlação da resistência à compressão e o índice esclerométrico

Método de ajuste	Equação	R^2	R
Exponencial	$y = 4,5782e^{0,0553x}$	0,3253	0,570
Linear	$y = 1,1545x - 6,5484$	0,4016	0,634
Logarítmica	$y = 26,155\ln(x) - 60,64$	0,3746	0,612
Polinomial	$y = 0,0166x^2 + 0,3112x + 3,3229$	0,4066	0,638
Potência	$y = 0,3042x^{1,2902}$	0,3218	0,567

O valor do coeficiente de correlação obtido para a curva de ajuste do tipo polinomial indica que o modelo de previsão da resistência à compressão a partir dos índices esclerométricos apresenta razoável correlação, tratando-se de um trabalho experimental. No estudo de Fursa, Surzhikov e Osipov (2009) obtiveram coeficiente de correlação igual a 0,34, que então alegaram ser muito alta a chance de erro ao determinar a resistência por este método.

A Figura 4.25 apresenta graficamente os índices esclerométricos em relação a resistência à compressão e curva de ajuste dos dados do tipo polinomial.

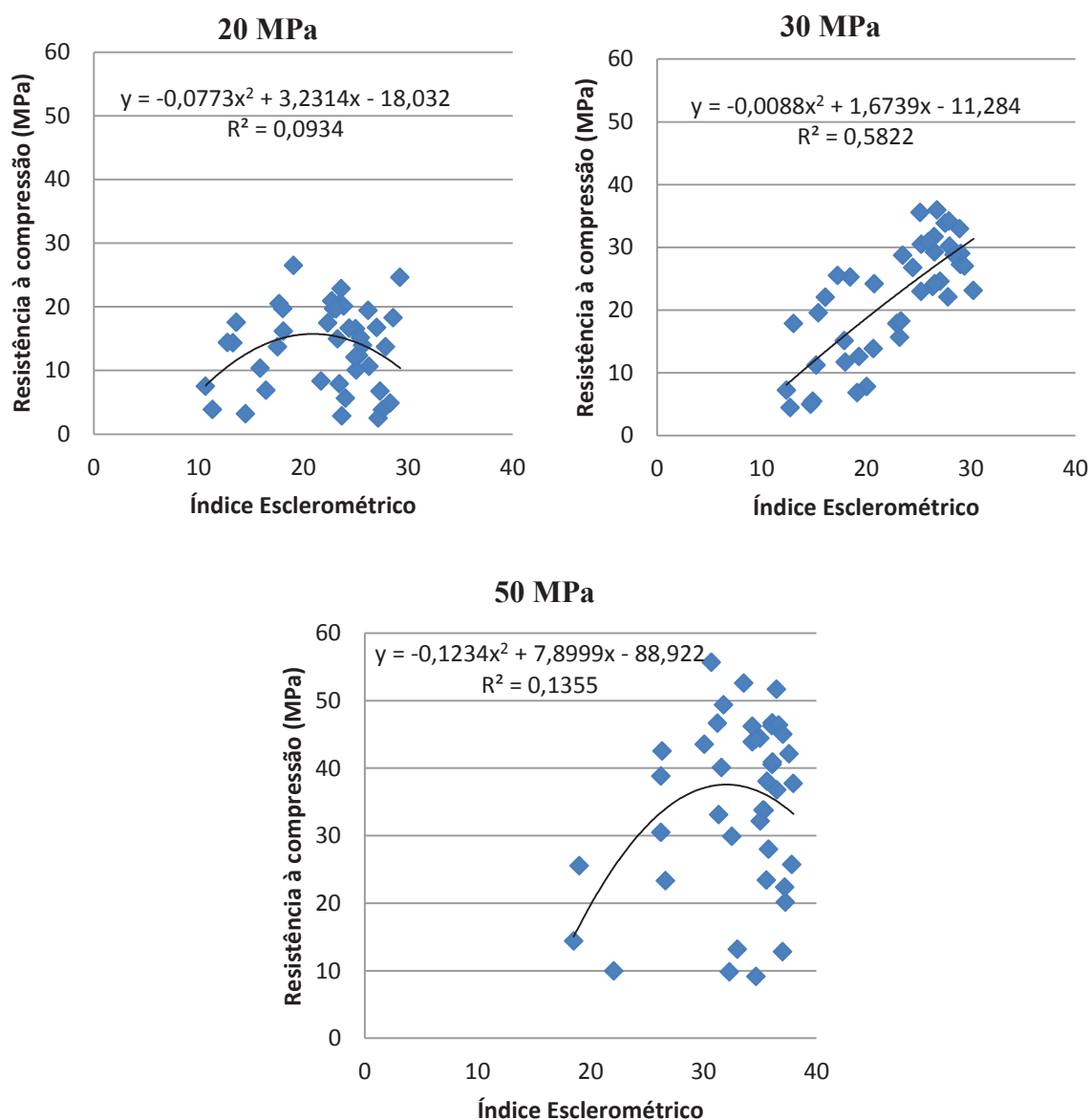
Figura 4.25 – Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão



É possível perceber que há grande dispersão de dados no gráfico, podendo se dar pela forma como as variáveis independentes deste estudo interferem na resistência à compressão e no índice esclerométrico. Sendo melhor representado se separado pelas classes do concreto, como visualizado na Figura 4.25.

Na tentativa de melhorar o coeficiente de correlação foi verificado a curva de ajuste para cada classe de concreto separadamente, obtendo-se para 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa a curva do tipo polinomial que melhor se ajustou a todas as classes, sendo o $R = 0,306$, $R = 0,763$ e $R = 0,368$, respectivamente, como visualizado na Figura 4.26. Observando-se que só houve melhora na correlação o concreto de fck 30MPa.

Figura 4.26 – Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto



Com a intenção de melhorar as correlações, foram separadas as classes de concreto com a forma de resfriamento estudado, conforme apresentado nas Figuras 4.27 e 4.28. Para os concretos resfriados lentamente de classe 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa foram obtidas as curvas do tipo polinomial ($R = 0,365$), potência ($R = 0,774$) e polinomial ($R = 0,459$), respectivamente. E concretos com fck de 20, 30 e 50 MPa resfriados bruscamente, as curvas que melhor se ajustaram foram do tipo polinomial, com $R = 0,305$, $R = 0,754$ e $R = 0,308$, respectivamente.

