

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

MARIANA ACIOLI DO CARMO PAIVA

**Análise das propriedades mecânicas nas primeiras idades do concreto de  
lajes alveolares utilizando o ensaio de ultrassom**

São Carlos

2017

MARIANA ACIOLI DO CARMO PAIVA

**Análise das propriedades mecânicas nas primeiras idades do concreto de  
lajes alveolares utilizando o ensaio de ultrassom**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL, DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE  
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P142a Paiva, Mariana Acioli do Carmo  
Análise das propriedades mecânicas nas primeiras  
idades do concreto de lajes alveolares utilizando o  
ensaio de ultrassom. / Mariana Acioli do Carmo Paiva;  
orientador Vladimir Guilherme Haach. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de  
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Ensaio não destrutivo. 2. Ultrassom. 3.  
Concreto. 4. Primeiras idades. 5. Lajes alveolares. I.  
Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARIANA ACIOLI DO CARMO PAIVA**.

Título da dissertação: "Análise das propriedades mecânicas nas primeiras idades do concreto de lajes alveolares utilizando o ensaio de ultrassom".

Data da defesa: 25/10/2017.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Dr. **Vladimir Guilherme Haach (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Fernando Menezes de Almeida Filho**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. **Luiz Carlos de Almeida**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(Engenharia de Estruturas):  
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para vencer mais esta etapa na minha vida.

Ao meu pai, José Alberto, minha mãe, Marta Eugênia, e minha irmã, Gabriela, por me apoiarem sempre e acreditarem nos meus sonhos por mais altos que eles sejam. Muito obrigada por estarem ao meu lado mesmo quando eu estava a quilômetros de distância.

Aos meus avós, Maria Augusta, Lauthenay, Maísa e Jandir (*in Memoriam*), por se fazerem presente na minha vida e me ensinarem que os únicos bens que ninguém pode nos tirar é o conhecimento e a família. A todos da minha família que sempre me apoiaram.

A todos os professores do Departamento de Estrutura da Escola de Engenharia de São Carlos por auxiliarem na minha formação, em especial, ao meu orientador Vladimir G. Haach por toda paciência, apoio e disponibilidade ao longo deste trabalho.

Aos funcionários do laboratório de estruturas pela ajuda durante os ensaios experimentais.

Aos meus amigos de departamento por terem me acolhido, apoiado e ajudado em todos os momentos. Mais que amigos, vocês foram minha família nesses últimos anos.

A todos os funcionários da secretaria do SET que sempre nos ajudaram quando foi preciso.

À CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa.



## RESUMO

PAIVA, M. A. do C. **Análise das propriedades mecânicas nas primeiras idades do concreto de lajes alveolares utilizando o ensaio de ultrassom.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Ensaaios não destrutivos são testes que não causam danos a estrutura ensaiada, o que os torna um excelente auxílio aos métodos de ensaios tradicionais quando estes apresentam alguma dificuldade de serem executados. Desta forma, este trabalho visa utilizar os ensaios de esclerometria e ultrassom, dando ênfase na transmissão indireta, para determinar a resistência à compressão nas primeiras idades do concreto e possibilitar um melhor controle tecnológico do material. Para se obter a relação entre os dados experimentais não destrutivos e a resistência à compressão, foram realizados ensaios em duas etapas. A primeira etapa foi desenvolvida em corpos de prova cilíndricos e prismáticos com três traços diferentes de concreto, onde foi variado o consumo de cimento. Na segunda etapa os ensaios foram realizados em uma laje alveolar produzida em laboratório. Com os dados coletados nos ensaios foi possível determinar a relação de crescimento da resistência, do índice esclerométrico e da velocidade do pulso ultrassônico ao longo do tempo, além das correlações velocidade x resistência, velocidade x índice esclerométrico; e a correlação múltipla entre os três fatores. Com base nisto, concluiu-se que é viável ter um bom controle tecnológico da resistência do concreto a partir dos ensaios não destrutivos. Este trabalho não obteve uma equação universal que correlacionasse os parâmetros para todos os tipos de traço de concreto, porém foram obtidas correlações satisfatórias para os traços ensaiados. Desta forma, é possível afirmar que o ensaio de ultrassom, especificamente posição indireta de 30 centímetros, e a esclerometria são ferramentas possíveis de serem aplicadas como auxílio à obtenção da resistência à compressão nas primeiras idades.

Palavras-chave: Ensaaios não destrutivos. Ultrassom. Concreto. Primeiras idades. Lajes alveolares.



## ABSTRACT

PAIVA, M. A. do C. **Analysis of mechanical properties of concrete applied to hollow-core slabs in the early ages using ultrasonic tests.** 2017. Dissertation (M. Sc. in Structural Engineering) –School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

Non-destructive tests are tools that do not cause damage to the evaluated structure, which is an excellent support for traditional test methods. Therefore, this work used non-destructive tests such as rebound method and ultrasound, emphasizing the indirect transmission, to determine compression strength in the early age sand enable a better technological control of the material. Two-step tests were performed to see if there is a relationship between non-destructive test data and the compressive strength. The first one was performed in specimens with three different concrete compositions, where the cement ratio was varied, where as the second was carried out in a laboratory hollow core slab. With the experimental data was possible to determine the relationship of the compression strength, rebound number and ultrasonic pulse velocity over time; as the correlations strength x velocity, velocity x rebound number; and a multiple correlation between the three tests. Based on this, it was concluded that it is possible to have a good technological control of the concrete strength from non-destructive tests. A universal equation that correlates parameters for all types of concrete compositions was not found, but satisfactory correlations were obtained for the tested concretes. In this way, it is possible to affirm that the ultrasound test, specifically indirect position of 30 centimeters, and rebound method are possible tools to be applied as aid to obtain the compression strength in the early ages.

Keywords: Non-destructive tests. Ultrasound. Concrete. Early age. Hollow-core slab.



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Objetivos .....	14
1.2. Justificativa .....	15
1.3. Metodologia .....	16
2. CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES .....	19
2.1. Microestrutura do concreto .....	19
2.2. Trabalhabilidade .....	20
2.3. Exsudação e segregação .....	21
2.4. Retração plástica .....	22
2.5. Tempo de pega .....	23
2.6. Resistência à compressão .....	24
2.7. Módulo de elasticidade .....	26
2.8. Velocidade do pulso ultrassônico .....	27
3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	29
3.1. Ensaio de Dureza Superficial .....	31
3.1.1. Equipamento .....	33
3.1.2. Fatores que influenciam o ensaio .....	33
3.1.3. Aplicações .....	36
3.2. Ensaio de Ultrassom .....	37
3.2.1. Princípio Físico .....	37
3.2.2. Equipamento e Tipos de Medição .....	41
3.2.3. Fatores que influenciam a velocidade do ultrassom .....	44
3.2.4. Aplicações .....	47
3.2.5. Correlação entre velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão .....	50
3.3. Métodos Combinados .....	52
4. LAJES ALVEOLARES .....	55
4.1. Produção das Lajes Alveolares .....	56
4.2. Modelos de Seção Transversal .....	62
4.3. Vantagens e Desvantagens .....	63
4.4. Aplicações .....	63
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	65
5.1. Materiais Utilizados .....	65

5.2.	Equipamentos .....	66
5.3.	Ensaio de caracterização do concreto.....	68
5.4.	Ensaio da laje alveolar.....	71
5.5.	Considerações Finais .....	77
6.	RESULTADOS .....	79
6.1.	Ensaio nos corpos de prova de diferentes traços .....	79
6.1.1.	Ensaio de tempo de pega.....	79
6.1.2.	Ensaio de resistência à compressão .....	84
6.1.3.	Ensaio de esclerometria .....	87
6.1.4.	Ensaio de ultrassom .....	90
6.2.	Ensaio na laje alveolar.....	109
6.2.1.	Ensaio de resistência à compressão .....	110
6.2.2.	Ensaio de esclerometria .....	110
6.2.3.	Ensaio de ultrassom .....	113
6.3.	Analogia entre os ensaios .....	123
6.3.1.	Ensaio de compressão.....	123
6.3.2.	Ensaio de esclerometria .....	124
6.3.3.	Ensaio de Ultrassom.....	127
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	131
7.1.	Conclusão .....	131
7.2.	Sugestão para trabalhos futuros.....	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
	APÊNDICE A .....	139
	APÊNDICE B .....	145
	APÊNDICE C .....	149
	C.1. Ensaio em corpos de prova com concreto com alto consumo de cimento .....	149
	C.2. Ensaio em corpos de prova com concreto com baixo consumo de cimento .....	152
	C.3. Ensaio em corpos de prova com concreto com médio consumo de cimento .....	154
	C.4. Ensaio na laje Alveolar com armadura.....	157
	C.5. Ensaio na laje Alveolar sem armadura .....	159

## 1. INTRODUÇÃO

A propriedade mais valorizada para o controle de qualidade do concreto é a resistência à compressão axial. É a partir desta propriedade que se determina em um projeto estrutural qual o concreto desejado. A determinação da resistência à compressão do concreto é definida a partir da realização de ensaio aos 28 dias. Contudo, existem casos onde é necessário conhecer a resistência do concreto em idades inferiores aos 28 dias, como no caso do controle tecnológico das lajes alveolares.

A fabricação das lajes alveolares exige que se tenha um alto controle tecnológico em todas as etapas de produção. Durante a etapa de aplicação da protensão na peça é necessário que o concreto esteja com a resistência especificada em projeto. Caso o concreto não apresente resistência suficiente para suportar a tensão aplicada no cabo de protensão, a peça tende a romper o que acarreta em prejuízo financeiro e de tempo para a indústria.

Desta forma, o principal ensaio de controle tecnológico para a liberação da protensão em peças pré-fabricadas é a obtenção da resistência à compressão, em geral, após 24 horas da concretagem. O método mais tradicional e consagrado atualmente é o ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos. Contudo, o concreto utilizado em um dos dois tipos existentes da produção das lajes alveolares pré-moldadas apresenta baixo índice de consistência, o que dificulta a moldagem dos corpos de prova. Além disso, o concreto precisa apresentar certo nível de resistência inicial para a realização do ensaio nas primeiras idades, o que pode acarretar resultados imprecisos.

Os ensaios não destrutivos se apresentam como uma solução prática, barata e eficiente para estas dificuldades, pois possibilitam ensaiar diretamente a estrutura, não uma amostra do concreto, e realizar diversas repetições do ensaio ao longo da peça sem causar nenhum dano à mesma ou o aumento de amostras ensaiadas, como no caso do ensaio de resistência à compressão axial. Além do mais, as medições podem ser realizadas em diversas idades, sendo possível monitorar o ganho de resistência da peça.

Todavia, existem diversos fatores que afetam os resultados dos ensaios não destrutivos como os tipos e dimensões dos agregados, as condições de umidade, idade do concreto, entre outras.

Portanto, este trabalho propôs estudar a utilização do método não destrutivo de ultrassom para a obtenção da resistência do concreto à compressão nas primeiras idades em lajes alveolares pré-fabricadas.

Neste trabalho, para a realização do controle tecnológico do concreto, foram realizados ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria, além do tradicional ensaio de compressão axial e do ensaio para a determinação do tempo de pega.

Este trabalho foi dividido em oito capítulos. Neste primeiro capítulo, apresenta-se uma pequena introdução sobre o tema que será trabalhado, os objetivos desejados com a pesquisa, a metodologia que será utilizada para desenvolver o presente trabalho e se alcançar os objetivos propostos, e a justificativa do interesse pela pesquisa. O capítulo dois apresenta um resumo sobre as propriedades do concreto nas primeiras idades. O terceiro capítulo descreve os conceitos básicos sobre os métodos de ensaios não destrutivos utilizados na pesquisa. No capítulo subsequente, aborda-se as características das lajes alveolares pré-fabricadas. O capítulo cinco fala sobre os procedimentos da realização do ensaio. O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos e uma discussão sobre eles. O capítulo sete expõe as considerações finais; e, por último, são apresentadas as referências utilizadas como base para a elaboração do presente texto.

## **1.1. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral elaborar um método prático e rápido para o controle tecnológico do concreto nas primeiras idades por meio do ensaio não destrutivo de ultrassom transmissão indireta, tendo como referência as lajes alveolares pré-fabricadas.

Para se atingir o objetivo geral, são necessários outros específicos:

- a) Estudar o método de ensaio não destrutivo ultrassom, dando foco à posição de transmissão indireta, as propriedades e o comportamento do concreto nas primeiras idades, os métodos de ensaios complementares ao ultrassom para se obter dados suficientes para o objetivo geral ser alcançado;
- b) Obter curvas da velocidade de pulso ultrassônico *versus* resistência à compressão do concreto, de forma a viabilizar a utilização do ensaio de ultrassom como uma alternativa para obtenção da resistência à compressão nas primeiras idades;
- c) Determinar uma relação entre a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência a compressão nas primeiras idades do concreto, utilizado na fabricação de lajes alveolares pré-fabricadas, por meio do ensaio não-destrutivo de ultrassom, especificamente, a posição de transmissão indireta;
- d) Consolidar a posição de transmissão indireta do ultrassom como a alternativa mais prática deste ensaio para lajes pré-moldadas;

- e) Analisar a interferência das armaduras nos resultados do ultrassom.

## 1.2. Justificativa

A aplicação de estruturas de concreto pré-moldado na indústria da construção civil apresentou um aumento nas últimas décadas, pois surgiu como uma solução ao grande desperdício de material, a baixa produtividade e controle de qualidade que este setor apresenta.

O concreto pré-fabricado é utilizado em diversos setores da construção civil, como: edificações, infraestrutura urbana e construções pesadas. Segundo El Debs (2000) o emprego dos elementos pré-moldados aumenta o grau de desenvolvimento tecnológico e social do país, porque implica em uma maior oferta de equipamentos, na valorização da mão-de-obra e na exigência de uma melhor qualidade dos produtos.

Contudo, alguns setores da indústria de pré-moldados apresentam dificuldades de determinar a resistência à compressão nas primeiras idades do concreto a fim de possibilitar a aplicação da protensão. Isto ocorre, pois o concreto utilizado na produção de pré-moldados apresenta, em alguns casos, baixos índices de consistência, o que dificulta a moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio de resistência a compressão. Para auxiliar na avaliação das propriedades do concreto, os ensaios não destrutivos vêm sendo aperfeiçoados ao longo dos anos.

Os ensaios não destrutivos (END) são alternativas práticas para a indústria de pré-moldados, pois são realizados diretamente na peça produzida diminuindo a probabilidade de erros por fatores externos e otimizando o tempo da produção. Além disso, são ensaios de baixo custo e fácil execução.

Juliani (2014) pesquisou a utilização de métodos de ensaios não destrutivos em lajes alveolares a fim de obter o módulo de elasticidade dinâmico e correlacionar com a resistência à compressão. Contudo, por apresentar dificuldades, principalmente em garantir que a posição dos transdutores do ensaio de ultrassom fosse a mesma em todas as idades, acabou descartando a medição indireta e focando no ensaio de ultrassom com transmissão direta e no ensaio de excitação por impulso.

Para a linha de produção das lajes alveolares, a medição indireta é a posição de transmissão mais vantajosa, pois pode ser realizada por um único operador. Desta forma, decidiu-se estudar detalhadamente a utilização da medição indireta do método de ensaio não destrutivo, para a obtenção das velocidades de pulso ultrassônico, e sua correlação com a

resistência do concreto, para se obter uma solução prática para o controle tecnológico do concreto em lajes alveolares.