Figura 4.27 - Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento lento

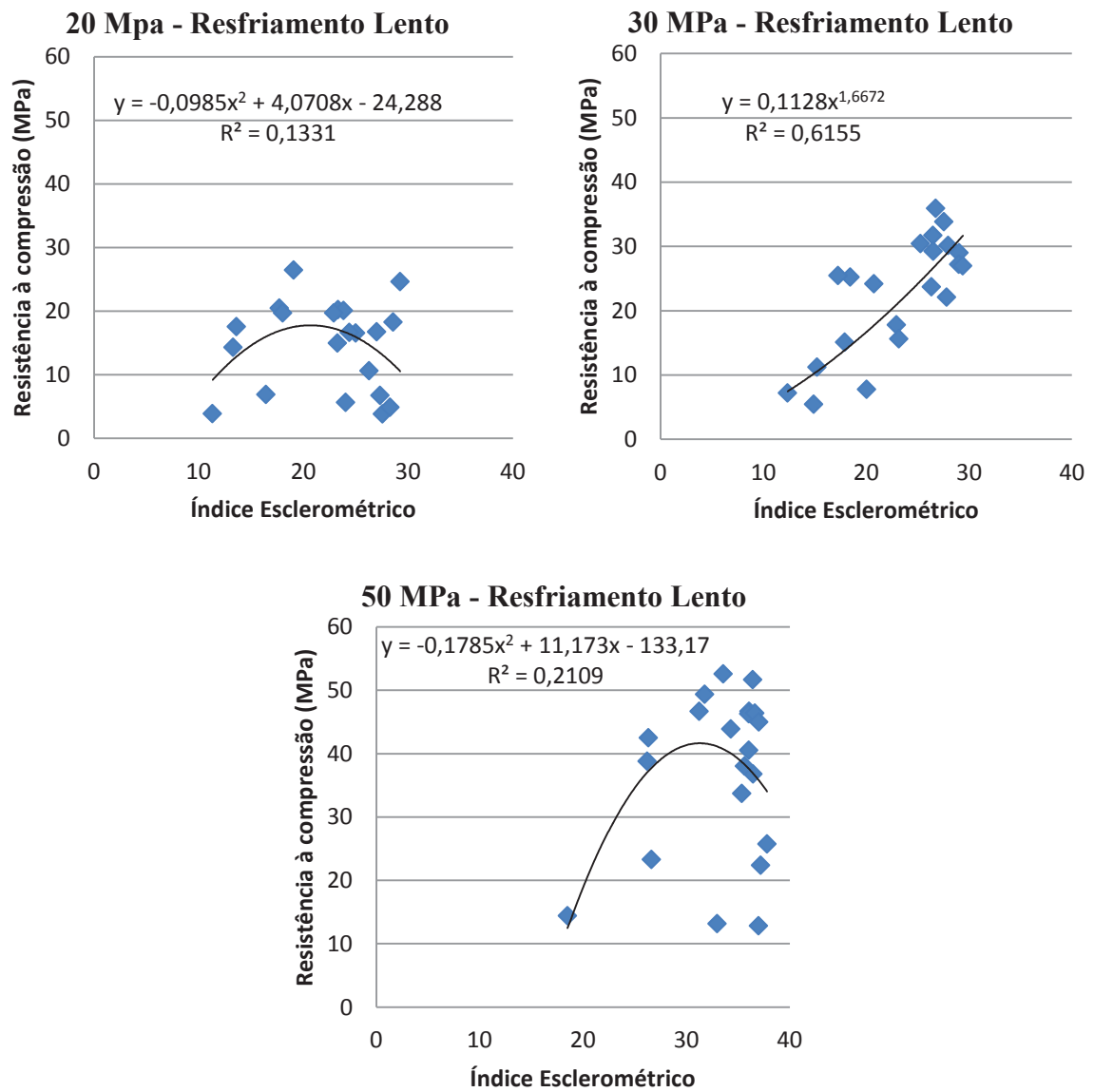
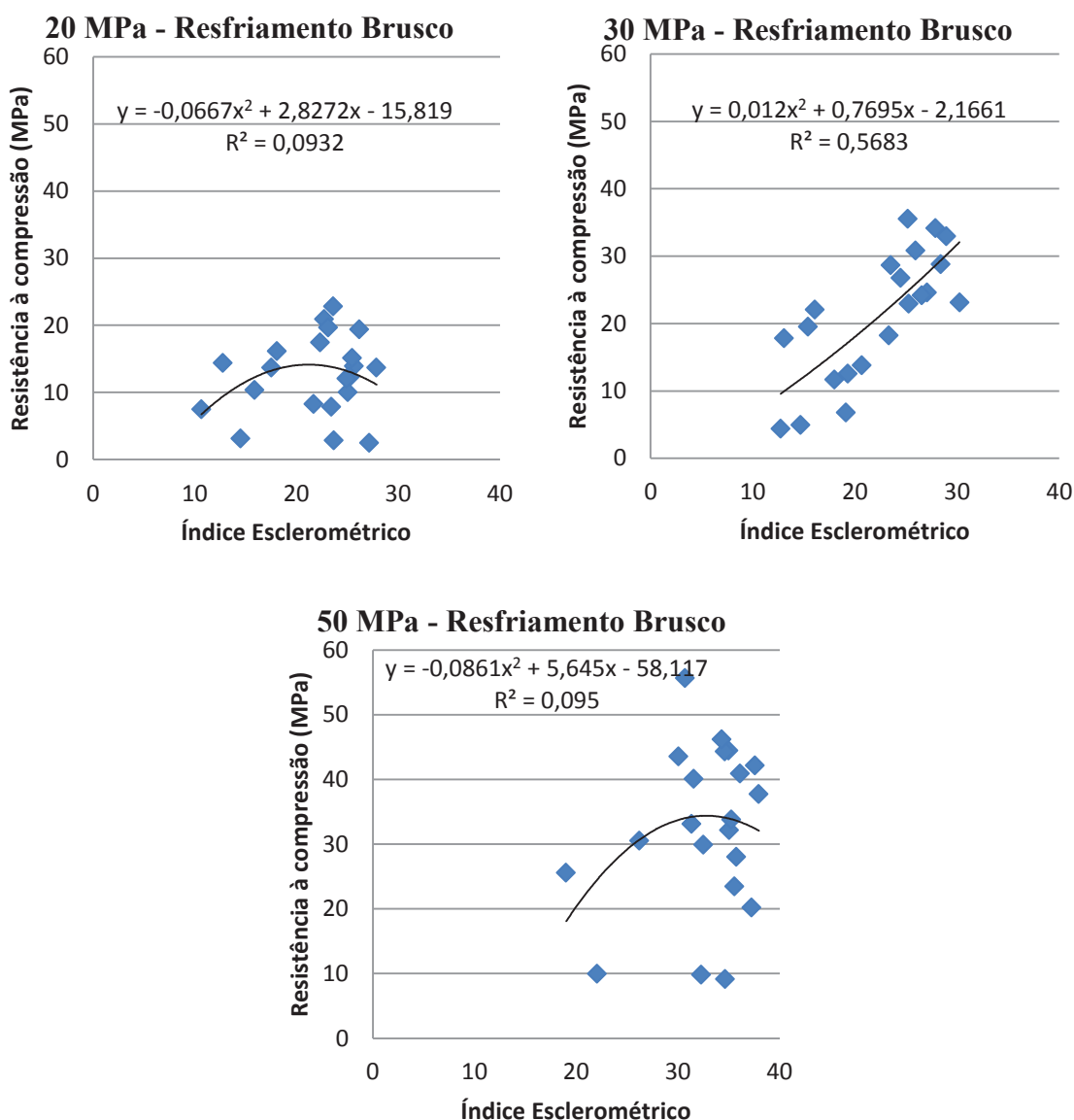
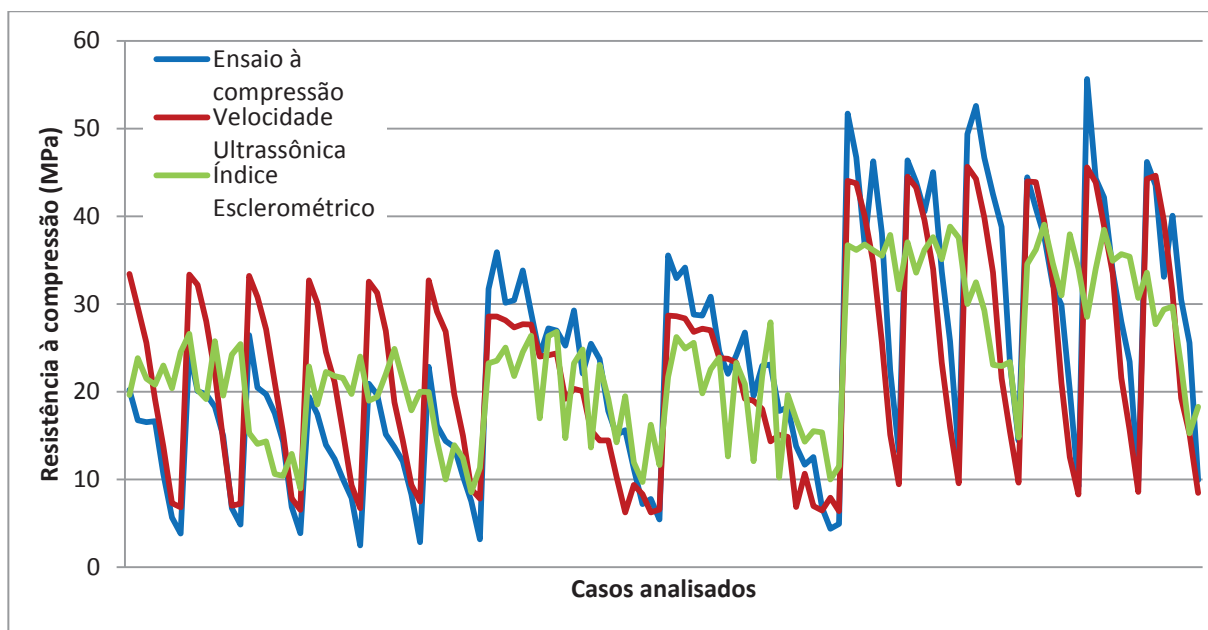


Figura 4.28 - Curva de correlação entre índices esclerométricos e resistências à compressão segundo classe do concreto com resfriamento brusco



4.6 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO OBTIDAS PELOS DIFERENTES MÉTODOS ESTUDADOS NESTE TRABALHO

Conforme os modelos de ajuste para os métodos de ultrassom e esclerometria encontrados nos itens anteriores, foi elaborado um gráfico (Figura 4.29) apresentando os valores de resistências à compressão resultantes dos ensaios à compressão e as estimadas pela regressão exponencial das médias das velocidades ultrassônicas e polinomial das médias dos índices esclerométricos obtidos para cada caso analisado (conforme a classe do concreto, patamar de temperatura exposto, idade do concreto e forma de resfriamento).

Figura 4.29 – Resistências obtidas pelos métodos estudados

É possível verificar que a técnica que mede a velocidade da propagação da onda ultrassônica resulta na maioria das vezes em resultados mais próximos aos obtidos pelo ensaio à compressão, do que o método da esclerometria, seguindo a mesma tendência de aumento ou diminuição.

Com a intenção de correlacionar melhor os resultados, utilizou-se as curvas de ajustes que obteve o melhor coeficiente de correlação para cada classe, citadas anteriormente, sendo apresentado na Figura 4.30 a 4.32.

Sendo possível perceber que mesmo refinando as variáveis, a técnica da esclerometria não obtém resultados próximos aos obtidos no ensaio à compressão, diferentemente do que acontece por meio da técnica da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Mesmo para o caso do concreto de classe 30 MPa onde o coeficiente de correlação é de 0,763, considerado bom valor, há muitas variações, apenas seguindo a tendência de diminuir ou aumentar a resistências à compressão, porém com muitas oscilações no trajeto, o que não ocorre em nenhum dos outros dois métodos analisados.

Figura 4.30 – Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 20 MPa

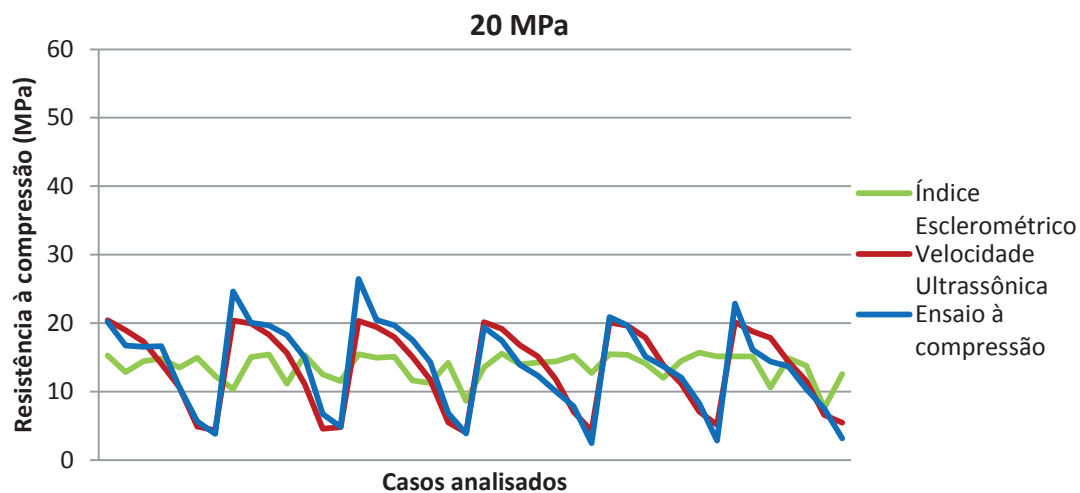


Figura 4.31 – Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 30 MPa

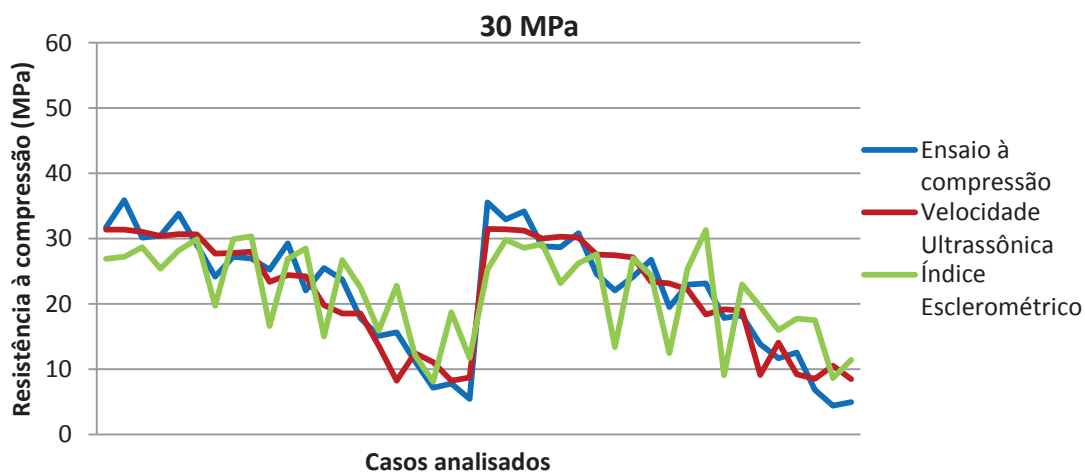
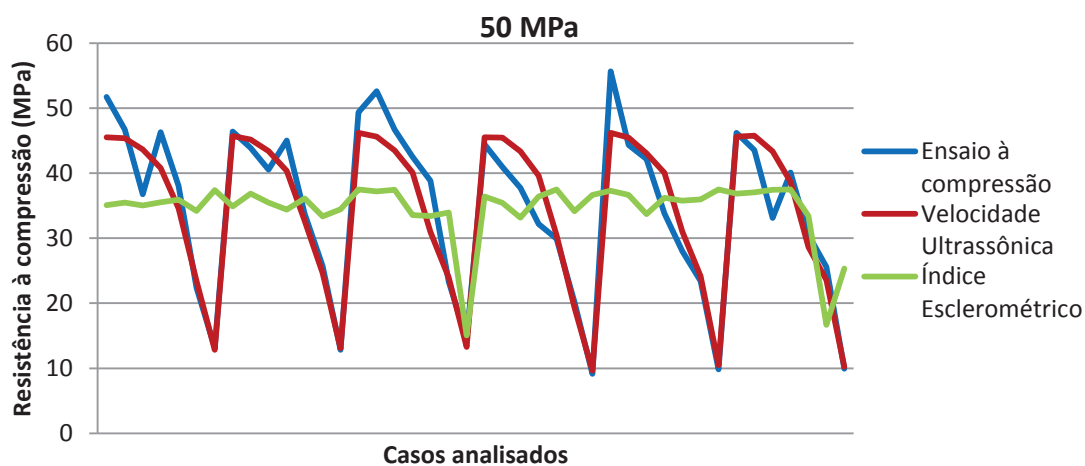


Figura 4.32 – Resistências obtidas pela curva de ajuste do concreto de classe 50 MPa



5 CONCLUSÃO

Analisando-se o efeito da temperatura sobre as amostras de concreto foi possível observar que ela influenciou significativamente, conforme aumentava a temperatura de exposição, maior era a redução das resistências à compressão, tanto utilizando a técnica de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, como a técnica da esclerometria.