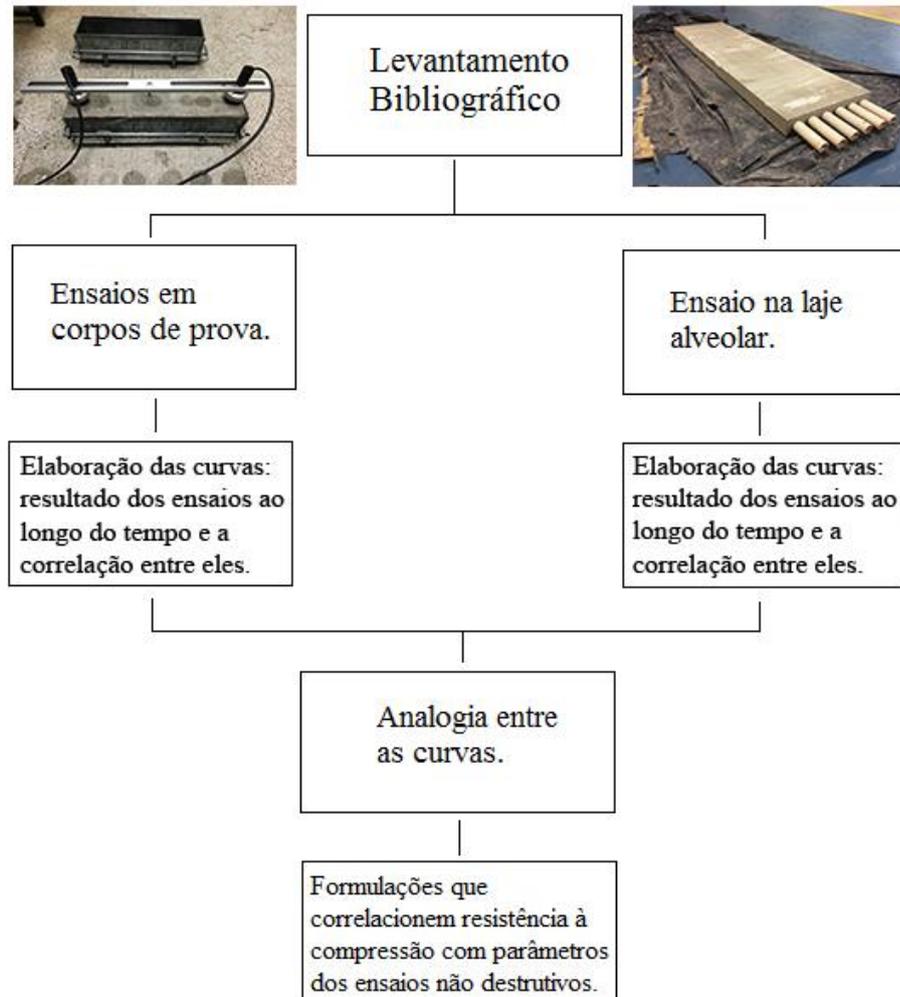
### 1.3. Metodologia

A fim de se alcançar os objetivos descritos anteriormente, foram executados os seguintes procedimentos:

- a) Levantamento bibliográfico dos temas abordados neste trabalho, como: ensaios não destrutivos, ensaios de ultrassom, propriedades do concreto nas primeiras idades e lajes alveolares;
- b) Moldagem de corpos de prova prismáticos e cilindros de três traços de concreto, para a realização de ensaios de caracterização do concreto nas primeiras idades. Os traços do concreto são definidos de acordo com estudos realizados anteriormente.
- c) Realização de ensaio para medir o início e o fim do tempo de pega do concreto utilizado na elaboração dos corpos de prova apresentados no item b.
- d) Realização dos ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom nos corpos de prova prismáticos do item b, e do ensaio de resistência a compressão, nos corpos de prova cilíndricos, para a determinação das curvas de resistência à compressão e os respectivos parâmetros dos ensaios não destrutivos. Os ensaios são realizados ao longo das primeiras 24 horas após a concretagem, e aos 7 e 28 dias;
- e) Elaboração das curvas dos parâmetros dos ensaios não destrutivos pelo tempo, destes pela resistência, e da resistência à compressão do concreto pelo tempo, com base nos dados obtidos nos ensaios do item c e d;
- f) Produção de laje alveolar para a realização dos mesmos ensaios descritos no item d para os corpos de prova. A laje foi produzida com um lado com e um sem armadura para a análise da influência da presença da armadura no ensaio de ultrassom;
- g) Elaboração das curvas dos dados dos ensaios pelo tempo e suas correlações com a resistência à compressão do concreto, com base nos dados obtidos nos ensaios do item f;
- h) Comparação entre as curvas obtidas nos corpos de prova e nas lajes para a obtenção de uma correlação entre os mesmos;
- i) Análise dos resultados e elaboração de formulações que relacione a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto de lajes alveolares com o tempo e a correlação entre os mesmos.

A Figura 1.1 apresenta o fluxograma da metodologia com todas as atividades que foram desenvolvidas ao longo do trabalho.

Figura 1.1 -Fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: Autora (2017)



## **2. CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES**

O concreto é um material que se apresenta em dois estados físicos distintos denominados de estado fresco e estado endurecido. Por apresentar uma fluidez no estado inicial, o concreto permite ser moldado de diversas formas geométricas, apresentando alta resistência, de forma prática e financeiramente competitiva, vantagens que possibilitaram o concreto ser o material mais utilizado na construção civil.

Segundo Mehta & Monteiro (2014), pode-se definir que o período das primeiras idades se inicia com o concreto fresco, de consistência plástica, e termina com o concreto, de um a dois dias de idade, que seja resistente o suficiente para permanecer sem maiores cuidados.

As primeiras idades é um curto intervalo de tempo comparado a vida útil do concreto; contudo, é neste período que são realizadas operações fundamentais para se obter as propriedades desejadas do concreto, como: proporcionamento dos materiais, mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento, além da cura.

O cuidado com o concreto nas primeiras idades é fundamental não somente para seu desempenho estrutural, como também para a sua durabilidade. É neste período que ocorrem as primeiras reações de hidratação que definem a microestrutura do concreto e, conseqüentemente, as suas propriedades.

Diferente da maioria dos materiais utilizados na construção civil, o concreto apresenta uma microestrutura altamente complexa e heterogênea, o que torna mais difícil o controle de suas propriedades.

Desta forma, é essencial o controle das operações realizadas com o concreto fresco e de suas propriedades para assegurar que a estrutura final esteja de acordo com o que foi projetado. Pois, todas as propriedades do concreto que se manifestarão posteriormente ao estado fluido são definidas nesta idade inicial do material (ROMANO, CARDOSO e PILEGGI, 2011)

Os tópicos subsequentes apresentam a microestrutura do concreto e algumas propriedades do concreto no estado fresco, de maneira sucinta.

### **2.1. Microestrutura do concreto**

A microestrutura de um sólido é constituída pelo tipo, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases presente nele. Seu estudo e análise são essenciais, pois é a

microestrutura interna que origina as propriedades do material, e qualquer alteração na microestrutura as modificam.

A microestrutura do concreto é extremamente heterogênea e altamente complexa. Esta é constituída por três fases: agregados, pasta de cimento hidratada e zona de transição. As fases da microestrutura não são distribuídas de maneira homogênea no concreto, como também não são homogêneas em si.

Existem diferentes tipos de agregados utilizados para a produção de concreto. Para esta fase, as características químicas ou mineralógicas dos agregados são menos importantes que as características físicas, como distribuição dos poros, volume e tamanho.

A fase da pasta de cimento hidratada é resultado da hidratação do cimento Portland, sendo este produzido a partir de um clínquer com pequena quantidade de sulfato de cálcio. Com a reação de hidratação, os quatro componentes sólidos resultantes nesta fase são: o silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminato de cálcio e grãos de clínquer não hidratados. O principal componente na determinação das propriedades da pasta é o silicato de cálcio hidratado. Contudo, as propriedades mecânicas são controladas pelas microestruturas que geram elos mais fracos.

A zona de transição é a fase que se dispõe menos informação. Contudo, sabe-se que esta é a região entre o agregado e a pasta de cimento, onde a relação água/cimento é mais alta que na pasta devido aos filmes de água que se formam na superfície dos agregados. Nesta região os vazios são maiores que na matriz da pasta; além disso, ocorre uma maior formação de hidróxido de cálcio e etringita, ao invés de silicato de cálcio hidratado. Desta forma, a zona de transição apresenta baixa resistência.

Portanto, a resistência característica do concreto é, normalmente, determinada pelas porosidades da matriz da pasta de cimento e da zona de transição, visto que em componentes multifásicos a porosidade de cada etapa é um fator limitante para a resistência, e os agregados são geralmente estruturas densas e fortes.

## **2.2. Trabalhabilidade**

ASTM C125:2015 define trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima de homogeneidade.

Esta propriedade interfere no desempenho das operações fundamentais do concreto no estado fresco, pois determina a facilidade com que o concreto pode ser manipulado sem que haja segregação.

Pode-se afirmar que esta propriedade não é intrínseca ao concreto, pois depende de definições externas, como o tipo de obra e, conseqüentemente, o tipo de lançamento, adensamento e acabamento.

O termo trabalhabilidade representa propriedades do concreto no estado fresco que são difíceis de quantificar. Mehta & Monteiro (2014) afirmam que os dois componentes principais da trabalhabilidade é a coesão e a consistência, sendo estas a resistência a exsudação e a segregação e a facilidade de escoar, respectivamente.

Segundo Romano, Cardoso e Pileggi (2011) os conceitos de consistência e trabalhabilidade surgiram a partir da necessidade de explicitar, mesmo que de modo sensorial, as características desejadas para o concreto nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

Não existe um ensaio padrão para medir diretamente a trabalhabilidade, desta forma o ensaio mais utilizado para este fim é o ensaio de abatimento de tronco de cone (ensaio de fluxo livre) que mede a consistência do concreto. No Brasil, este ensaio é descrito pela ABNT NBR NM 67:1998 e consiste em preencher um tronco de cone de 30 cm de altura com 10 cm de diâmetro no topo e 20 cm de diâmetro na base, em seguida retirar o cone e medir o decréscimo da altura, sendo este chamado de abatimento do concreto. Este ensaio não é considerado adequado para concretos de consistência fluida ou muito seca.

Os fatores que afetam a consistência, a coesão e, conseqüentemente, têm influência na trabalhabilidade são: consumo de água e cimento, características do agregado e a utilização de aditivos e adições.

### **2.3. Exsudação e segregação**

O fenômeno da segregação pode ser definido como a separação de componentes da mistura do concreto fresco de maneira que sua distribuição deixe de ser uniforme. A segregação pode ocorrer com a separação dos agregados da argamassa, para concretos de consistência seca, e com a separação de parte da água da mistura, para concretos fluidos. Este segundo tipo é denominado exsudação. Portanto, a exsudação resulta da incapacidade dos materiais componentes do concreto reterem a água de amassamento de maneira uniforme na mistura.

Desta forma, definiu-se a exsudação como um fenômeno cuja sua manifestação externa é o surgimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado, contudo antes do tempo de pega (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Estes fenômenos interferem diretamente na resistência final do concreto, pois a camada superficial da estrutura fica coberta por uma camada de nata com uma alta relação água/cimento, o que a torna porosa e fraca. Além disso, a água de exsudação não se posiciona totalmente na superfície da estrutura, parte dela fica retida na zona de transição do concreto e sob barras horizontais da armadura reduzindo a resistência dessas regiões.

Estes problemas podem ser reduzidos ou eliminados tendo cuidado na escolha dos materiais, na granulometria dos agregados, na dosagem e no manuseio e lançamento do concreto.

#### **2.4. Retração plástica**

A retração plástica é a redução do volume do concreto fresco, ou seja, quando ainda está no estado fresco, provocada pela perda de água, sem a ação de cargas externas. Isto ocorre quando a taxa de perda de água da superfície é superior a taxa de água exsudada disponível.

No momento que o concreto é exposto a uma umidade relativa inferior a 100%, ou seja, a umidade relativa do ar, ele tende a perder água e retrair. Quando a água que evapora para o ambiente é a água livre retida em grandes cavidades, sua perda não é acompanhada por retração. A retração irá ocorrer, na maioria das vezes, pela perda de água adsorvida e retida em pequenos capilares.

As tensões geradas no concreto pela perda de água causam o aparecimento de fissuras. As fissuras típicas da retração plástica são adjacentes, paralelas entre si, afastadas uma das outras com distância entre 0,3 a 1 metro e com profundidades de aproximadamente 25 a 50 mm (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Os principais fatores que influenciam a ocorrência de retração são: a composição química do cimento, o teor de cimento no concreto, a relação água/cimento, as condições climáticas e a espessura do corpo de prova.

Existem algumas medidas que podem ser realizadas para evitar a ocorrência da retração, como: umedecer as fôrmas, construir coberturas temporárias para reduzir a temperatura na superfície do concreto, resfriar os agregados e a água de amassamento, proteger o concreto temporariamente com mantas, reduzir o tempo entre o lançamento e o

início da cura, e minimizar a evaporação protegendo o concreto imediatamente após o acabamento com sacos de anagem saturados, camada de água ou um composto de cura.

## **2.5. Tempo de pega**

A pega do concreto é definida como o início da solidificação do concreto fresco, sendo esta proporcionada basicamente pelas reações entre o cimento e a água. Para a determinação do tempo de pega é necessário obter o tempo de início e fim da pega, sendo o tempo de início de pega o que define o limite do manuseio do material, ou seja, aproximadamente quando o concreto fresco não pode mais ser trabalhado, e o tempo de fim de pega quando se inicia o desenvolvimento de resistência mecânica.

No Brasil, os ensaios que definem o tempo de pega para o cimento e para concreto e argamassa são a ABNT NBR NM 65:2003 e ABNT NBR NM 9:2003, respectivamente.

A ABNT NBR NM 65:2003 define, para cimento, o início de tempo de pega como o intervalo de tempo transcorrido desde adição de água ao cimento até o momento que a agulha de Vicat penetra na pasta até uma distância de aproximadamente 4 mm da placa da base. Em relação ao tempo de fim de pega, a referida norma define como o intervalo de tempo transcorrido desde adição da água ao cimento até o momento que a agulha de Vicat penetra 0.5 mm na pasta.

Para argamassas e concreto, a ABNT NBR NM 9:2003 define o início do tempo de pega como o tempo decorrido após o contato do cimento com a água de amassamento, necessário para a argamassa atingir a resistência à penetração igual a 3,4 MPa; e o fim do tempo de pega como o tempo decorrido do contato inicial entre o cimento e a água de amassamento até a argamassa atingir uma resistência à penetração de 27,6 MPa. Vale-se ressaltar que os valores de resistência à penetração definidos em ensaio não são equivalentes aos valores de resistência à compressão do concreto.

Faz-se necessário avaliar separadamente o tempo de pega da argamassa e do concreto, mesmo estes contendo o mesmo cimento, pois os tempos não coincidem em virtude das relações a/c serem diferentes nos dois casos, assim como suas microestruturas.

Os principais fatores que interferem no tempo de pega do concreto são a composição do cimento, a relação a/c, a temperatura e a presença de aditivos.