Os métodos de avaliação dos corpos de prova não tiveram acentuada redução no mesmo patamar de temperatura, variando entre 300°C e 600°C. A partir da temperatura de 300°C, 450°C e 600°C é possível perceber uma acentuada redução na velocidade da propagação da onda ultrassônica, na resistência à compressão e no índice esclerométrico respectivamente, sendo estes patamares considerados de temperatura crítica para cada ensaio.

É possível perceber maiores efeitos da temperatura pelo ensaio destrutivo e através da técnica da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, do que pela técnica da esclerometria.

A classe do concreto é uma variável que afeta diretamente a resistência à compressão, pelo fato de ser classificada justamente conforme a resistência à compressão característica (f_{ck}). Sendo que conforme expostos a maiores patamares de temperatura, os concretos de maior f_{ck} tiveram maiores resistências à compressão residual, indicando que concretos de maiores resistências iniciais, tendem a suportar melhor a altas temperaturas. O mesmo foi analisado para o índice esclerométrico, fato este por ser um método de análise de dureza superficial, o que acaba relacionando, concreto de maior f_{ck} , menos poros, maior a dureza superficial, resultando em maiores índices esclerométricos. O que não foi tão evidente na análise da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, para o concreto de f_{ck} 50 MPa seguiu-se a regra observada no ensaio à compressão e na esclerometria, em que em todos os patamares de temperatura este concreto de maior f_{ck} esteve com velocidade maior que os concretos de f_{ck} inferior, porém o concreto de f_{ck} 30 MPa esteve sempre com velocidade inferior ou muito próxima do concreto de f_{ck} 20 MPa.

Analisando-se a idade do concreto com o aumento de temperatura, não foi uma variável significativa, esperava-se aumento de resistência à compressão utilizando-se as técnicas da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e de esclerometria conforme maior idade do concreto, porém não foi o obtido, em alguns casos houve até redução. Com os gráficos separados por classe do concreto não é possível distinguir a idade por nenhum dos métodos analisados.

Foi observado que quando o corpo de prova passou pelo resfriamento lento, os valores obtidos no ensaio à compressão e pela esclerometria foram relativamente maiores que os obtidos no resfriamento brusco, isso se deve ao fato da maior degradação que ocorre no interior do concreto quando este é exposto ao resfriamento brusco. O que não ocorreu na análise das velocidades ultrassônicas, devido a maior presença de umidade nesta forma de resfriamento, resultando em maiores velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos corpos de prova, sendo este um fator de grande influência para o método em questão.

E em todos os casos quando analisado aos 750°C e 900°C as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas já não podem ser consideradas confiáveis, pois deixou o padrão que vinha seguindo desde as temperaturas inferiores, passando a ter resultados obtidos no equipamento de ultrassom de forma muito variável e abaixo de 70% de confiança.

O modelo de curva ajustada para a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com a resistência à compressão mostrou bom nível de correlação, sendo esta do tipo exponencial ($R = 0,859$). É observando que quando correlacionado conforme o f_{ck} do concreto há ajuste da curva ainda melhor, e esta melhora também ocorre quando separado pela forma de resfriamento. Levando-se a concluir que esta é uma boa técnica a ser empregada na construção civil, no intuito de avaliar a estrutura sem danificá-la mais e obtendo-se boas estimativas de resistência à compressão.

O modelo de curva ajustada para a relação entre o índice esclerométrico com a resistência à compressão mostrou razoável nível de correlação, sendo esta do tipo polinomial ($R = 0,638$). Na tentativa de melhorar o ajuste obtido e ocorrer menos dispersão na correlação, foi separado conforme o f_{ck} do concreto, havendo melhora apenas para o concreto de f_{ck} 30 MPa. E igualmente foi realizado na correlação das velocidades ultrassônica aos resultados obtidos nos ensaios à compressão, separou-se conforme a forma de resfriamento, obtendo-se correlações melhores para concretos resfriados lentamente e pior para os resfriados bruscamente.

Contudo podem-se confirmar a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa que as metodologias aqui empregadas se mostram potenciais para o emprego na construção civil, principalmente na área de detecção de patologias, mas ainda passíveis de mais estudos, sobretudo buscando uma maior quantidade de amostras, para então avançar para estruturas que estiveram sujeitas ao incêndio. Cabe salientar que os resultados obtidos com a metodologia das velocidades de ondas de ultrassom se mostraram melhores do que os obtidos com a utilização do esclerômetro.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa e em análise de referências estudadas, verificou-se que alguns estudos poderiam contribuir para o aperfeiçoamento e melhor compreensão do comportamento do concreto, principalmente tratando-se dos dados obtidos pelos ensaios não destrutivos. Desta forma, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar qualitativamente e quantitativamente a composição química da matriz cimentícia do concreto a cada patamar de temperatura analisado, com o intuito de correlacionar a microestrutura com a macroestrutura;
- Expandir a pesquisa para mais classes de concreto, bem como reduzir os intervalos de temperatura, considerando mais patamares para assim obter maior confiabilidade nas curvas de correlação;
- Considerando que nesta pesquisa o concreto foi o mesmo utilizado em construções, em uma futura pesquisa é possível verificar as leituras das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas e índices esclerométricos nestas obras, para assim correlacionar com os dados obtidos pelos corpos de prova moldados em laboratório;
- Confeccionar corpos de prova de variadas geometrias e analisar a variação dos índices esclerométricos.

REFERÊNCIAS

ABBADI, A. F.; AL-TAYYIB, A.J. Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticity of concrete. **Material and Structures**, v.23, n. 5, p. 334-340, set. 1990.

ALVA, G. M. S. **Sobre o Projeto de Edifícios em Estrutura Mista Aço-Concreto**. 2000. 296f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R-03**: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Detroit, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C805 / C805M**: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. West Conshohocken, 2013.

_____. **ASTM C597**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, 2009.

_____. **ASTM E119**: Standard test methods for fire test of building construction and materials. USA, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **ABNT NBR 5739**: Ensaio de Compressão de corpos de Prova Cilíndricos de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 7212**: Execução de Concreto Dosado em Central. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5 ed. São Paulo: LTC, 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: Part 201**: Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete. London, 1986.

_____. **BS 1881: Part 202**: Recommendations for Surface Hardness Tests by the Rebound Hammer. London, 1986.

_____. **BS 1881: Part 203**: Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.

BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety**. 1 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

BUNGEY, J. H. **The Testing of Concrete in Structures**. 2 ed. London: Surrey University Press, 1989.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2006.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CASTRO, E. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CHIES, J. A. **Ensaaios não destrutivos em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CHUNG, H. W.; LAW, K.S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, v. 5, n. 10, p.42-49, out. 1983.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 58**: Hormigón endurecido – Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos. São Paulo: 1996.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 2002, Brasília. **Anais...**Brasília, 2002.

COSTA, R. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 246f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CUOGHI, R. S. **Aspectos de Análise de Risco das Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**. 2006. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. **Magazine of Concrete Research**, v. 28, n. 97, p.181-190, dez. 1976.

ERCOLANI, G. D.; ORTEGA N. F.; SEÑAS L. Ejemplos de ultrasonidos y esclerometria en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. IV Conferencia Panamericana de END, 2007, Buenos Aires. **Anales...** Buenos Aires: AAENDE, 2007.

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

FURSA, T. V.; SURZHIKOV A. P.; OSIPOV K. YU. A nondestructive mechanoelectrical method for determining the strenght of concrete under variable temperature and humidity conditions. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, Defektoskopiya, 2009, v. 45, n. 9, p. 88-96, 2009.

HAGER. I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Technical Sciences**, v. 61, n. 1, 2013.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO-834**: Fire-resistance tests – elements of building construction. Suíça, 1999.

IRRIGARAY, M. A. P. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio davelocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. 2012. 235f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

LANDI, F. R. **Ação do Incêndio Sobre as Estruturas de Concreto Armado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico 01/86. São Paulo. SP. Brasil, 1986.

LIMA, R. C. A. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIMA, R. C. A; CAETANO, L. F; SILVA FILHO, L. C. P. Mapeamento de concretos aquecidos por meio de ondas ultrassônicas. In: XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural, 2004, Mendoza. **Anais...** Mendonza, 2004.

LOPES, Y.D. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio de ensaios não destrutivos**: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico**. 2009. 215f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MACHADO, M. D. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA V. M.; CARINO N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. London: American Society for Testing and Materials, 2004.

MAZZONI, F. **Simulação computacional de incêndio: aplicação no caso do condomínio edifício Cacique em Porto Alegre - RS**. 2010. 68f. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MEDEIROS, A. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

METHA, P. K.; MOTEIRO, P. J. M., **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

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

MENEGHETTI, L. C. **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. 1999. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

MOHAMEDBHAI, G. T. G. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 38, n. 136, p. 151 – 158, September, 1986.

MOREIRA, A. M. M. **Verificação de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em situação de incêndio**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NINCE, A. Z. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. 2006. 336f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE, **Ultrasonics**, v. 38. N. 1-8, p. 546-552, mar. 2000.

OLIVEIRA, T. A. C. P. **Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. 2006. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2006.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

PHAN, L. T. Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art. **National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg, 1996.

PHOON, K. K.; WEE, T. H.; LOI, C. S. Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method, **ACI Materials Journal**, p.568–574, set./out. 1999.

RILEM. **NDT 1**: Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. 1972.

_____. **NDT 3**: Recommendations for testing concrete by hardness methods. 1984.

RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E. I. P. Módulo de deformação do concreto pelo método ultrassônico; Estudo da Correlação. In: 46° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Florianópolis, 2004. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. p. 1309-1324.

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

SILVA, A. C. P. **Gerenciamento de riscos de incêndio em espaços urbanos históricos: uma avaliação com enfoque na percepção do usuário**. 2003. 203f. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR. A. L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 432-448, dez. 2010.

SOUZA, U. E. L. Incêndio em edifícios: Conceitos básicos. **Revista CIPA**, São Paulo, v.17, n.203, p.99-105, 1996.

SOUZA, L. A. F.; MACHADO, R. D. Análise numérico-computacional de estruturas de concreto armado considerando o dano, a fratura e critério de falha. **Revista IBRACON de Estrutura e Materiais**, São Paulo, v.6, n.1, p. 101-120, 2013.

STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., CARATIN, H. Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. **Special Publication**, Detroit, v. 82, pp.201-228, 1984.

THOMAZ, E. C. S. 2013. Nota de aula da disciplina estruturas de concreto armado Esclerômetro. **Instituto Militar de Engenharia**. Rio de Janeiro-RJ. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/esclerometro_14jun2011.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2016.

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

XIAO, J. KONIG, G. Study on concrete at high temperature in China – an overview. **Fire Safety Journal**. v. 39, n. 1, p. 89-103, fev. 2004.

YUN, C. H.; CHOI, K. R.; KIM, S. Y.; SONG, Y. C. Comparative evaluation of nondestructive methods for in-place strength determination. **Special Publication**, Detroit, v. 112, p111-136. 1989.

APÊNDICE A - Média das resistências à compressão em corpos de prova

Tabela 1 – fck 20 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	1	21,47	23,45	26,20
	2	18,83	25,84	26,14
	3	20,32	24,53	27,06
Média		20,21	24,61	26,47
Resfriamento Brusco	4	19,12	20,13	24,64
	5	19,60	21,62	19,05
	6	19,47	20,98	24,84
Média		19,40	20,91	22,84

Tabela 2 – fck 20 MPa após exposto à 150°C

150°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	7	16,97	18,19	18,59
	8	16,48	23,01	21,90
	9	16,77	19,01	20,92
Média		16,74	20,07	20,47
Resfriamento Brusco	10	17,89	18,21	15,89
	11	16,87	20,58	16,21
	12	17,55	20,22	16,30
Média		17,44	19,67	16,13

Tabela 3 – fck 20 MPa após exposto à 300°C

300°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	13	16,38	19,99	19,84
	14	18,33	21,05	20,48
	15	14,87	18,05	18,78
Média		16,53	19,70	19,70
Resfriamento Brusco	16	14,21	12,06	14,25
	17	13,62	18,53	14,40
	18	13,93	14,87	14,46
Média		13,92	15,15	14,37

Tabela 4 – fck 20 MPa após exposto à 450°C

450°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	19	18,00	17,16	18,10
	20	15,52	19,48	17,93
	21	16,36	18,16	16,61
Média		16,63	18,27	17,55
Resfriamento Brusco	22	11,49	12,03	13,06
	23	12,30	15,44	13,99
	24	13,18	13,58	13,98
Média		12,32	13,68	13,68

Tabela 5 - fck 20 MPa após exposto à 600°C

600°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	25	10,00	15,16	15,06
	26	10,27	14,25	13,44
	27	11,63	15,45	14,43
Média		10,63	14,95	14,31
Resfriamento Brusco	28	9,87	10,92	10,44
	29	10,23	12,86	10,12
	30	-	12,41	10,48
Média		10,05	12,06	10,35

Tabela 6 - fck 20 MPa após exposto à 750°C

750°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	31	6,46	7,17	6,89
	32	4,82	6,29	7,40
	33	-	-	6,30
Média		5,64	6,73	6,86
Resfriamento Brusco	34	8,74	8,67	7,55
	35	8,79	8,10	8,41
	36	6,09	8,12	6,54
Média		7,87	8,30	7,50

Tabela 7 – fck 20 MPa após exposto à 900°C

	900°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	37	4,37	4,37	2,47
	38	3,97	4,66	4,88
	39	3,13	5,59	4,22
Média		3,82	4,87	3,86
Resfriamento Brusco	40	2,68	2,52	3,88
	41	2,42	2,85	2,80
	42	2,37	3,15	2,80
Média		2,49	2,84	3,16

Tabela 8 – fck 30 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	1	34,89	34,64	41,10
	2	34,78	34,77	33,58
	3	25,40	37,22	32,98
Média		31,69	35,54	35,89
Resfriamento Brusco	4	31,31	25,94	34,99
	5	33,89	30,52	31,09
	6	33,61	33,96	36,33
Média		32,94	30,14	34,14

Tabela 9 – fck 30 MPa após exposto à 150°C

150°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	7	29,71	-	33,56
	8	29,43	27,82	34,92
	9	32,19	29,78	32,97
Média		30,44	28,80	33,82
Resfriamento Brusco	10	28,11	29,89	30,51
	11	27,88	24,55	31,73
	12	30,03	32,55	30,22
Média		28,67	29,00	30,82