## 2.6. Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada a principal propriedade do concreto a ser determinada, pois a partir dela se definem outras propriedades como a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

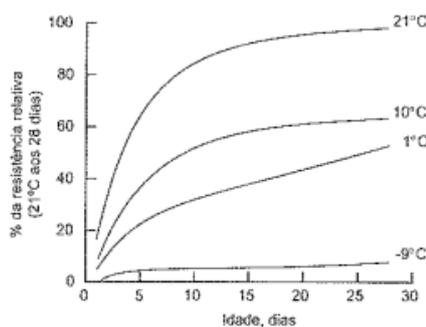
Inúmeros fatores interferem na resistência à compressão do concreto sendo os principais a relação água cimento, as condições de cura, a temperatura e os tipos de cimento.

Segundo Neville (1997), a velocidade de hidratação das partículas de cimento depende da sua finura e quanto mais fina a partícula for mais rápida será a evolução da resistência. De acordo com Mehta & Monteiro (2014), por ser um cimento mais fino, o CP V-ARI tem uma porosidade mais baixa, hidrata-se mais rápido que os outros tipos de concreto e, conseqüentemente, têm uma resistência mais alta nas primeiras idades. A influência do tipo de cimento quanto ao ganho de resistência só ocorre nas primeiras idades, visto que a resistência final de um concreto está relacionada com o consumo de cimento.

Conforme apresentado por Simavorian (2015), as temperaturas são favoráveis ao desenvolvimento da resistência à compressão do concreto quando estão entre 20 e 25°C. Temperaturas inferiores retardam o endurecimento, enquanto temperaturas mais elevadas aceleram o processo. No caso de temperaturas abaixo de 5°C, o endurecimento é retardado e podem causar danos as propriedades do concreto, sendo recomendável suspender a concretagem ou tomar medidas de aquecimento devido à hipótese de congelamento. Para temperaturas abaixo de -10 °C, o processo químico fica totalmente paralisado.

A Figura 2.1 apresenta a influência da temperatura no ganho de resistência nas primeiras idades. Percebe-se que as temperaturas de lançamento e cura do concreto controlam o grau de hidratação do cimento, e com isso, têm uma influência na taxa de desenvolvimento da resistência (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Figura 2.1 – Influência da temperatura no ganho de resistência nas primeiras idades.



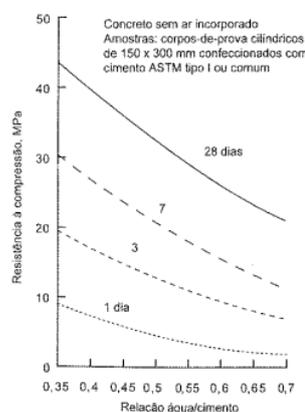
Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014).

As condições da cura do concreto também têm uma influência significativa no ganho de resistência nas primeiras idades. A cura pode ser definida como um conjunto de procedimentos que visa evitar a perda de água pelo concreto, em virtude desta água ser utilizada no processo de hidratação do cimento. Desta forma, é fundamental o controle do tempo, temperatura e condições de umidade, após o lançamento do concreto. Portanto, um adequado controle do processo de cura evita os efeitos de retração por secagem, ocasionados por aumento excessivo da temperatura.

Em uma estrutura com as mesmas dimensões e mesmo concreto, a resistência obtida será maior com o processo de cura úmida contínua do que com uma cura ambiente. Para uma mesma relação a/c, quanto maior o período de cura maior será a resistência, sendo assumido que a hidratação das partículas do cimento anidro ainda está ocorrendo (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Para uma mesma idade, a resistência à compressão diminui à medida que a relação a/c aumenta. Isto ocorre porque a relação a/c influencia diretamente na porosidade da matriz da pasta de cimento, como também na zona de transição. A Figura 2.2 mostra a influência da relação a/c com a perda de resistência.

Figura 2.2 – Influência da relação a/c com o ganho de resistência.



Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014).

Em virtude da dificuldade encontrada para se obter a resistência à compressão diretamente em ensaios; as normas técnicas definem correlações entre a resistência à compressão aos 28 dias e em diferentes idades do concreto. O ACI 209.2R:2008 define que:

$$f_c(t) = \frac{t}{a+bt} f_{c28} \quad (2.1)$$

onde  $f_{c28}$  é a resistência aos 28 dias e as constantes a e b estão definidas pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Coeficientes para a resistência à compressão.

Tipo de Cimento	Cura Normal		Cura Acelerada	
	a	b	a	b
I (ASTM)	4,0	0,85	1,0	0,95
II (ASTM)	2,3	0,92	0,7	0,98

Fonte: ACI 209.2R:2008

A ABNT NBR 6118:2014 define que a resistência à compressão em uma idade diferente dos 28 dias após a concretagem a partir da equação:

$$f_{cd} = \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.2)$$

sendo:  $\beta_1$  é 1 para idades iguais ou superiores aos 28 dias. Para idades inferiores aos 28 dias  $\beta_1$  é determinado através da equação:

$$\beta_1 = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \quad (2.3)$$

onde s constante definida de acordo com o tipo de cimento e t a idade efetiva do concreto em dias.

## 2.7. Módulo de elasticidade

Nas primeiras idades, um das principais propriedades para a formação do concreto é o módulo de elasticidade, pois o valor da tensão interna instalada no concreto depende do valor do módulo de elasticidade. De maneira simplificada, o módulo de elasticidade é a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional assumido. Os fatores que influenciam no seu desenvolvimento ao longo do tempo são, em sua maioria, os mesmos que influenciam a resistência à compressão como a relação a/c, a temperatura, o tipo de agregado e o tipo de cimento utilizado.

Assim como na resistência à compressão, a relação a/c afeta a porosidade da matriz do concreto o que interfere na resistência da pasta de cimento causando variações no módulo de elasticidade. Mehta & Monteiro (2014) afirmam que a relação direta entre a resistência e o

módulo de elasticidade acontece porque ambos são afetados pela porosidade na fase constituinte, contudo são afetados em graus diferentes.

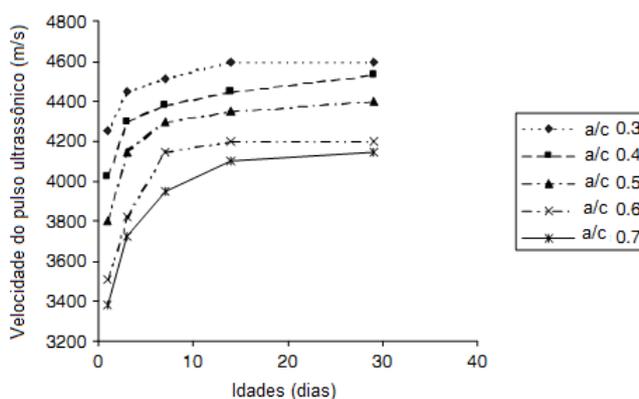
O tipo de agregado tem influência no valor do módulo de elasticidade do concreto. Todavia, essa influência ocorre em idades mais avançadas, pois é nestas idades que a pasta de cimento obtém resistência suficiente para transferir a tensão para os agregados (SIMAVORIAN, 2015).

## 2.8. Velocidade do pulso ultrassônico

Segundo Malhotra & Carino (2004) o efeito da idade na velocidade do pulso ultrassônico é similar ao efeito obtido no ganho de resistência à compressão. Nas primeiras idades a velocidade do pulso aumenta muito rapidamente inicialmente, mas logo tende a estabilizar em um determinado valor. Essa tendência é semelhante à curva da resistência pela idade, porém a velocidade do pulso atinge um valor limitante antes da resistência à compressão.

Para RILEM NDT1 (1972), as medidas da velocidade do pulso são particularmente úteis para o monitoramento do processo de endurecimento, especialmente durante as primeiras 36 horas. Neste período, ocorrem mudanças rápidas na velocidade do pulso que estão associadas a mudanças físico-químicas nas estruturas do cimento, sendo desejável fazer medições a cada uma ou duas horas. À medida que o concreto endurece, os intervalos entre as leituras podem ser alongados para um dia nas idades de 8 a 14 dias; caso seja necessário mais leituras, os intervalos podem ser ainda maior. A velocidade do pulso no concreto aumenta muito lentamente após os 28 dias e a previsão da resistência se torna mais imprecisa do que em idades anteriores. Essa característica do material está expressa na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Variação da velocidade do pulso ultrassônico ao longo do tempo para diferentes relações a/c.



Fonte: Bungey & Millard (2006)

Assim como nas propriedades anteriores, diversos fatores interferem na velocidade de pulso ultrassônico como o tipo de cura, os agregados, a relação a/c, entre outros. A evolução da velocidade de propagação das ondas está relacionada com o aumento da rigidez, característica dependente da idade do concreto. O teor de umidade afeta a velocidade do pulso devido às reações químicas e físicas, pois a presença de água nos vazios altera as condições de cura na hidratação do concreto. Desta forma, em peças saturadas, as ondas podem ser transmitidas pela água, mas com velocidades inferiores as transmitidas pelo concreto (BUNGEY & MILLARD; 2006).

### 3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos podem ser definidos como testes que não causam danos a estrutura ensaiada. Estes métodos têm sua aplicação consagrada em materiais homogêneos, como o aço, e são utilizados rotineiramente para identificar problemas com este tipo de material. Contudo, como o concreto é um material heterogêneo com composições e matérias primas variáveis, a aplicação dos ensaios não destrutivos é relativamente nova e se desenvolve de maneira mais lenta quando comparada a materiais homogêneos.

Segundo Mehta & Monteiro (2014), técnicas bem sucedidas de detecção de fissuras, falhas, danos e imperfeições em materiais homogêneos são de valor limitado quando aplicadas ao concreto, devido à heterogeneidade existente em diversas escalas do material, o que causa interferências como atenuação, dispersão, difração e reflexão.

Devido às melhorias tecnológicas em hardwares e softwares de coletas e análise de dados, as vantagens econômicas na análise de grande volume de concreto, a capacidade de realizar análises rápidas em diversos tipos de obras e análises para a verificação da qualidade do concreto, esses ensaios vêm apresentando um aumento da sua aplicação.

Malhotra & Carino (2004) classificaram os ensaios não destrutivos em duas classes. A primeira consiste em métodos que são utilizados para estimar a força, como os métodos de dureza superficial, arrancamento, resistência a penetração, velocidade de pulso ultrassônico e técnicas de maturidade. A segunda abrange métodos que definem outras características do concreto como umidade, densidade, espessura, reatividade e permeabilidade.

Resumidamente, os ensaios não destrutivos encontrados na literatura serão apresentados nos tópicos abaixo.

- Inspeção Visual

Este método tem como princípio observar, classificar e documentar surgimento de danos visíveis nas superfícies expostas da estrutura. Sua aplicação ocorre na verificação de rachaduras, fragmentação, oxidação, erosão ou defeitos de construção.

- Esclerometria

Utilizado para medir a dureza da superfície do concreto e correlacioná-la com a resistência à compressão, tem como princípio aplicar um impacto na superfície do concreto através de uma massa com uma dada energia cinética.

- Ensaio de arrancamento

Este ensaio tem sua aplicação na determinação da resistência nas primeiras idades do concreto e desta forma o melhor momento para ocorrer a desforma. O ensaio consiste em

medir a força necessária para extrair um corpo metálico incorporado no material em estado fresco.

- Resistência à penetração

Determina a resistência à penetração do concreto, que é relacionada à resistência à compressão do concreto. Para isso, um pino é disparado contra o concreto e é medido o quando este penetrou no concreto.

- Frequência de ressonância e Eco-impacto

Neste ensaio o corpo de prova é excitado de maneira a determinar sua frequência natural e correlacioná-la com sua densidade e módulo de elasticidade. É utilizado para identificar corrosões e deteriorações no concreto.

- Métodos Magnéticos

Utilizado na determinação da localização e posicionamento da armadura, este método utiliza aparelhos que se baseiam no princípio que a presença de aço afeta o campo magnético. Este método também é utilizado para determinar vazios e falha na concretagem.

- Termografia Infravermelho

Este método se baseia na condição que vazios e fissuras possuem baixa condutividade térmica, e é utilizado para detectar vazios internos, fissuras e anomalias na camada inferior do concreto.

- Ultrassom

Utilizado para avaliar a uniformidade do concreto e profundidade de fissuras, estimar a resistência do concreto, determinar o módulo de elasticidade dinâmico e medir mudanças ocorridas nas propriedades do concreto com o tempo; este método tem como princípio a propagação de ondas mecânicas de alta frequência pelo material que será analisado.

Os ensaios não destrutivos são utilizados em diversas áreas além da construção civil como nos setores de petróleo, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, entre outros. Essa versatilidade dos ensaios não destrutivos ocorre pelas suas vantagens de não danificar a amostra, poder ser realizado várias vezes na peça de interesse ao longo do tempo e poder ser realizado na peça em serviço. Contudo, os resultados obtidos são medidas indiretas em sua maioria, e é necessário experiência para interpretá-los.

Os métodos não destrutivos combinados possibilitam estimar a resistência do concreto de maneira mais confiável que a realização de um ensaio isoladamente, sendo esta a alternativa mais realista para a implementação dos ensaios não destrutivos para o controle de qualidade do concreto. Malhotra & Carino (2004) afirma que, das diversas combinações

apresentadas por diferentes pesquisadores, as técnicas mais empregadas em algumas partes do mundo para determinar a resistência do concreto endurecido tem sido a de medir dureza superficial e velocidade de pulso ultrassônico.

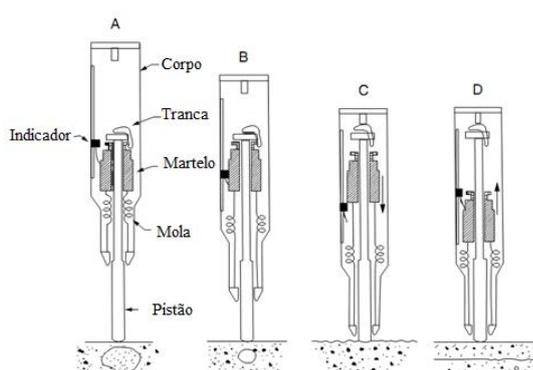
Desta forma, será adotada a combinação desses dois ensaios não destrutivos, com base na velocidade do pulso ultrassônico e na dureza superficial do concreto. Estes ensaios são detalhados nos tópicos subsequentes.

### 3.1. Ensaio de Dureza Superficial

A dureza superficial é uma propriedade que mede a resistência de uma pequena espessura superficial do concreto. Esta propriedade tende a crescer ao longo do tempo e à medida que a resistência à compressão aumenta. Desta forma, desenvolveu-se um método para medir esta característica do material e estabelecer sua relação com a resistência à compressão.

ABNT NBR 7584:2013 define o ensaio esclerométrico como um método não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para a avaliação do concreto endurecido. O esclerômetro também é conhecido como martelo de reflexão de Schmidt, pois em 1948 o engenheiro suíço Ernst Schmidt desenvolveu um martelo de teste para medir a dureza da superfície do concreto a partir do princípio de rebote.

Figura 3.1 - Vista esquemática do ensaio de esclerômetro de reflexão de Schmidt



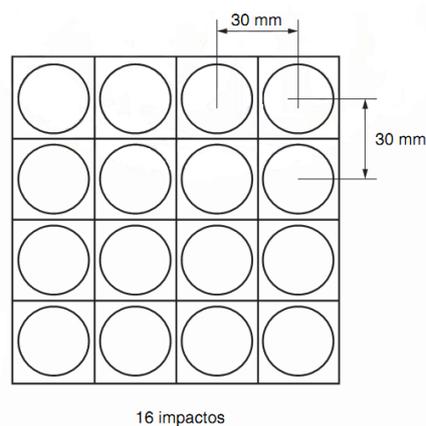
Fonte: MALHOTRA & CARINO (2004)

O procedimento de ensaio se inicia empurrando o êmbolo contra a superfície de concreto para sua liberação a partir da posição de bloqueio, como apresentado na Figura 3.1A. Em seguida, o êmbolo é pressionado lentamente e perpendicularmente contra a superfície de forma que a mola que liga o êmbolo a massa do martelo seja esticada (Figura 3.1B), quando a

mola está completamente estendida o martelo é destravado e se move na direção da superfície (Figura 3.1C). Ao se chocar com o êmbolo, o martelo sofre um recuo que é registrado e define o índice esclerométrico (Figura 3.1D).

ABNT NBR 7584:2013 define que o ensaio deve ser realizado em uma área entre 8000 mm<sup>2</sup> e 40000 mm<sup>2</sup>. Em cada área devem ser realizados 16 impactos distribuídos uniformemente, não sendo permitido mais de um impacto por ponto. A distribuição sugerida pela norma é apresentada na Figura 3.2. A norma também define que o resultado é a média aritmética dos 16 índices esclerométricos. Caso algum índice individual apresente uma diferença maior que 10% da média, este índice esclerométrico deve ser desconsiderado e a média aritmética recalculada. Se ocorrer de algum índice apresentar uma diferença maior que 10%, o ensaio na referente área deve ser desconsiderado.

Figura 3.2 - Área de ensaio e pontos de impacto



Fonte: ABNT NBR 7584:2013

A norma americana ASTM C805 (2002) define que seja realizada uma média de 10 leituras por área, se algum índice apresentar uma diferença de 6 unidades da média, esta leitura deve ser descartada. Caso duas leituras ou mais apresentarem um índice diferente de 6 unidades ou mais da média, todas as leituras devem ser desprezadas e deve-se realizar outras 10 leituras em uma nova área.

Este método é uma solução simples, rápida e barata para avaliar a resistência superficial do concreto *in loco*. De acordo com Mehta & Monteiro (2014), uma boa correlação entre o índice esclerométrico e a resistência do concreto depende dos seguintes fatores: dosagem do concreto, pois o tipo e a quantidade de agregado têm influência no resultado; idade e tipo de cura; uniformidade da superfície; condição de umidade, pois

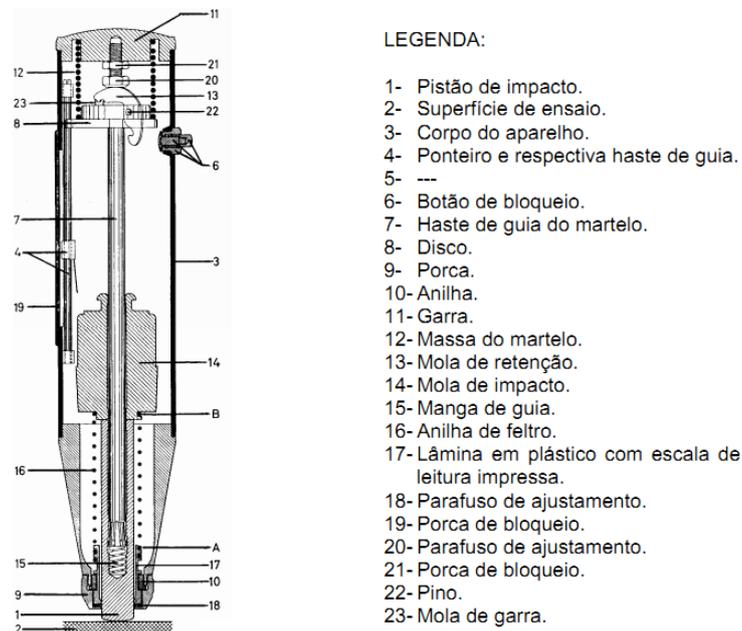
superfície úmida apresenta resultados inferiores a superfícies secas; rigidez do elemento, que deve ser suficiente para evitar vibrações durante o ensaio; e a localização do êmbolo.

Em um ensaio esclerométrico a precisão estimada para a resistência do concreto é aproximadamente de 15% a 20% para ensaios de laboratório e de 25% para estruturas de concreto (MALHOTRA, 1984 apud MEHTA & MONTEIRO, 2014).

### 3.1.1. Equipamento

Existem diferentes modelos de esclerômetros, os quais fornecem diferentes energias de impacto e áreas de contato, estes modelos podem ser aplicados em concretos leves, concretos estruturais e concreto massa. O esclerômetro que é mais amplamente utilizado é o do tipo N, apropriado para o concreto estrutural de resistência entre 20 e 60 MPa, com uma energia de impacto de cerca de 2,2 N.m (NEPOMUCENO,1999). A Figura 3.3 apresenta, detalhadamente, todos os componentes do equipamento.

Figura 3.3 -Seção longitudinal do esclerômetro de Schmidt



Fonte: NEPOMUCENO (1999)

### 3.1.2. Fatores que influenciam o ensaio

- Tipo e quantidade de cimento

O tipo de cimento utilizado no concreto pode afetar o resultado do ensaio. Segundo BS 1881: Part 202-86, o efeito acarretado entre a utilização de diferentes cimentos Portland é

pequeno, não ultrapassando 10%. Em concretos com cimentos de alumina, pode-se apresentar um índice até 100% mais elevados do que o obtido em uma calibração com cimento Portland; e com cimento supersulfatado, obtêm-se resultados de até 50% mais baixo que com o cimento Portland.

Em relação à quantidade de cimento no concreto, a norma britânica supracitada afirma que concretos com uma maior quantidade de cimento resultam em um índice esclerométrico inferior que concretos com a mesma resistência, mas com uma menor quantidade de cimento.

- Tipo do agregado graúdo

Bungey & Millard (2006) consideram que o tipo e a proporção dos agregados influenciam nos resultados do ensaio, pois a resistência é influenciada principalmente pela pasta e pelas características dos agregados. Contudo, admitem que a pasta tenha uma maior influência nos resultados. Para a norma britânica BS 1881: Part 202-86, o tamanho e a quantidade dos agregados graúdos interferem no aumento das leituras individuais o que influencia diretamente os resultados.

- Tipo de textura da superfície de ensaio

A textura da superfície ensaiada é responsável por uma alta variabilidade dos resultados. Isto ocorre porque em superfícies rugosas o pistão causará um esmagamento excessivo diminuindo o índice esclerométrico, o mesmo ocorre em superfícies que apresentem vazios sob elas. Caso o pistão pegue uma região com um agregado graúdo na superfície, sua leitura resultará em um valor mais elevado. Grandes erros também podem ser acarretados pelo tipo de fôrma utilizado na peça (BUNGEY; MILLARD, 2006).

- Idade e tipo de cura

BS 1881: Part 202-86 estabelece que a relação entre resistência e dureza superficial varia em relação ao tempo e ao tipo de cura. Pode-se desconsiderar a influência do tempo no concreto com idade entre três dias e três meses; e para cada tipo de cura deve ser estabelecida uma relação específica.

Bungey & Millard (2006) não recomendam a utilização do esclerômetro em concretos de baixa resistência (inferior a 10 MPa), pois os índices esclerométricos são baixos para a realização de leituras precisas e ocorre a danificação da superfície do concreto.

- Carbonatação da superfície

Para BS 1881: Part 202-86 as reações de carbonatação aumentam a dureza superficial do concreto, isto apresenta uma maior influência em concretos com uma idade inferior a três meses. Em circunstâncias de alta temperatura e elevada concentração de dióxido de carbono, a

carbonatação pode ter um efeito significativo em idades mais precoces. Os produtos gerados por estas reações afetam a camada superficial, o que faz com que o ensaio deixe de ser representativo para o concreto dentro de um elemento.

- Condições de umidade do concreto

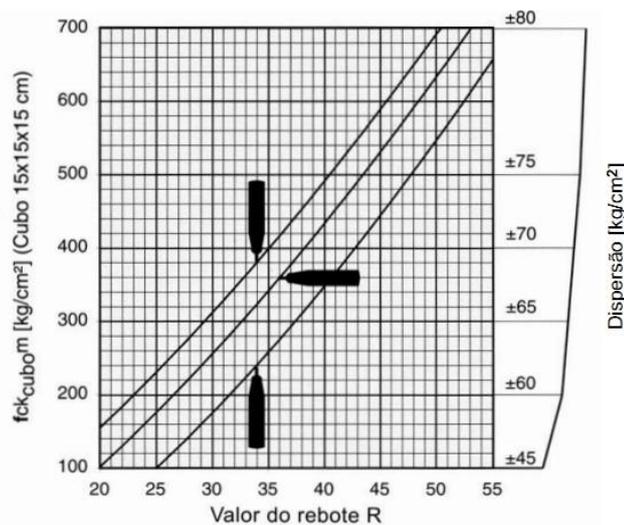
Superfícies úmidas de concreto apresentam índices esclerométricos menores que em superfícies secas, que pode ter uma redução de até 20% (BS 1881: Part 202-86).

- Posição do aparelho

Durante a execução do ensaio, o esclerômetro deve está posicionada a 90° da superfície ensaiada. Portanto, diferentes disposições de superfícies resultam em diferentes posições de aplicação do equipamento, o que interfere no índice esclerométrico, pois a gravidade influencia o sistema de massa do interior do aparelho.

São necessários fatores de correção que ajustem os índices de acordo com a posição de aplicação do equipamento. Os fatores de ajuste são fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. A Figura 3.4 apresenta a correlação fornecida pela empresa PROCEQ®, onde as curvas correlacionam o índice esclerométrico e a resistência para corpos de prova cúbicos com idades entre 14 e 56 dias, sendo cada uma delas para uma específica posição do esclerômetro.

Figura 3.4 -Correlação entre resistência à compressão e índice esclerométrico.



Fonte: PROCEQ®

### 3.1.3. Aplicações

O teste do concreto por meio da dureza superficial não é considerado um bom substituto para o de resistência à compressão axial. Esse é considerado um método auxiliar ou preliminar que fornece informações sobre a camada superficial do concreto (BS 1881: Part 202-86). Serão apresentadas aplicações úteis para este método.

- Verificar a Uniformidade do concreto

A aplicação mais confiável e importante do ensaio de dureza superficial é em situações onde não é necessário converter o índice esclerométrico em outras propriedades do concreto. Neste sentido, este pode ser utilizado no monitoramento de grandes áreas para análise comparativa, permitindo definir, através somente do índice, áreas de qualidades diferentes (NEPOMUCENO, 1999).

- Comparação do concreto com exigências específicas

Para estruturas produzidas a partir de processos repetitivos e com propriedades constantes, pode-se pré-determinar um índice esclerométrico e as propriedades em questão serem analisadas a partir deste valor. Segundo BS 1881: Part 202-86, estes valores podem ser estabelecidos com base em uma prova de carga ou experiências passadas. Esta aplicação pode ser bem utilizada em procedimentos de estruturas pré-moldadas, como no transporte das peças e na aplicação da protensão.

- Estimar aproximadamente a resistência

Esta aplicação do ensaio de dureza superficial é a que apresenta uma maior probabilidade de erro, pois é necessário converter o índice esclerométrico em resistência superficial. Portanto, as normas são claras quanto à utilização do esclerômetro como método auxiliar ou preliminar a outros ensaios. Deste modo, o índice esclerométrico deve ser correlacionado com a resistência à compressão obtida em ensaio.

- Avaliar a qualidade do revestimento

A qualidade de um revestimento pode ser avaliada segundo sua dureza. A dureza a abrasão é geralmente afetada pelos mesmos fatores que a dureza superficial, por isso o ensaio de esclerometria fornece informações sobre esta propriedade (BUNGEY; MILLARD, 2006).

## **3.2. Ensaio de Ultrassom**

O ensaio não destrutivo de ultrassom consiste na propagação de ondas mecânicas de alta frequência no concreto para a determinação indireta de suas propriedades.

Malhotra & Carino (2004) afirmam que o método do ultrassom é um método verdadeiramente não destrutivo, pois utiliza ondas mecânicas que não acarretam nenhum dano ao concreto analisado. Com isso, a amostra de concreto pode ser ensaiada no mesmo local indefinidamente, o que possibilita o monitoramento do concreto submetido a modificações internas durante um longo período de tempo.

Segundo a RILEM NDT1 (1972), o método do ultrassom tem como objetivo estabelecer o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson, a homogeneidade, a resistência à compressão, os defeitos do concreto ou as mudanças nas propriedades do concreto acarretadas pelo tempo como a corrosão, a deterioração, e outros fatores. O fácil manuseio do equipamento de ultrassom permite ao ensaio ser realizado em estruturas em uso, em canteiros de obra, em trabalhos de pesquisa e em fábricas de estruturas pré-moldadas.

O ensaio de ultrassom é regulamentado pela norma brasileira ABNT NBR 8802:2013, pela ASTM C597-09 e pela BS 1881: Part 203-86. Além disso, existem algumas recomendações técnicas para sua execução, como o RILEM NDT1 (1972).

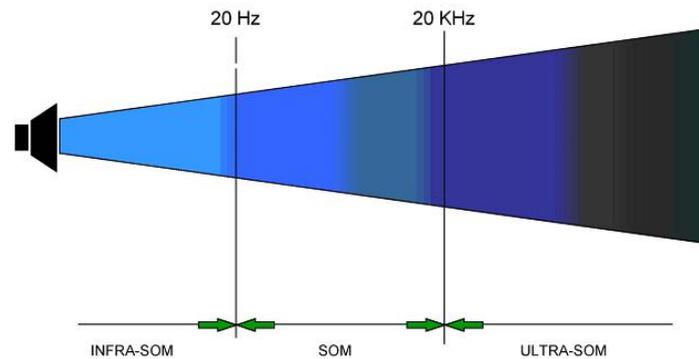
### **3.2.1. Princípio Físico**

O princípio físico que rege o ensaio de ultrassom é a propagação de ondas mecânicas, ou seja, que necessitam de um meio material para se propagarem. Para o aparelho auditivo humano, sons extremamente agudos ou graves são imperceptíveis, sendo suas frequências acima de 20 kHz (Ultrassom) e abaixo de 20 Hz (Infrassom), respectivamente. A Figura 3.5 abaixo apresenta o campo de audibilidade das ondas mecânica.

A velocidade de propagação pode ser definida como a distância percorrida por unidade de tempo; sendo um valor constante para cada meio, pois depende das características no material a qual esta percorrendo, não da frequência a qual percorre.

A norma BS1881: Part 203 (1986) e RILEM NDT1 (1972) afirmam que a velocidade de propagação do ultrassom é influenciada pelo módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson do concreto, propriedades que determinam a resistência mecânica do concreto.

Figura 3.5 – Campo de Audibilidade das ondas mecânicas



Fonte: ANDREUCCI (2011)

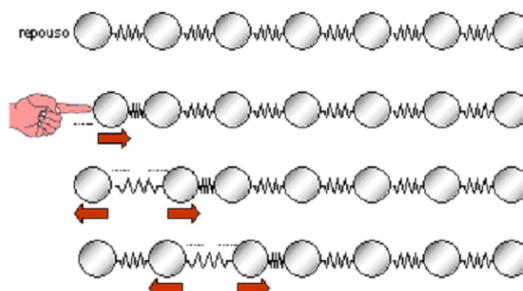
Segundo ACI 228.2R:1998, a velocidade de propagação da onda de tensão em um material elástico é função do módulo de elasticidade, do coeficiente de Poisson, da densidade e da geometria do sólido. Esta dependência permite analisar modificações dos materiais a partir da velocidade de propagação das ondas de tensão.