Tabela 10 - fck 30 MPa após exposto à 300°C

300°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	13	23,75	24,15	26,77
	14	24,83	23,91	26,91
	15	23,90	25,64	27,99
Média		24,16	24,57	27,22
Resfriamento Brusco	16	22,74	28,16	25,54
	17	21,46	26,79	23,07
	18	21,89	25,96	23,83
Média		22,03	26,97	24,15

Tabela 11 – fck 30 MPa) após expostos à 450°C

450°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	19	25,16	26,41	29,14
	20	25,92	26,95	29,83
	21	24,62	26,86	28,77
Média		25,23	26,74	29,25
Resfriamento Brusco	22	19,11	24,46	24,02
	23	18,92	22,66	22,90
	24	20,49	19,08	21,92
Média		19,51	22,07	22,95

Tabela 12 – fck 30 MPa após exposto à 600°C

600°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	25	25,10	21,95
	26	25,82	23,23
	27	-	24,14
Média	25,46	23,11	23,70
Resfriamento Brusco	28	17,13	16,98
	29	18,75	18,95
	30	17,57	17,48
Média	17,82	17,80	18,22

Tabela 13 – fck 30 MPa após exposto à 750°C

750°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	31	13,85	14,09
	32	15,27	13,26
	33	16,10	14,04
Média	15,07	13,80	15,62
Resfriamento Brusco	34	11,58	11,30
	35	11,25	11,86
	36	12,17	10,46
Média	11,67	11,21	12,56

Tabela 14 – fck 30 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	37	7,23	7,15
	38	7,06	6,62
	39	7,21	6,61
Média	7,17	6,79	7,78
Resfriamento Brusco	40	4,70	6,75
	41	4,53	5,38
	42	3,93	4,15
Média	4,39	5,43	4,94

Tabela 15 – fck 50 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	1	55,32	48,55
	2	53,55	41,83
	3	46,24	48,76
Média	51,70	46,38	49,36
Resfriamento Brusco	4	34,92	55,55
	5	54,64	56,72
	6	43,72	54,69
Média	44,43	55,65	46,20

Tabela 16 – fck 50 MPa após exposto à 150°C

150°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	7	43,23	46,49
	8	51,01	47,64
	9	45,82	37,50
Média	46,69	43,88	52,58
Resfriamento Brusco	10	45,97	37,09
	11	33,16	52,35
	12	43,61	43,48
Média	40,91	44,31	43,52

Tabela 17 – fck 50 MPa após exposto à 300°C

300°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	13	39,44	44,24
	14	38,59	34,57
	15	32,29	42,82
Média	36,77	40,54	46,67
Resfriamento Brusco	16	35,03	41,68
	17	37,01	38,05
	18	41,17	46,69
Média	37,74	42,14	33,09

Tabela 18 – fck 50 MPa após exposto à 450°C

450°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	19	48,54	50,44
	20	46,28	41,66
	21	44,02	42,96
Média	46,28	45,02	42,52
Resfriamento Brusco	22	35,14	29,46
	23	26,30	31,98
	24	35,03	39,92
Média	32,16	33,79	40,07

Tabela 19 – fck 50 MPa após exposto à 600°C

600°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	25	42,02	28,99
	26	37,12	36,08
	27	35,02	36,11
Média	38,05	33,73	38,80
Resfriamento Brusco	28	28,60	22,61
	29	28,68	28,55
	30	32,39	32,83
Média	29,89	28,00	30,50

Tabela 20 – fck 50 MPa após exposto à 750°C

750°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	31	24,15	25,26
	32	25,58	24,18
	33	17,44	27,75
Média	22,39	25,73	23,32
Resfriamento Brusco	34	20,43	24,35
	35	17,97	21,23
	36	22,12	24,72
Média	20,17	23,43	25,56

Tabela 21 – fck 50 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	fck (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
Resfriamento Lento	37	14,34	16,22
	38	13,33	12,53
	39	11,81	9,71
Média	13,16	12,82	14,40
Resfriamento Brusco	40	9,42	10,27
	41	8,99	10,27
	42	9,00	8,93
Média	9,14	9,82	9,94

APÊNDICE B - Média das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas em corpos de prova

Tabela 22 – fck 20 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	1	4314	4312	4293
	2	4321	4414	4345
	3	4416	4300	4354
Média		4350	4342	4331
Resfriamento Brusco	4	4243	4291	4297
	5	4380	4244	4200
	6	4255	4307	4384
Média		4293	4281	4294

Tabela 23 – fck 20 MPa após exposto à 150°C

150°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	7	4119	4159	4141
	8	4023	4351	4167
	9	3995	4249	4126
Média		4046	4253	4145
Resfriamento Brusco	10	4181	4206	4042
	11	4073	4196	3947
	12	4008	4140	4023
Média		4087	4181	4004

Tabela 24 – fck 20 MPa após exposto à 300°C

300°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	13	3678	3926	3826
	14	3762	3918	3802
	15	3596	3876	3854
Média		3679	3907	3827
Resfriamento Brusco	16	3600	3697	3724
	17	3544	3810	3901
	18	3574	3920	3774
Média		3573	3809	3800

Tabela 25 – fck 20 MPa após exposto à 450°C

450°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	19	2903	3364	3180
	20	2970	3328	3106
	21	2982	3262	3289
Média		2952	3318	3192
Resfriamento Brusco	22	3235	2850	3043
	23	3145	2986	3105
	24	3210	2885	2928
Média		3197	2907	3025

Tabela 26 – fck 20 MPa após exposto à 600°C

600°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	25	2104	2230	2476
	26	2064	2366	2296
	27	2213	2094	2419
Média		2127	2230	2397
Resfriamento Brusco	28	2591	2341	2415
	29	2384	2147	2328
	30	2273	2276	2300
Média		2416	2255	2348

Tabela 27 – fck 20 MPa após exposto à 750°C

750°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	31	566	694	831
	32	271	199	789
	33	787	-	561
Média		541	447	727
Resfriamento Brusco	34	1067	1349	1079
	35	1329	1076	999
	36	1094	1102	1041
Média		1163	1176	1040

Tabela 28 – fck 20 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	37	477	327
	38	427	534
	39	216	695
	373	519	263
Resfriamento Brusco	40	129	1046
	41	227	462
	42	655	310
Média	337	606	711

Tabela 29 – fck 30 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	1	3951	4001
	2	3845	3961
	3	4070	3940
Média	3955	3967	3956
Resfriamento Brusco	4	3908	3924
	5	4001	3904
	6	3975	3930
Média	3961	3919	3938

Tabela 30 – fck 30 MPa após exposto à 150°C

150°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	7	3776	3783
	8	3845	3767
	9	3910	3842
Média	3844	3797	3879
Resfriamento Brusco	10	3806	3822
	11	3847	3904
	12	3847	3896
Média	3833	3874	3816

Tabela 31 – fck 30 MPa após exposto à 300°C

300°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	13	3509	3473
	14	3536	3527
	15	3520	3503
Média	3522	3501	3536
Resfriamento Brusco	16	3512	3604
	17	3482	3553
	18	3486	3522
Média	3493	3560	3450

Tabela 32 – fck 30 MPa após exposto à 450°C

450°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	19	2938	2987
	20	3018	2980
	21	2936	2922
Média	2964	2963	3104
Resfriamento Brusco	22	3010	3082
	23	2909	3085
	24	2874	3057
Média	2931	3075	2803

Tabela 33 - fck 30 MPa após exposto à 600°C

600°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	25	2392	2357
	26	2505	2169
	27	-	2172
Média	2449	2233	2253
Resfriamento Brusco	28	2438	2269
	29	2300	2248
	30	2329	2248
Média	2356	2255	2321