O ensaio de ultrassom é realizado através do uso de ondas mecânicas que são compostas por oscilações das partículas no meio que se propaga. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que o compõe executem movimentos oscilatórios em torno da posição de equilíbrio (ANDREUCCI, 2011).

Três tipos de propagação de ondas mecânicas são criados quando a superfície de um meio é perturbada de forma dinâmica ou por carga vibratória. Esses tipos são:

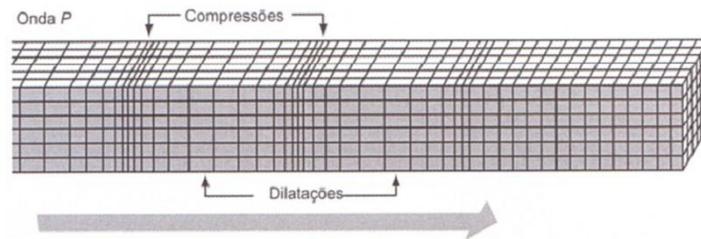
- a) Onda longitudinal, de compressão ou P: as partículas oscilam na direção paralela da onda. Ou seja, todo meio vibra na direção de propagação da onda, o que gera zonas de compressão e dilatação como apresentado na Figura 3.6 e Figura 3.7.

Figura 3.6 – Ilustração das ondas longitudinais.



Fonte: ANDREUCCI (2011)

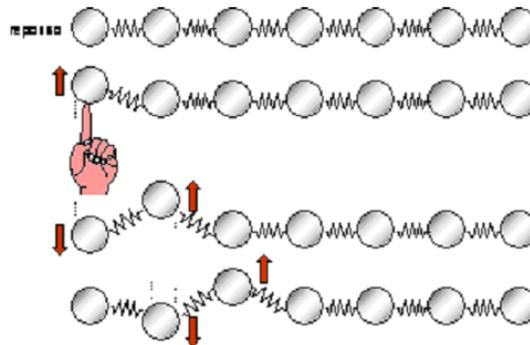
Figura 3.7– Zonas criadas pela propagação das ondas longitudinais.



Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014)

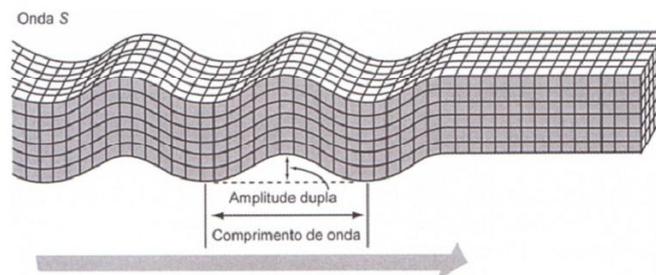
- b) Ondas transversais, de cisalhamento ou S são quando as partículas se movem perpendicularmente à direção de propagação das ondas. Neste tipo é possível observar que os planos das partículas se mantêm na mesma distância o que evidencia que o movimento das partículas ocorre somente na vertical. A Figura 3.8 e a Figura 3.9 apresentam esta movimentação.

Figura 3.8- Ilustração das ondas transversais.



Fonte: ANDREUCCI (2011)

Figura 3.9- Zonas criadas pela propagação das ondas transversais.

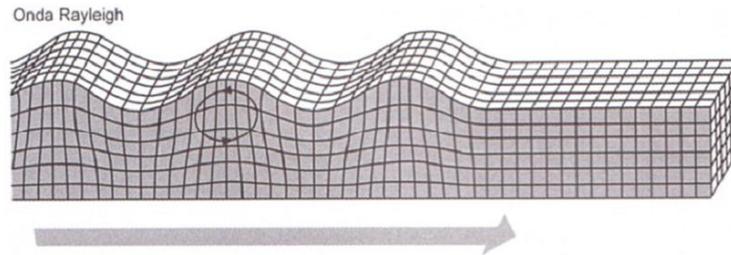


Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014)

- c) Ondas superficiais ou de Rayleigh se propagam na superfície dos sólidos (Figura 3.10). Como o movimento das partículas na superfície é complexo, a velocidade de propagação

dessas ondas é aproximadamente 10% inferior as ondas transversais (ANDREUCCI, 2011).

Figura 3.10- Zonas criadas pela propagação das ondas superficiais.



Fonte: MEHTA & MONTEIRO (2014)

A velocidade de propagação de ondas de compressão ou longitudinais,  $V$ , depende das propriedades elásticas e da densidade do meio. Esta pode ser calculada para um material isotrópico de acordo com a Equação 3.1 (ASTM C597-09):

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.1)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade dinâmico ( $\text{N/m}^2$ );  $\mu$  é coeficiente de Poisson dinâmico e  $\rho$  é a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

Segundo MALHOTRA & CARINO (2004), cada tipo de onda se propaga com uma velocidade característica diferente. Para o concreto, as ondas de cisalhamento e de superfície apresentam velocidades equivalentes a 60 e 55%, respectivamente, a velocidade de compressão.

No ensaio não destrutivo de ultrassom, as principais ondas capturadas pelos transdutores são as ondas de compressão, que apresentam uma velocidade de propagação mais intensa. Desta forma, define-se a velocidade de compressão  $V$  no ensaio como apresentado na Equação 3.2.

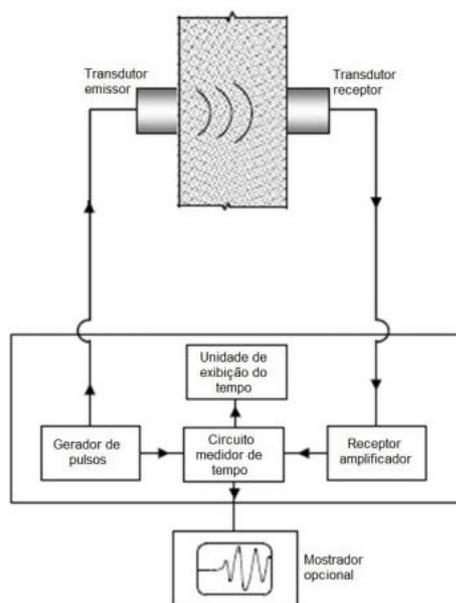
$$V = \frac{L}{t} \quad (3.2)$$

Sendo:  $L$  a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores e  $t$  o tempo decorrido da onda do transdutor emissor ao receptor.

### 3.2.2. Equipamento e Tipos de Medição

O aparelho de ultrassom é composto por um circuito gerador de pulsos, um circuito amplificador, um circuito de medição de tempo e uma tela que exibe o tempo medido. Seu funcionamento, de maneira simplificada, consiste no transdutor emissor transmitir uma onda e o transdutor receptor, que está a uma distância  $L$ , receber esse impulso através do concreto. O visor do aparelho indica o tempo que a onda longitudinal levou para percorrer o concreto (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Esquema do funcionamento do Ultrassom.



Fonte: Traduzido de MALHOTRA & CARINO (2004)

ABNT NBR 8802:2013 estabelece que a aparelhagem necessária para a realização de ensaio de ultrassom é composta por um circuito gerador-receptor, aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, com alta estabilidade e precisão de leitura de  $0,1\mu\text{s}$ ; um transdutor-emissor, responsável por transformar pulso elétrico em ondas de choque na faixa de 24 kHz a 500 kHz; um transdutor-receptor, responsável por receber as ondas de choque e transformá-las em pulso elétrico na amplitude adequada ao circuito gerador-receptor; um circuito medidor de tempo, utilizado para medir o tempo entre a emissão da onda e sua recepção; cabos coaxiais, utilizados para conectar os transdutores ao circuito gerador-receptor; e uma barra de referência, utilizada para aferir o equipamento ultrassônico, pois

grava a vibração do tempo de trânsito. A Figura 3.12 apresenta um exemplo do aparelho normatizado.

Figura 3.12 – Equipamento de Ultrassom



Fonte: MALHOTRA & CARINO (2004)

Os transdutores emissores são elementos responsáveis por introduzir as ondas de ultrassom no material. Os transdutores emissores e receptores transformam energia mecânica em elétrica e vice-versa. Esses fenômenos são chamados de efeito piezoelétrico e efeito piezoelétrico reverso. Andreucci (2011) explica que o efeito piezoelétrico ocorre quando se aplica pressão no cristal presente nos transdutores fazendo surgir cargas elétricas opostas na superfície no mesmo. No efeito reverso cargas elétricas são aplicadas na face do cristal, o que gera uma diferença de potencial entre elas fazendo o cristal se contrair. O efeito piezoelétrico e o reverso ocorrem no transdutor receptor e emissor, respectivamente.

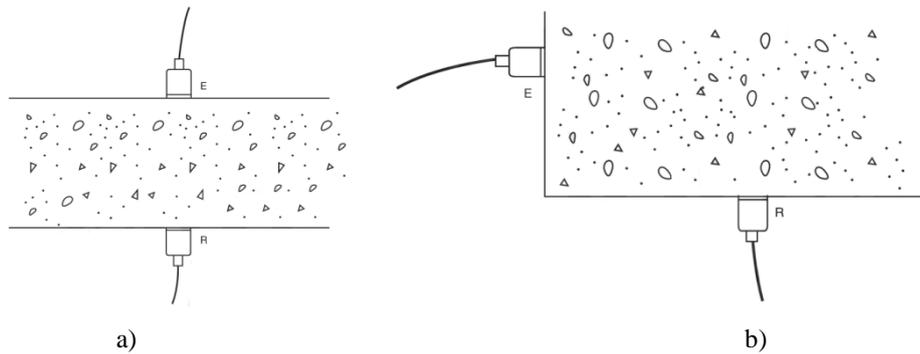
BS1881: Part 203-86 explica que os transdutores do equipamento de ultrassom captam os impulsos longitudinais, fazendo com que os transdutores capturem a energia máxima quando formam ângulo reto com a face. Contudo, é possível detectar impulsos que tenham percorrido qualquer direção no concreto.

Desta forma, a posição relativa entre os dois transdutores define os tipos de medição que podem ser transmissão direta, indireta ou semidireta.

Na transmissão direta os transdutores são posicionados em faces opostas, o que permite que as ondas sejam recebidas com mais intensidade (Figura 3.13a). Desta forma este arranjo é o mais utilizado para medir a velocidade de propagação da onda.

A transmissão semidireta somente deve ser usada quando não for possível o acesso as duas faces do corpo de prova ou elemento de concreto, ou quando a única face acessível não apresentar comprimento suficiente para a realização do ensaio indireto. O posicionamento dos transdutores para esse tipo de transmissão está apresentado na Figura 3.13b.

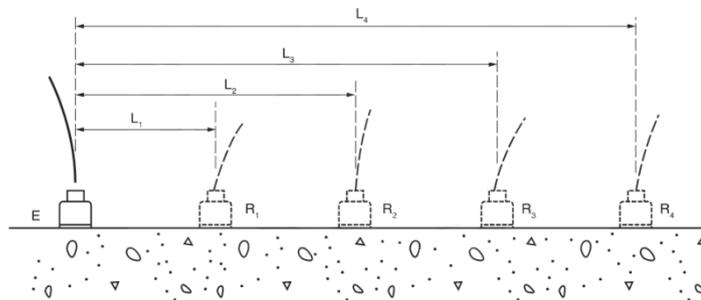
Figura 3.13– a) Transmissão direta; b) Transmissão semidireta



Fonte: ABNT NBR 8802:2013

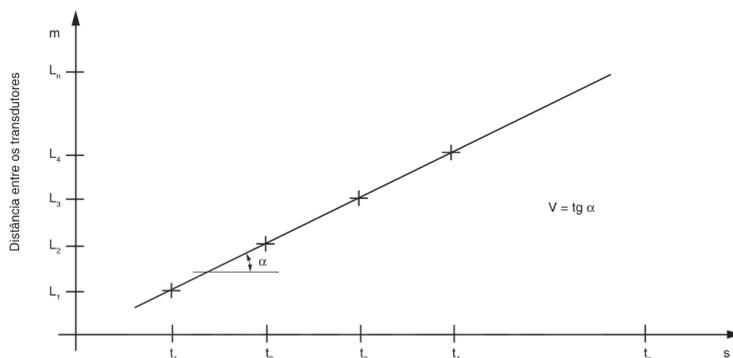
A transmissão indireta é o arranjo utilizado quando se tem acesso a somente uma das faces do elemento, mas esta face apresenta comprimento suficiente para propiciar o deslocamento do transdutor-receptor. Deve-se ter cuidado com o posicionamento dos transdutores para que o impulso transmitido seja detectado. Segundo ABNT NBR 8802:2013, para se determinar a velocidade de propagação das ondas é necessário fixar o transdutor-emissor em um ponto e fazer a leitura do tempo de propagação da onda posicionando o transdutor-receptor em pontos  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , equidistantes entre si sobre a mesma reta que o transdutor-emissor foi fixado (Figura 3.14). Após a coleta dos tempos, deve-se plotar um gráfico onde o eixo das abscissas corresponde aos tempos de propagação da onda e o eixo das ordenadas as distâncias entre o transdutor-emissor e as posições  $R_1, \dots, R_n$  do transdutor-receptor. A inclinação da reta corresponde à velocidade de propagação das ondas mecânicas (Figura 3.15).

Figura 3.14 – Transmissão indireta



Fonte: ABNT NBR 8802:2013

Figura 3.15– Gráfico para cálculo da velocidade de transmissão



Fonte: ABNT NBR 8802:2013

### 3.2.3. Fatores que influenciam a velocidade do ultrassom

Segundo a ABNT NBR 8802:2013, os principais fatores que influenciam nos resultados do ensaio são: distância entre as superfícies de contato dos transdutores; presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; densidade do concreto, que depende do traço e da concretagem; tipo e características do agregado; tipo de cimento e grau de hidratação; direção do ensaio da peça; tipo do adensamento do concreto e idade do concreto.

Os fatores que influenciam a velocidade do ultrassom podem ser divididos em dois grupos: os fatores ligados a propriedade do concreto e os fatores que não dependem das propriedades do concreto.

#### 3.2.3.1. Fatores Ligados as propriedades do concreto

- Relação água / cimento ( $a/c$ )

A velocidade do pulso ultrassônico no ar é menor do que no concreto. Tendo em vista que a relação  $a/c$  aumenta a porosidade do concreto, conseqüentemente irá diminuir a velocidade de propagação no mesmo.

- Agregados

A velocidade de propagação é afetada pelo tipo e quantidade de agregados graúdos no concreto, pois estes apresentam uma menor porosidade que a pasta de cimento. Ou seja, as ondas se propagam com uma maior velocidade nos agregados que na pasta. Portanto, o aumento da quantidade de agregados aumenta a velocidade de propagação da onda (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Idade do concreto

Malhotra & Carino (2004) compara o ganho de resistência ao longo do tempo com o efeito da idade sobre a velocidade de propagação, pois ambos apresentam um rápido crescimento nas primeiras idades e tem seu crescimento reduzido em idades mais avançadas. Isto é justificado a partir da hidratação do cimento, que reduz a porosidades do concreto e as ondas se propagam com uma maior velocidade no meio sólido.