Tabela 34 – fck 30 MPa após exposto à 750°C

750°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	31	1192	812
	32	1537	101
	33	1470	251
Média	1400	388	148
Resfriamento Brusco	34	1659	1718
	35	1613	500
	36	1205	1308
Média	1492	1175	424

Tabela 35 – fck 30 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	37	884	235
	38	857	303
	39	871	159
Média	871	232	151
Resfriamento Brusco	40	645	333
	41	677	255
	42	926	272
Média	749	287	212

Tabela 36 – fck 50 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	1	5043	5082
	2	5077	5077
	3	4996	5038
Média	5039	5066	5127
Resfriamento Brusco	4	4921	5089
	5	5055	5132
	6	5128	5148
Média	5035	5123	5050

Tabela 37 – fck 50 MPa após exposto à 150°C

150°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	7	5046	5081
	8	4971	4996
	9	5047	4908
Média	5021	4995	5051
Resfriamento Brusco	10	5094	5021
	11	4963	4983
	12	5034	5082
Média	5030	5029	5072

Tabela 38 - fck 50 MPa após exposto à 300°C

300°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	13	4769	4844
	14	4813	4650
	15	4821	4813
Média	4801	4769	4787
Resfriamento Brusco	16	4826	4744
	17	4691	4678
	18	4777	4762
Média	4765	4728	4765

Tabela 39 – fck 50 MPa após exposto à 450°C

450°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	19	4429	4262
	20	4477	4440
	21	4425	4464
Média	4444	4389	4363
Resfriamento Brusco	22	4231	4340
	23	4273	4311
	24	4405	4412
Média	4303	4354	4183

Tabela 40 – fck 50 MPa após exposto à 600°C

600°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	25	3772	3209
	26	3727	3577
	27	3554	3563
Média	3684	3450	3247
Resfriamento Brusco	28	3214	3114
	29	3157	3158
	30	3187	3483
Média	3186	3252	2971

Tabela 41 – fck 50 MPa após exposto à 750°C

750°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	31	2491	2577
	32	2443	2427
	33	2154	2502
Média	2363	2502	2425
Resfriamento Brusco	34	2278	2324
	35	1707	2381
	36	1709	2639
Média	1898	2448	2381

Tabela 42 – fck 50 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Resfriamento Lento	37	1219	1345
	38	1242	1133
	39	1108	1174
Média	1190	1217	1240
Resfriamento Brusco	40	957	987
	41	697	903
	42	927	950
Média	860	947	919

APÊNDICE C - Média dos índices esclerométricos em corpos de prova

Tabela 43 – fck 20 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	1	20,50	26,60	27,00
	2	25,00	27,50	28,00
	3	24,50	24,50	26,00
Média		23,33	26,20	27,00
Resfriamento Brusco	4	23,20	25,83	25,83
	5	20,38	25,17	25,67
	6	23,40	24,00	25,50
Média		22,33	25,00	25,67

Tabela 45 – fck 20 MPa após exposto à 300°C

300°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	13	25,75	28,86	29,38
	14	30,33	26,71	31,20
	15	26,63	25,88	27,14
Média		27,57	27,15	29,24
Resfriamento Brusco	16	23,67	23,25	22,00
	17	22,00	23,63	24,00
	18	22,50	24,67	23,40
Média		22,72	23,85	23,13

Tabela 47 – fck 20 MPa após exposto à 600°C

600°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	25	25,75	21,14	30,00
	26	28,71	19,40	28,00
	27	27,56	24,57	26,88
Média		27,34	21,70	28,29
Resfriamento Brusco	28	23,29	18,33	23,14
	29	24,57	15,44	24,43
	30	23,17	23,43	23,33
Média		23,68	19,07	23,63

Tabela 44 – fck 20 MPa após exposto à 150°C

150°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	7	25,60	22,63	24,50
	8	23,89	27,78	27,50
	9	23,71	25,43	26,86
Média		24,40	25,28	26,29
Resfriamento Brusco	10	26,67	20,00	22,00
	11	23,50	27,88	24,00
	12	25,00	24,25	24,33
Média		25,06	24,04	23,44

Tabela 46 – fck 20 MPa após exposto à 450°C

450°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	19	23,67	23,40	29,00
	20	20,67	25,00	28,56
	21	24,38	28,00	28,17
Média		22,91	25,47	28,58
Resfriamento Brusco	22	31,20	20,71	25,67
	23	27,67	25,86	24,71
	24	24,75	23,25	24,43
Média		27,87	23,27	24,94

Tabela 48 - fck 20 MPa após exposto à 750°C

750°C		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	31	21,25	19,00	20,44
	32	15,00	17,20	17,50
	33	16,86	-	16,17
Média		17,70	18,10	18,04
Resfriamento Brusco	34	14,22	14,00	19,00
	35	12,78	12,20	16,75
	36	11,29	14,63	16,89
Média		12,76	13,61	17,55

Tabela 49 – fck 20 MPa após exposto à 900°C

	900°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	37	16,67	15,75	16,00
	38	12,20	16,00	17,29
	39	11,00	17,57	16,00
Média		13,29	15,88	16,43
Resfriamento Brusco	40	10,25	10,00	15,50
	41	11,43	12,00	14,00
	42	10,29	12,00	14,00
Média		10,66	11,33	14,50

Tabela 50 – fck 30 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE		7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	1	25,32	26,33	24,95
	2	29,68	23,97	26,12
	3	24,51	25,21	29,23
Média		26,50	25,17	26,77
Resfriamento Brusco	4	26,99	28,50	26,58
	5	32,33	28,73	27,19
	6	27,51	26,69	29,94
Média		28,94	27,97	27,90

Tabela 51 – fck 30 MPa após exposto à 150°C

	150°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	IE
Resfriamento Lento	7	27,28	25,19	28,34
	8	23,34	28,63	26,73
	9	25,21	31,41	27,62
Média		25,28	28,41	27,56
Resfriamento Brusco	10	28,25	25,78	27,00
	11	24,81	29,78	28,02
	12	17,44	31,59	22,81
Média		23,50	29,05	25,94

Tabela 52 – fck 30 MPa após exposto à 300°C

	300°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	13	16,81	27,45	28,23
	14	20,65	28,98	29,59
	15	24,86	24,74	29,23
Média		20,77	27,06	29,02
Resfriamento Brusco	16	17,70	28,46	27,80
	17	12,88	28,46	25,84
	18	17,70	31,32	26,02
Média		16,09	29,41	26,55

Tabela 53 – fck 30 MPa após exposto à 450°C

	450°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	19	22,89	24,78	24,90
	20	16,36	23,56	23,12
	21	16,09	25,06	31,55
Média		18,45	24,47	26,52
Resfriamento Brusco	22	12,88	22,88	22,46
	23	16,90	27,67	26,73
	24	16,45	32,92	26,58
Média		15,41	27,82	25,26

Tabela 54 – fck 30 MPa após exposto à 600°C

600°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	25	18,24	29,90
	26	16,27	31,59
	27	-	29,26
Média	17,26	30,25	26,35
Resfriamento Brusco	28	12,88	23,24
	29	12,88	23,19
	30	13,41	22,41
Média	13,06	22,95	23,33

Tabela 55 – fck 30 MPa após exposto à 750°C

750°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	31	21,88	22,72
	32	13,13	21,09
	33	18,75	18,27
Média	17,92	20,69	23,19
Resfriamento Brusco	34	16,68	14,83
	35	18,72	15,05
	36	18,60	15,81
Média	18,00	15,23	19,30

Tabela 56 – fck 30 MPa após exposto à 900°C

900°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	37	11,53	20,30
	38	13,23	17,20
	39	12,34	19,88
Média	12,37	19,13	20,05
Resfriamento Brusco	40	10,73	13,85
	41	13,41	16,00
	42	14,08	14,89
Média	12,74	14,91	14,70