Haach, Juliani & Da Roz (2015) apresentaram como uma tendência geral da correlação entre a resistência e o tempo a Equação 3.3.

$$y = A(1 - e^{-Bt})^c \quad (3.3)$$

onde  $y$  é a resistência à compressão ou módulo de elasticidade em MPa em uma hora qualquer,  $A$  é resistência à compressão ou módulo de elasticidade em MPa aos 28 dias,  $B$  e  $C$  são constantes definidas através da regressão e  $t$  o tempo em horas.

### 3.2.3.2. Fatores que não dependem das propriedades do concreto

- Teor de Umidade

ASTM C597: 2009 afirma que a umidade do concreto também influencia na velocidade das ondas, sendo a velocidade de propagação do pulso através do concreto saturado 5% maior que no concreto fresco. Isso ocorre, pois a velocidade de propagação ultrassônica é maior na água que no ar e o concreto saturado tem seus vazios preenchidos por água.

Segundo Bungey & Millard (2006), a influência da umidade será menor em concretos de alta resistência que em concretos de baixa.

- Temperatura do concreto

BS1881: Part 203-86 afirma que o concreto a uma temperatura entre 10°C e 30°C não afeta a velocidade das ondas ultrassônicas. A mesma norma define correlações para o concreto em temperatura fora deste intervalo, como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 3.1 -Correlação da velocidade em função da temperatura

Temperatura (°C)	Correlação (%)	
	Concreto Seco	Concreto Úmido
60	5	4
40	2	1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
Abaixo de -4	-1,5	-7,5

Fonte: BS 188:Part 203 (1986)

Segundo Bungey & Millard (2006), para temperaturas entre 5°C e 30°C, a influência na velocidade de propagação é inferior a  $\pm 1\%$ .

- Comprimento do percurso

A velocidade do pulso ultrassônico não é influenciada pelo comprimento do percurso, desde que tenha um comprimento mínimo suficiente para eliminar a interferência da heterogeneidade do concreto.

Teoricamente, à distância percorrida pela onda não afeta a velocidade. Contudo, na prática, distâncias menores apresentam uma maior variação e uma velocidade ligeiramente superior (MALHOTRA; CARINO, 2004).

A norma britânica BS1881: Part 203-86 recomenda que para comprimentos menores que 100 os agregados apresentem dimensões inferiores ou iguais a 20 mm; para menores que 150 mm, dimensões entre 20 e 40 mm. A norma também recomenda comprimentos mínimos de 150 e 400 mm para a transmissão direta e indireta, respectivamente.

- Tensão aplicada

Malhotra & Carino (2004) afirmam que as velocidades das ondas são afetadas pelo nível de tensão ao qual o concreto está submetido, pois dependendo do nível de tensão aplicada as microfissuras existentes no material podem aumentar ou acarretar o surgimento de novas o que reduz a velocidade ultrassônica.

Em níveis de tensão elevados é observada uma redução da velocidade de propagação no concreto devido à formação de microfissuras internas (BUNGEY; MILLARD, 2006).

Para Mehta & Monteiro (2008), aplicações a partir de 30% da tensão última de compressão acarretam o aumento de microfissuras existentes no concreto.

Através de ensaios que mediam o tempo de propagação da onda de cisalhamento presente no pulso ultrassônico, Schiavon (2015) comprovou que é possível estimar tensão em determinadas estruturas de concreto a partir do uso do ultrassom.

- Presença de armadura

A presença de armaduras deve ser evitada sempre que possível, pois o aço apresenta uma alta velocidade de propagação e possibilita falta de adensamento nas suas proximidades o que acarreta uma elevada incerteza.

Segundo Malhotra & Carino (2004), as leituras das velocidades realizadas em regiões próximas as armaduras são maiores, pois a velocidade das ondas no aço chega a ser 1,4 a 1,7 vezes maior que no concreto. Por isso, as leituras devem ser realizadas em regiões sem a presença de barras de aço. Caso isso não seja possível, existem fatores de correlação definidos pela BS1881: Part 203-86 que podem ser utilizados. Bungey & Millard (2006) afirma que estas relações podem apresentar uma precisão de  $\pm 30\%$  quando existir boa aderência e nenhuma fissuração no concreto na região de ensaio.

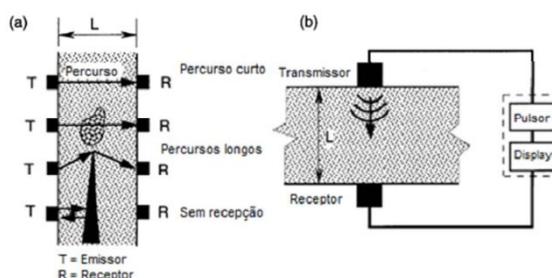
### 3.2.4. Aplicações

O ultrassom pode ser utilizado em aplicações tanto em laboratório como no local da obra com o mesmo sucesso. Este ensaio não destrutivo pode ser utilizado em uma gama de aplicações, o que torna impossível descrever todas elas. As principais aplicações serão descritas a seguir.

- Medição da Uniformidade do Concreto

Através do método de ultrassom é possível avaliar a uniformidade do concreto, pois a velocidade do pulso ultrassônico sofre modificações ao entrar em contato com alguma heterogeneidade do concreto. A heterogeneidade pode ser definida como variação na proporção da mistura, fissuras internas ou deterioração do concreto. Desta forma, é necessário que os ensaios ocorram em concretos com a mesma composição e propriedades. A obtenção de homogeneidade do concreto é exemplificada na figura abaixo.

Figura 3.16 – a) Consequência dos defeitos no tempo de percurso do pulso ultrassônico; b) Sistema de transmissão do pulso.



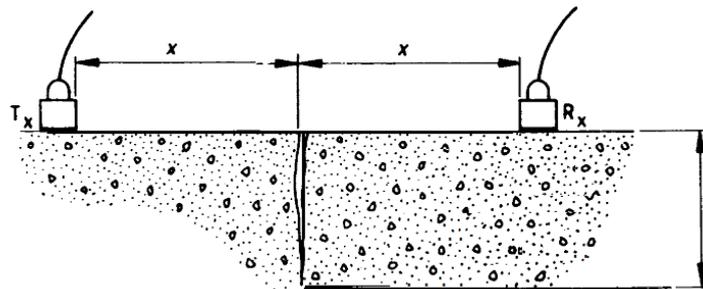
No primeiro percurso, apresentado na Figura 3.16a, o concreto não apresenta nenhuma heterogeneidade, o que possibilita o pulso percorrer o menor caminho, ou seja, o menor tempo e a velocidade mais rápida para a espessura da peça. Nos percursos subsequentes, o concreto apresenta modificações na sua estrutura e fissuração interna, o que modifica a velocidade e o tempo do percurso do pulso, chegando este ser interrompido na parte inferior da peça. Portanto, comparando estas velocidades de propagação da onda é possível determinar os locais onde ocorrem as heterogeneidades do concreto.

BS1881: Part 203-86 define que em casos que o comprimento de percurso é o mesmo para todas as medições, o tempo de medida pode ser usado para avaliar a uniformidade do concreto, sem necessidade de se converter para a velocidade. A determinação de pontos para a avaliação apropriada de um volume de concreto depende do tamanho da estrutura, da precisão requerida e da variabilidade do concreto.

- Determinação da profundidade de fissuras

Ao se deparar com uma fissura ou modificação no concreto, as ondas ultrassônicas tem sua velocidade do pulso alterada, pois esta tem que contornar as fissuras, como apresentado no item anterior. Uma estimativa da profundidade de uma fissura, que a posição é conhecida, pode ser obtida pela medição indireta colocando os transdutores na superfície do concreto de maneira equidistante da fissura, como apresentado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Esquema de medição da profundidade da fissura perpendicular a superfície.



Fonte: BS1881: Part 203 (1986)

Malhotra & Carino (2004) estimam a profundidade da fissura através da velocidade do pulso ultrassônico usando a Equação 3.4.

$$h = \frac{x}{T_2} \sqrt{T_1^2 - T_2^2} \quad (3.4)$$

Onde:  $X$  é a distância do transdutor para a fissura (os transdutores devem estar equidistantes);  $T_1$  é o tempo para percorrer em torno da fissura e  $T_2$  é o tempo para percorrer a mesma distância do mesmo concreto sem a fissura.

BS1881: Part 203 (1986) apresenta um método de cálculo diferente para a estimativa da profundidade. A norma sugere o cálculo de dois valores de tempo de percurso diferentes, com uma distância de 150 mm e 300m, e calcular a espessura por:

$$h = 150 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (3.5)$$

Sendo:  $t_1$  o tempo decorrido em 150 mm em  $\mu\text{m}$  e  $t_2$  o tempo decorrido em 300 mm em  $\mu\text{m}$ .

- Estimativa da resistência

O ensaio de ultrassom não é o método mais preciso para se determinar a resistência à compressão do concreto, contudo, para o mesmo traço de concreto apresenta estimativas admissíveis para a sua aplicação.

As normas ACI 228.1R-03 e BS1881: Part 203-86 e a RILEM NDT1(1972) apresentam recomendações técnicas para se obter as relações entre a velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão. As relações quantitativas com relação a este tema serão apresentadas posteriormente.

- Determinação de alterações nas propriedades do concreto

As alterações que ocorrem ao longo do tempo nas propriedades do concreto causadas pelo processo de hidratação, sobrecargas ou por efeitos ambientais podem ser determinadas pela medição repetida da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, sendo estas realizadas com os mesmos transdutores nas mesmas posições.

Mudanças nas medidas da velocidade são geralmente indicativos de modificações na resistência, estas podem ser acompanhadas através de medições na mesma peça durante um longo período. As medições de velocidade são úteis após o processo de endurecimento, especialmente nas primeiras 36 horas. Nesse período as mudanças são associadas a processos físico-químicos (BS1881: Part 203-86).

Segundo Nepomuceno (1999) ao se realizar leituras a cada determinado intervalo de tempo em um mesmo local da estrutura, as alterações da estrutura interna do concreto serão representadas pela velocidade de ondas captada. Nas primeiras idades, o aumento da velocidade pode ser atribuído à hidratação do cimento, o que ocasiona o aumento da resistência do concreto e, conseqüentemente, da velocidade. Caso ocorra a diminuição das

velocidades ao longo do tempo, pode estar ocorrendo uma deterioração na estrutura interna do concreto.

Desta forma, as velocidades de propagação podem ser úteis na desforma ou na aplicação de protensão em uma estrutura.

- Determinação do módulo de elasticidades dinâmico

Em materiais elásticos, a velocidade das ondas de compressão é definida pela constante elástica e densidade do material. A norma britânica BS1881: Part 203-86 define quantitativamente esta relação a partir da equação abaixo.

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3.6)$$

onde:  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico ( $MN/m^2$ ),  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\rho$  é a densidade ( $Kg/m^3$ ) e  $V$  é a velocidade ( $Km/s$ ).

### 3.2.5. Correlação entre velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão

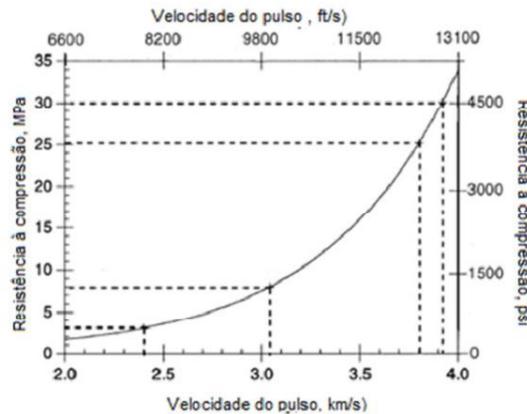
A relação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão é afetada por inúmeros fatores como o tipo de cimento; tipo, forma e dimensões dos agregados; tempo e tipo de cura e relação a/c (BS1881: Part 203-86).

ACI 228.1R:2003 define a partir dos princípios da propagação de ondas elásticas, que a velocidade de pulso ultrassônico é proporcional à raiz quadrada do módulo de elasticidade do concreto. Uma vez que o módulo de elasticidade e a resistência do concreto aumentam ao longo do tempo, resulta que a velocidade pode proporcionar um meio de estimar a resistência do concreto, mesmo que não haja nenhuma relação física direta entre estas duas propriedades. Esta relação entre resistência e velocidade é não linear porque a taxa de crescimento ao longo do tempo dessas duas propriedades é diferente. Logo após a concretagem, o módulo de elasticidade aumenta a uma taxa maior do que a resistência; com o tempo, o módulo de elasticidade tem seu aumento ocorrendo a um ritmo inferior. A Figura 3.18 apresenta um exemplo genérico da relação não-linear da resistência com a velocidade.

Para se definir a relação entre essas duas propriedades de maneira quantitativa, RILEM NDT1 (1972) apresenta duas propostas. A primeira através de um gráfico correlacionando resistência e velocidade dos pulsos ultrassônicos; e a segunda, através de equações analíticas.

Para o gráfico, recomenda-se que os agregados, aditivos, o tipo e a qualidade do cimento sejam os mesmos. Essa opção é a que apresenta resultados mais confiáveis.

Figura 3.18 – Gráfico genérico da relação velocidade do pulso de ultrassom e resistência à compressão



Fonte: ACI 228.1R:2003

RILEM NDT1 (1972) recomenda três equações analíticas para representar esta relação, que estão apresentadas a seguir.

$$R = av^b \quad (3.7)$$

$$R = ae^{bv} \quad (3.8)$$

$$R = av^2 + bv + c \quad (3.9)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constante,  $R$  resistência à compressão e  $v$  velocidade de pulso ultrassônico.

Bungey & Millard (2006) sugerem como tendência geral a solução analítica dada pela equação:

$$f_c = Ae^{Bv} \quad (3.10)$$

Sendo  $f_c$  o valor médio da resistência à compressão,  $v$  a velocidade média de propagação e  $A$  e  $B$  constantes.

Irrigaray, Pinto & Padaratz (2016) afirmam que é possível relacionar a resistência à compressão da pasta de cimento do concreto com a velocidade do pulso ultrassônico do mesmo a partir da equação:

$$y = ax^b \quad (3.11)$$

onde  $y$  é a resistência à compressão do concreto,  $x$  é a velocidade de pulso ultrassônico e  $a$  e  $b$  são constantes.

### 3.3. Métodos Combinados

Esta técnica consiste na utilização de outros ensaios não destrutivos para aumentar a confiabilidade do resultado da resistência do concreto obtida *in loco* por um único teste.

Para avaliar a vantagem de se utilizar uma técnica combinada, deve-se avaliar o grau de melhoria considerando a precisão e reprodutibilidade das leituras, em comparação ao tempo, custo e complexidade adicionais devido à combinação dos métodos e se é praticável realizar os testes adicionais no local.

Das várias combinações propostas por diferentes pesquisadores, apenas as técnicas combinadas baseadas na velocidade do pulso ultrassônico e na medida da dureza da superfície foram adotadas de maneira prática em algumas partes do mundo. Essa combinação foi utilizada para avaliar a resistência à compressão do concreto em diversos projetos como em edifícios de escritórios e hospitais (MALHOTRA; CARINO, 2004). O mais difundido, e que foi utilizado ao longo da pesquisa foi a combinação dos ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom, com o ensaio de resistência à compressão axial.

A combinação nos ensaios pode ser usada com o intuito de determinar a resistência à compressão do concreto *in situ* quando o concreto apresenta alguma deficiência de resistência, ou para analisar o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo. Atualmente, a qualidade do concreto na prática ainda é comumente descrita em termos de sua resistência à compressão uniaxial, avaliada estatisticamente a partir dos resultados de amostras de laboratório padrão, moldadas, compactadas, curadas e testadas em condições estritamente prescritas.