Tabela 57 - fck 50 MPa em temperatura ambiente

AMBIENTE	7 dias	21 dias	28 dias
CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	1	38,00	36,60
	2	34,50	34,13
	3	36,86	34,25
Média	36,45	34,99	36,08
Resfriamento Brusco	4	33,75	36,00
	5	37,71	36,00
	6	36,86	37,44
Média	36,11	36,48	37,96

Tabela 58 – fck 50 MPa após exposto à 150°C

150°C	7 dias	21 dias	28 dias
CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	7	34,00	33,50
	8	38,33	36,44
	9	35,83	35,17
Média	36,05	35,04	35,63
Resfriamento Brusco	10	31,29	39,33
	11	32,00	39,00
	12	34,25	33,25
Média	32,51	37,19	37,25

Tabela 59 - fck 50 MPa após exposto à 300°C

	300°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	13	34,00	38,00	36,89
	14	31,33	34,25	36,78
	15	33,67	31,71	36,29
Média		33,00	34,65	36,65
Resfriamento Brusco	16	28,56	31,00	36,44
	17	30,29	36,56	34,00
	18	33,25	35,44	33,43
Média		30,70	34,33	34,62

Tabela 60 - fck 50 MPa após exposto à 450°C

	450°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	19	38,25	35,88	37,00
	20	38,22	38,86	37,33
	21	31,75	38,00	36,75
Média		36,07	37,58	37,03
Resfriamento Brusco	22	34,13	36,44	36,50
	23	34,75	35,44	35,67
	24	36,89	34,22	35,11
Média		35,26	35,37	35,76

Tabela 61 – fck 50 MPa após exposto à 600°C

	600°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	25	37,56	31,00	36,75
	26	39,13	37,56	37,33
	27	36,78	38,11	36,89
Média		37,82	35,56	36,99
Resfriamento Brusco	28	33,89	32,86	34,00
	29	32,00	30,25	35,00
	30	31,00	32,25	34,00
Média		32,30	31,79	34,33

Tabela 62 – fck 50 MPa após exposto à 750°C

	750°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	31	33,33	28,25	29,75
	32	33,38	29,71	32,67
	33	34,00	32,29	31,33
Média		33,57	30,08	31,25
Resfriamento Brusco	34	31,63	29,20	34,56
	35	30,38	21,00	30,67
	36	32,00	28,86	29,50
Média		31,34	26,35	31,58

Tabela 63 – fck 50 MPa após exposto à 900°C

	900°C	7 dias	21 dias	28 dias
	CP	I.E.	I.E.	I.E.
Resfriamento Lento	37	25,38	28,00	26,57
	38	28,75	24,43	26,00
	39	24,57	24,00	27,33
Média		26,23	26,22	26,63
Resfriamento Brusco	40	18,89	19,25	22,75
	41	20,13	18,29	22,60
	42	18,00	18,00	20,86
Média		19,01	18,51	22,07

ANEXO A - Especificações das características físicas, químicas e mecânicas do cimento

Boletim de Ensaios de Cimento



Atualizado em: 01/07/2016 Produto: CPIIF-40 Norma: NBR 11578
Mês e ano de referência: mai/16 Marca: Votoran Unidade: Rio Branco

Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura(%)		Blaine	Água de	Tempo Pega		Expansib. a	Resist. Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3	R1	#200	#325	(cm2/g)	consist.(%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 2,5	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40
01/05/2016															
02/05/2016	4,8	6,2	3,4	1,0	0,0	0,3	4660	30,6	210	270	0,5	26,2	36,6	42,6	50,7
03/05/2016	4,6	5,9	3,3	0,8	0,0	0,3	4570	31,0	210	270	0,5	25,8	37,5	42,2	49,1
04/05/2016	4,4	6,0	3,4	0,6	0,0	0,2	4610	31,0	230	290	0,5	25,4	36,2	41,1	49,7
05/05/2016	4,4	6,1	3,3	0,8	0,0	0,2	4570	31,0	220	280	0,5	23,8	38,7	42,8	49,7
06/05/2016	4,8	6,2	3,4	1,0	0,0	0,3	4740	31,0	200	260	0,5	25,3	37,2	42,3	48,9
07/05/2016															
08/05/2016															
09/05/2016	4,7	6,2	3,3	0,8	0,0	0,2	4590	31,0	200	260	0,5	26,8	37,4	43,5	51,4
10/05/2016	4,9	6,0	3,4	1,0	0,0	0,3	4700	31,0	230	300	0,5	26,1	38,0	44,5	50,6
11/05/2016	4,8	6,1	3,6	0,9	0,0	0,3	4680	31,1	180	230	1,0	27,4	40,1	44,5	51,8
12/05/2016	4,7	6,0	3,2	0,8	0,0	0,2	4590	31,1	200	260	0,5	24,9	37,7	42,8	50,8
13/05/2016	4,9	5,9	3,7	0,8	0,0	0,6	4780	31,0	190	250	0,5	25,4	35,6	41,7	49,3
14/05/2016															
15/05/2016															
16/05/2016	4,9	6,0	3,5	0,7	0,0	0,3	4700	31,0	220	285	0,5	24,8	35,5	39,7	48,8
17/05/2016	4,5	5,8	3,5	0,7	0,0	0,3	4550	31,0	230	300	1,5	25,0	37,4	43,0	49,9
18/05/2016	4,7	6,0	3,7	0,7	0,0	0,5	4520	31,1	205	265	0,0	24,2	35,4	40,0	49,9
19/05/2016	4,9	5,8	3,6	0,8	0,0	0,4	4660	31,0	230	300	0,0	24,0	36,5	43,0	49,2
20/05/2016	4,7	6,0	3,6	0,5	0,0	0,3	4660	31,0	220	280	0,0	23,4	37,4	41,8	49,1
21/05/2016															
22/05/2016															
23/05/2016	4,8	6,0	3,9	0,6	0,0	0,5	4570	31,0	220	280	0,0	22,7	35,2	41,3	49,2
24/05/2016	4,8	6,0	3,6	1,1	0,0	0,4	4480	30,4	230	300	0,0	23,2	38,2	43,9	50,7
25/05/2016	4,5	6,1	3,6	1,2	0,0	0,3	4630	30,9	220	280	0,0	22,5	37,8	41,9	49,3
26/05/2016															
27/05/2016	4,6	6,1	3,2	0,8	0,0	0,3	4610	30,6	200	260	0,5	24,0	35,3	39,4	47,9
28/05/2016															
29/05/2016															
30/05/2016	4,8	5,8	3,4	0,9	0,0	1,0	4610	30,4	225	290	0,5	23,4	35,6	41,7	48,3
31/05/2016	5,2	5,8	3,5	1,0	0,0	0,2	4740	30,6	205	270	0,5	23,5	35,3	41,9	48,2
Média	4,73	5,99	3,48	0,84	0,00	0,35	4629,52	30,90	213,10	275,24	0,43	24,66	36,89	42,17	49,64
Desvio Padrão	0,19	0,13	0,17	0,17	0,00	0,18	76,78	0,22	14,62	18,54	0,36	1,35	1,33	1,40	1,04
Mínimo	4,39	5,75	3,20	0,50	0,00	0,20	4480,00	30,40	180,00	230,00	0,00	22,50	35,20	39,40	47,90
Máximo	5,18	6,20	3,88	1,18	0,00	1,00	4780,00	31,10	230,00	300,00	1,50	27,40	40,10	44,50	51,80

Observações:

ME = 3,09 g/cm³

Abílio Estevão Galli Junior

Nome
Responsável Controle de Qualidade
Votorantim Cimentos S/A

Mário L. Franceschi Fontoura

Nome
Gerente da Fábrica
Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894
Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898
Site: www.vcimentos.com.br