Os testes destrutivos podem ser influenciados por uma série de fatores, e estes devem ser levados em consideração quando as correlações são estabelecidas com os testes não destrutivos. O ensaio de esclerometria mede a resistência da superfície em função da resiliência, ou seja, da capacidade do martelo recuar. No ensaio de ultrassom a velocidade do pulso não é determinada diretamente, mas sim calculada a partir do tempo que o pulso leva para percorrer determinada distância. A interpretação das medidas da velocidade do pulso no concreto é complicada pela natureza heterogênea do material. Desta forma, as limitações dos testes combinados são resultado das limitações de cada ensaio isoladamente.

Diferentes pesquisadores obtiveram uma variedade de equações de correlação múltiplas lineares e não lineares. Em todos os casos, quando a não linearidade entre a velocidade do pulso (V) e a resistência (S) foi considerada, a precisão do método combinado foi aprimorada. Como mostrado na Tabela 3.2, onde S é a resistência do concreto, R é o índice esclerométrico e V é a velocidade do pulso ultrassônico.

Tabela 3.2 – Sugestões de regressão múltipla de diferentes pesquisadores para estimar a força à compressão do concreto a partir dos ensaios não destrutivos.

Pesquisadores	Equações de multipla regressão	Significado do efeito combinado
McLeod (1971) / Di Maio, et al. (1985) /Tanigawa, et al. (1984)	$S = k_0 + k_1 \times R + k_2 \times V$	Significativo em alguns casos, mas não em todos.
Knaze and Beno (1985)	$S = a_0 + a_1 \times R + a_2 \times R^2$ $S = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times V^2$	Usado em curvas de forças iguais, apresenta efeito significativo.
Bellander (1977)	$S = k_0 + k_1 \times R^3 + k_2 \times V$	Significativo em certo grau.
Weibinga(1968) / Shah (1982)/ Tanigawa, et al.(1984)	$\ln S = k_0 + k_1 \times R + k_2 \times V$	Significativo nas condições de ensaio.
Schickert (1984)	$S = k_0 \times R^n \times V^m$	Evidências de efeito significativo.
Samarin et al.(1981)	$S = k_0 + k_1 \times R + k_2 \times V^4$	Significativo.
Tanigawa et al.(1984)	$S = V \times (a_0 + a_1 \times R + a_2 \times R^2 + a_3 \times R^3)$	Significativo, mas muito complexo.

Fonte: Adaptado de Malhotra & Carino (2004).



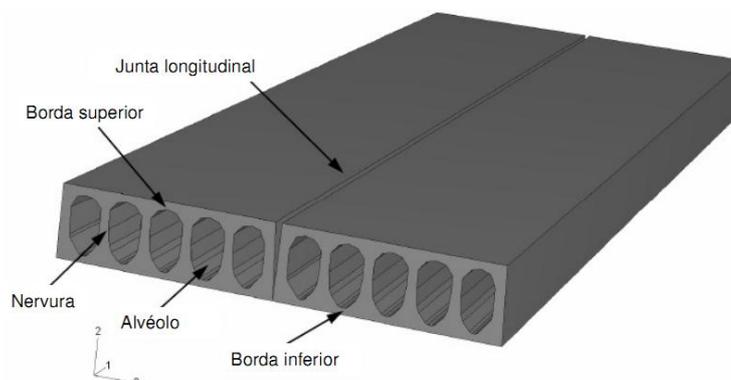
## 4. LAJES ALVEOLARES

Atualmente uma tecnologia utilizada para aumentar a praticidade e a economia na construção civil é a de estruturas pré-moldadas. A pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora do local de utilização definido (EL DEBS, 2000). Para Elliott (2002) a melhor definição para pré-moldados é a de um elemento de concreto que foi preparado para o molde, moldado e curado fora do seu destino final. A distância entre a produção e o destino final do pré-moldado varia de acordo com as condições de transporte da região. Em lugares onde o transporte apresenta um custo alto, esta é de alguns metros. Quando os elementos forem pré-fabricados e apresentarem baixo custo de transporte, a distância passa a ser de quilômetros.

Os elementos pré-moldados possuem um amplo campo de aplicação dentro da construção civil, como em edificações, construções pesadas, em construções urbanas, entre diversas outras áreas. Existem diversos tipos de elementos pré-moldados a fim de suprirem todas as funções para as quais a construção civil os necessita. Os mais comumente utilizados para lajes e paredes são os painéis alveolares, TT, U, e maciço; e para vigas e pilares são as seções retangulares, I, T invertido e seção quadrada vazada.

As lajes alveolares são um tipo especial de laje totalmente produzida de concreto com alvéolos ocios longitudinais e de tamanho necessário para criar as nervuras. As peças podem conter armadura longitudinal ativa (protensão) ou passiva, não sendo reforçada com armadura à força cortante. Desta forma, a resistência ao cisalhamento depende da resistência do concreto, tornando essencial o constante controle da qualidade do concreto (ASSAP, 2002).

Figura 4.1 – Laje alveolar.



Fonte: CATOIA (2011)

Segundo Petrucelli (2009), as lajes alveolares são constituídas de seção transversal de concreto com alvéolos que reduzem o peso próprio e, combinado com a protensão, são capazes de cobrir grandes vãos. Estes elementos são um dos mais modernos produtos na indústria de concreto pré-fabricado. A Figura 4.1 apresenta uma típica laje alveolar.

A ABNT NBR 14861:2011 define as lajes alveolares como um elemento de concreto produzido industrialmente fora do local da obra, sob rigoroso controle de qualidade.

#### **4.1. Produção das Lajes Alveolares**

As lajes alveolares são elementos altamente industrializados. Desta forma, possibilita uma maior padronização e racionalização do projeto resultando em uma maior economia no custo. Essa economia ocorre porque em um processo industrializado o consumo de mão-de-obra é baixo e a produção de elementos em um curto intervalo de tempo é alta. Se em um projeto for possível padronizar as dimensões das lajes de forma que todas sejam produzidas em uma única linha de produção, o custo da obra diminui significativamente.

De acordo com PCI (1998) os produtores das lajes alveolares possuem uma grande rede de suporte, pois a produção dos elementos é realizada através de diferentes sistemas patenteados. Desta forma, o mesmo produto pode receber diferentes nomenclaturas por conta do licenciamento local.

Os dois principais processos de fabricação das lajes são por fôrma deslizante ou por extrusão, sendo o segundo o mais utilizado. No primeiro processo, as lajes são produzidas a partir do deslizamento da fôrma, sendo várias camadas de concreto lançadas pela máquina e compactadas por vibradores em diferentes frequências. Na fabricação por fôrma deslizante, a concretagem ocorre em três fases até a finalização da laje (Figura 4.2). O concreto utilizado neste processo apresenta uma melhor trabalhabilidade que o concreto empregado no processo por extrusão.

No processo por extrusão o concreto é forçado pela máquina a produzir a seção final da laje alveolar em um único estágio. Ou seja, a máquina extrusora expulsa e comprime o concreto nas paredes do molde e forma os alvéolos pela compactação através de tubos helicoidais. O concreto utilizado é de baixo teor água/cimento, para garantir uma elevada resistência à compressão e baixa porosidade.

Figura 4.2 – Processo de fabricação das lajes alveolares por fôrma deslizante.



Fonte: Juliani (2014)

O processo de produção dos pré-moldados de fábrica pode ser dividido superficialmente em três fases: as atividades preliminares, como a preparação do material e o transporte do mesmo ao local de trabalho; a execução propriamente dita, onde ocorre a moldagem do elemento, etapa que posteriormente será detalhada para a laje alveolar; e as atividades posteriores, como o transporte interno da peça, os acabamentos e armazenamentos (EL DEBS ,2000).

De maneira geral, as etapas do processo de produção das lajes alveolares estão apresentadas nos próximos subtópicos.

#### **4.1.1. Preparação da pista**

O início de todo o processo ocorre com a limpeza da pista de produção que são constituídas de fôrmas metálicas com trilhos para apoiar as máquinas que se deslocam sobre eles, e cabeceiras de protensão, que pode ser ativa ou passiva. Segundo Mizumoto et al. (2013), as pistas possuem uma extensão que varia entre 120 a 260 metros de comprimento.

Antes da aplicação do desmoldante (Figura 4.3), deve-se realizar uma limpeza da fôrma de maneira que não apresente nenhum tipo de sujeira. A aplicação e o tipo de desmoldante utilizado interferem no resultado final, pois eles devem garantir que os painéis

saíam com a superfície inferior lisa e não deve manchar ou agredir o material. Caso as cordoalhas de protensão já estejam posicionadas na pista, deve-se protegê-las para não afetar a aderência entre o concreto e o aço (Figura 4.4).

Figura 4.3 – Aplicação do desmoldante.



Fonte: Petrucelli (2009)

Figura 4.4 – Proteção das cordoalhas na aplicação do desmoldante.



Fonte: Petrucelli (2009)

#### 4.1.2. Posicionamento dos cabos e protensão

A segunda etapa do processo é o posicionamento dos cabos de protensão conforme especificado no projeto. Os cabos são presos nas extremidades por cunhas. As cunhas onde ocorre a protensão e a ancoragem são chamadas de ativas e a da outra extremidade, cunha passiva.

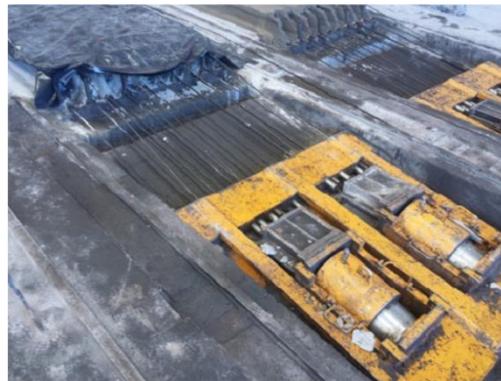
De acordo com Petrucelli (2009), usualmente, o macaco mais utilizado é o que protende os cabos um a um. Contudo, o ideal é que a aplicação da protensão em todo o conjunto ocorrer de uma única vez, pois a tensão aplicada no primeiro cabo alongado gera uma pequena deformação na cabeceira que afetará a deformação no segundo cabo, e assim sucessivamente. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a aplicação de protensão cabo a cabo e em todo o conjunto, respectivamente.

Figura 4.5 – Aplicação de protensão cabo a cabo.



Fonte: Petrucelli (2009)

Figura 4.6 - Aplicação de protensão do conjunto de cabos.



Fonte: Juliani (2014)

### 4.1.3. Preparo do concreto e produção das lajes

Os dois processos de fabricação das lajes alveolares trabalham com a técnica de vibrocompactação; contudo, o concreto tem propriedades diferentes de acordo com o tipo de máquina.

Na extrusora o concreto é expulso e comprimido nas paredes do molde pelo equipamento. Para esta máquina, é necessário um concreto seco com uma relação água/cimento (a/c) muito baixa de, aproximadamente, 0,3 a 0,4. Desta maneira, o concreto apresenta alta resistência que varia entre 50 e 75 MPa à compressão e resistência à tração de 4 a 7 MPa (PETRUCELLI,2009). No sistema de fôrmas deslizantes, os alvéolos são moldados a partir do deslizamento das fôrmas, sendo necessário um concreto com a relação a/c um pouco mais alta e, conseqüentemente, resistências mais baixas.

Usualmente as fábricas produzem seu próprio concreto que são lançados em caçambas e levados em pontes rolantes ou carrinhos transportadores até a máquina. O concreto é produzido por partes até a concretagem da pista ser completada. Por ser um processo simples, não exige muita mão de obra e é realizado rapidamente, sendo possível produzir até 500 m<sup>2</sup> de laje por dia (PETRUCELLI, 2009).

Mizumoto et al.(2013) destaca a atenção que deve ser empregada na uniformidade do traço para a obtenção de lajes alveolares de qualidade, pois o controle da água de consistência no traço impacta diretamente na geometria dos alvéolos e na aderência entre a cordoalha e o concreto.

#### 4.1.4. Marcação dos painéis, recorte dos elementos e cura do concreto

As marcações nas lajes são realizadas diretamente na pista de produção quando o concreto ainda está fresco, demarcando o comprimento e o nome da peça. Na maioria dos projetos de lajes alveolares são previstos recortes nas regiões de pilares e preenchimentos nos alvéolos para reforçar a estrutura contra cisalhamento, ambos os procedimentos são realizados com o concreto fresco ainda na pista de produção. A fim de direcionar a formação de fissura devido o grande volume que sofre retração, os funcionários devem ter em mãos, durante o processo de produção, o detalhamento das peças para que se faça o pré-corte na laje com as medidas do projeto (PETRUCELLI, 2009).

O processo de cura pode ser realizado através da cura térmica, da cura térmica a vapor ou da cura normal (apenas com emprego da lona). Os dois primeiros tipos de cura também requerem a utilização da lona para confinar o concreto e reduzir o efeito da retração.

O emprego da cura térmica e a vapor adiantam o ganho de resistência inicial, pois aceleram as reações de hidratação do cimento. Desta forma, antecipam o procedimento de alívio de protensão na pista, permitindo a redução do tempo de produção das lajes.

Figura 4.7 – Recorte no painel com concreto fresco.



Fonte: Petrucelli (2009)

Figura 4.8 – Cura com lona térmica.



Fonte: Petrucelli (2009)

#### 4.1.5. Liberação da protensão e corte das lajes

A liberação da protensão está vinculada ao controle de qualidade da resistência do concreto. Para isso, devem ser moldados corpos de prova e rompidos em determinadas horas para a obtenção da resistência  $f_{cj}$ . A ABNT NBR 14861:2011 recomenda uma resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias ou o especificado em projeto para lajes alveolares de concreto protendido. Esses valores de resistência devem ser respeitados, pois é muito

importante para que não haja escorregamento das cordoalhas e para que não se tenha problemas de tração na peça.

A maior dificuldade de se obter essa resistência está na confiabilidade dos resultados, pois as normas não englobam procedimentos de moldagem e rompimento de corpos de prova para o concreto seco com slump nulo ou próximo a esse valor. Uma alternativa a este procedimento é a extração de testemunhos na região das nervuras; mas, por possuírem pequenas dimensões os resultados apresentam uma disparidade que não condiz com a realidade (PETRUCELLI, 2009).

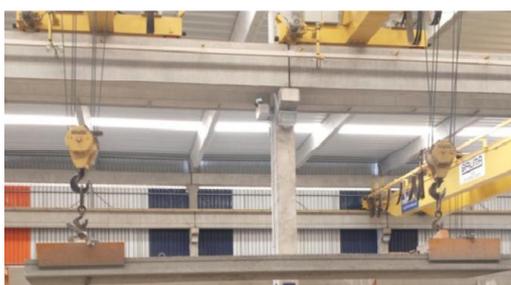
Após a liberação da protensão serão efetuados os cortes das lajes nas medidas definidas no projeto. Existem máquinas específicas que realizam os cortes longitudinais e transversais. Os cortes transversais são mais rápidos. Contudo, em alguns casos, onde os valores de protensão são mais altos e, por isso, apresentam contra-flechas maiores, pode ocorrer o travamento da serra. Para evitar este problema, Mizumoto et al. (2013) sugere que seja colocado um contra-peso de 50 KN na laje.

O corte longitudinal é um processo mais demorado para ser executado devido à grande extensão que a máquina deve percorrer para a realização do corte.

#### 4.1.6. Içamento e estocagem das peças

A retirada das peças da pista de produção é realizada por meio do sistema de garras (pinças de elevação) ou balancim presos a alça da ponte rolante, como mostrado na Figura 4.9. Mizumoto et al. (2013) afirma que na estocagem as peças são movimentadas por guindastes e cabos de aço que devem ser posicionados a uma distância inferior a 2 vezes a altura da peça da extremidade (Figuras 4.10 e 4.11).

Figura 4.9 – Içamento da peça por balancim.



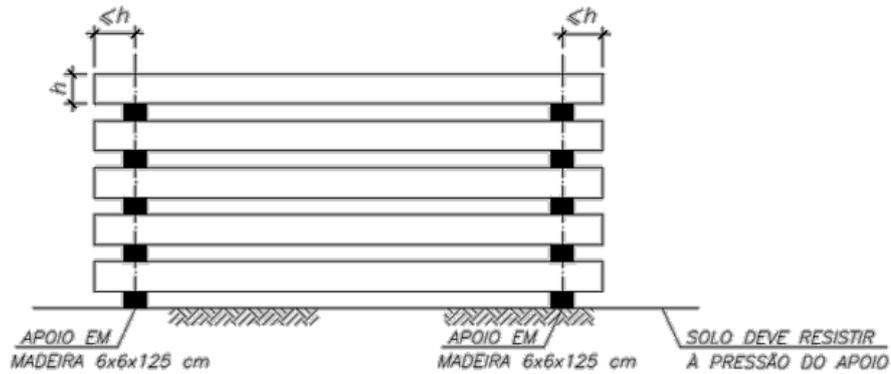
Fonte: Juliani (2014)

Figura 4.10 - Movimentação por meio de guindaste.



Fonte: Mizumoto et al (2013)

Figura 4.11 – Condições de armazenamento de laje.

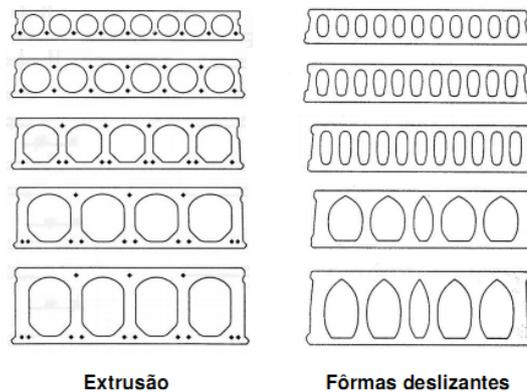


Fonte: Mizumoto et al. (2013)

## 4.2. Modelos de Seção Transversal

Por serem produzidas em indústrias, as lajes alveolares apresentam uma grande variação de seção, de altura e formato de alvéolos de acordo com o projeto a ser executado. Os alvéolos podem ter seções transversais de diferentes formas como oval, circular e retangular, entre outras. Esta variação de forma é definida pelo tipo de máquina usado na produção da peça, como apresentado na Figura 4.12. As faces laterais das seções transversais não são planas. Segundo Catoia (2011), os entalhes próximos ao topo nas laterais são chamados de chaves de cisalhamento e tem como função melhorar a interação entre as lajes alveolares quando essas são grauteadas. As saliências presentes na parte inferior das lajes servem para manter o graute entre as juntas durante o processo de moldagem.

Figura 4.12 – Tipos de seções transversais de lajes alveolares.



Extrusão

Fôrmas deslizantes

Fonte: CATOIA (2011)

### **4.3. Vantagens e Desvantagens**

As vantagens e desvantagens desta técnica são abordadas com o intuito de um maior conhecimento sobre a laje alveolar, pois a melhor técnica empregada em uma determinada obra depende das propostas do projeto.

De acordo com El Debs (2000), as principais vantagens de estruturas pré-moldadas são: a redução do cimbramento, emprego da protensão com armadura pré-tracionada, grande reutilização das fôrmas, maior controle de qualidade, maior produtividade da mão-de-obra e emprego de seções com um maior aproveitamento dos materiais. Catoia (2011) apresenta como vantagens o baixo custo na produção, a produção ser automatizada e mecanizada, ser uma técnica com bom isolamento acústico e térmico, apresentar um bom acabamento na face superior, além de poder ser utilizada em uma variedade de aplicações.

Para Petrucelli (2009) as principais vantagens desse sistema construtivo é a rapidez de execução e montagem, a qualidade do acabamento da superfície inferior, o que permite sua utilização sem a necessidade de acabamento. A protensão introduzida nestes elementos proporciona a redução na espessura da laje. Os alvéolos possibilitam a redução do peso da estrutura, permitem abrigar dutos para redes elétricas e hidráulicas, além de apresentarem ótimas propriedades térmicas e acústicas.

No entanto, esta técnica apresenta como inconvenientes o custo e a limitação no transporte, assim como a necessidade de promover a ligação entre os diversos elementos que compõem a estrutura (EL DEBS, 2000). Petrucelli (2009) também apresenta como desvantagens a necessidade de equipamentos especiais para produção e manuseio, a redução da resistência à força cortante devido à ausência de armadura transversal e a inflexibilidade das dimensões padrão.

### **4.4. Aplicações**

Como apresentado no item anterior, as estruturas pré-moldadas são utilizadas em diversas aplicações. Estas podem ser utilizadas como componentes do sistema de esqueleto, de pavimentos, paredes ou coberturas; como coberturas; em pontes; em galerias, canais, reservatórios e muros de arrimo; assim como em silos, estádios e arquibancadas. As principais aplicações das lajes alveolares são como sistema de piso e telhado (PCI, 1998).

As lajes alveolares, especificamente, podem ser empregadas como uma das soluções estruturais mais avançadas em sistema de pisos, podendo ser usada em construções pré-fabricadas, de madeira, metálica e de concreto moldado in loco (CATOIA, 2011).

## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os procedimentos, materiais e equipamentos utilizados para a realização de ensaios de ultrassom, esclerometria e resistência à compressão. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos e prismáticos e em uma laje alveolar.

### 5.1. Materiais Utilizados

A execução dos ensaios foi realizada em duas etapas separadamente. A primeira etapa consistiu na caracterização do concreto a partir de ensaios em corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Após o término desta etapa foram realizados os ensaios em uma laje alveolar produzida no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE- EESC), com o intuito de avaliar a influência dos alvéolos e da armadura nos resultados do ensaio de ultrassom.

A caracterização do concreto foi realizada utilizando três diferentes traços de concreto. Os traços de concretos foram baseados no artigo de Haach, Juliani & Da Roz (2015), sendo estes traços rico, médio e pobre em cimento. Para os ensaios, foi utilizada areia e brita de dimensões máximas de 2,4 mm e 12,7 mm, respectivamente, e o cimento de alta resistência inicial, o CP V- ARI. Os traços utilizados para os ensaios estão explicitados na tabela abaixo.

Tabela 5.1 – Valores dos materiais utilizados nos traços do concreto

Consumo de cimento	Materias (kg/m <sup>3</sup> )			
	Cimento	Areia	Brita	Água
Alto	484,6	630	1066,2	227,8
Médio	378,8	780,4	1113,8	227,3
Baixo	295	834,6	1141,5	224,2

Fonte: Autora (2017)

Para cada traço de concreto, foram moldados 11 corpos de prova prismáticos 15x15x50 cm<sup>3</sup>, sendo três deles para a execução do ensaio de ultrassom e oito para os ensaios de esclerometria. Para os ensaios de resistência à compressão foram moldados 48 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm<sup>2</sup>.

A segunda etapa de ensaios foi realizada somente com o traço rico em cimento, em virtude de apresentar um menor tempo de pega como será apresentado nos resultados. Nesta

etapa, foram moldados 48 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm<sup>2</sup>, para o ensaio de resistência à compressão, e uma laje alveolar de 10x50x200 cm<sup>3</sup>, com alvéolos de 5 cm de diâmetro.

## 5.2. Equipamentos

Os equipamentos utilizados estão de acordo com o que está especificado em cada norma regulamentadora. O ensaio de tempo de pega foi realizado com a agulha de Meynadier com anel dinamométrico (Figura 5.1). As agulhas do equipamento têm uma área de 645, 484, 323, 215, 161, 129, 65, 32 e 16mm<sup>2</sup>, como regulamentado na ABNT NBR NM 9:2003.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de esclerometria foi o esclerômetro manual da empresa Proceq® (Figura 5.2).

Figura 5.1 - Agulha de Meynadier utilizada no ensaio



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.2 -Esclerômetro manual usado no ensaio



Fonte: Autora (2017)

O ensaio de compressão foi realizado em uma prensa de compressão axial como determinado pela ABNT NBR NM 5739:2007. Os corpos de prova ensaiados não foram retificados, pois os ensaios foram realizados antes das 24 horas, sendo necessária a utilização de uma almofada de neoprene para planificar o topo e a base do corpo de prova (Figura 5.3). Em virtude das primeiras idades terem sido realizadas com a almofada de neoprene, os ensaios de 7 e 28 dias também utilizaram esta retificação para manter o padrão, mesmo sendo possível a retificação dos corpos de prova (Figura 5.4).

Para o ensaio de ultrassom, o equipamento utilizado foi o modelo PunditLab<sup>+</sup> da Proceq®, com dois transdutores de 54 KHz (Figura 5.5). **Erro! Fonte de referência não**

encontrada.). Com o intuito de produzir um acoplamento entre a superfície do concreto e os transdutores, foi empregado o gel de ultrassonografia. Para a coleta de dados foi utilizado o software Punditlink, desenvolvido pela mesma empresa.

Figura 5.3– Ensaio de compressão axial.



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.4– Neoprene usado no ensaio de compressão.



Fonte: Autora (2017)

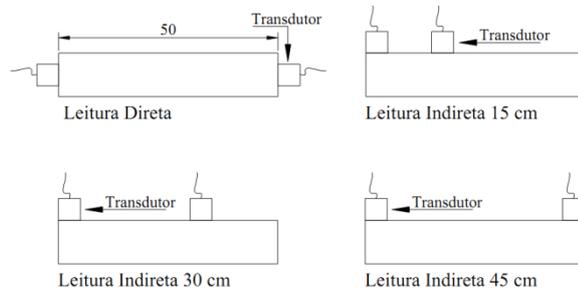
O ensaio de ultrassom foi realizado nos corpos de prova prismáticos por meio da transmissão direta, transdutores acoplados nas faces laterais a 50 cm de distância; transmissão indireta com os transdutores a 15 cm, a 30 cm e a 45 cm de distância, na mesma face superior, como representado na Figura 5.6. Todas as medições foram realizadas com os prismas de concreto ainda dentro das fôrmas.

Figura 5.5 - Equipamento de ultrassom utilizado



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.6 – Representação dos tipos de leitura



Fonte: Autora (2017)

### 5.3. Ensaio de caracterização do concreto

Esta primeira etapa de ensaios foi realizada com o intuito de coletar as principais características do concreto nas primeiras 24 horas e aos 7 e 28 dias. Estes foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Todos os resultados obtidos serão apresentados no capítulo subsequente.

Para cada traço ensaiado, foi realizada uma betonada com 260 litros de concreto, com o intuito de moldar os corpos de prova listados anteriormente.

O primeiro ensaio realizado foi o de tempo de pega, normatizado pela ABNT NBR NM 9:2003. Para a realização do ensaio, foram moldados 2 corpos de prova cilíndrico de 15 x 30 cm<sup>2</sup> até a altura de 15cm, dimensão mínima exigida pela norma (Figura 5.8). Durante a execução do ensaio, o concreto foi peneirado através de uma malha com a abertura de 4,75 mm com a ajuda da mesa vibratória (Figura 5.7). Após 3 a 4 horas de concretagem, foram iniciadas as medições sendo estas realizadas a cada 10 minutos até o concreto apresentar uma resistência à penetração superior a 27,6 MPa.

Figura 5.7 - Moldagem dos corpos de prova do ensaio de tempo de pega



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.8 – Corpos de prova do ensaio de tempo de pega



Fonte: Autora (2017)

Após o término do ensaio de tempo de pega, foram iniciados os outros testes. O monitoramento do concreto foi realizado nos horários apresentados na Tabela 5.2, sendo o ensaio de ultrassom executado a cada hora redonda, o de compressão a cada hora e 30 min e o

ensaio de esclerometria a cada hora e 45min aproximadamente; sendo necessária a tolerância com relação à execução dos ensaios.

Tabela 5.2 - Horário de realização das leituras

	Alto Consumo de cimento	Médio Consumo de cimento	Baixo Consumo de cimento
Horários das Leituras (tempo pós concretagem)	8h	-	-
	9h	-	9h
	-	10h	-
	11h	11h	11h
	12h	-	12h
	13h	13h	-
	14h	14h	14h
	15h	15h	15h
	16h	16h	16h
	17h	17h	17h
	18h	18h	18h
	-	19h	19h
	-	-	20h
	21h	-	-
	22h	22h	22h
	23h	23h	23h
	-	24h	24h
	7 dias	7 dias	7 dias
	28 dias	28dias	28 dias

Fonte: Autora (2017)

O primeiro ensaio realizado a cada hora era o do ultrassom com duração, em média, de 30 minutos. Em cada leitura foram emitidos cinco pulsos ultrassônicos, resultando em cinco tempos, com os quais foi realizada a média aritmética e, posteriormente, determinado o tempo de leitura. A partir da coleta do tempo, foi possível obter a velocidade do pulso ultrassônico. Este ensaio foi realizado em três corpos de prova distintos como apresentado na Figura 5.9. Para uma maior precisão com as distâncias das leituras indiretas foi utilizada uma haste auxiliar para posicionar os transmissores (Figura 5.10).

O ensaio de compressão axial é o mais tradicionalmente empregado para obter a resistência à compressão do concreto, sendo este normatizado pela ABNT NBR NM 5739:2007. Para este ensaio foram moldados três corpos de prova por idade monitorada. Os

corpos de prova foram deixados nas formas ao ar livre e desmoldados somente no instante de rompê-los por questão de logística da execução dos ensaios (Figura 5.11).

Figura 5.9- Leitura do ultrassom nos três corpos de prova



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.10 – Haste utilizada para auxiliar nas leituras indiretas



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.11 – Corpos de prova do ensaio a compressão

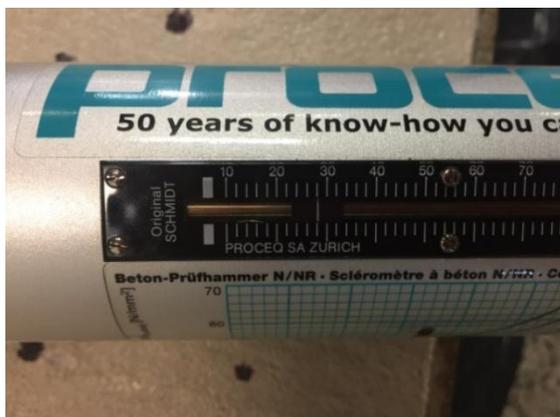


Fonte: Autora (2017)

O ensaio de esclerometria foi realizado de acordo com a norma regente ABNT NBR NM 7584:2013 em corpos de prova prismáticos. Para cada corpo de prova foram efetuadas duas leituras com 16 medições cada, como apresentado pela Figura 5.13. Antes do início das leituras, os pontos onde o esclerômetro deveria ser posicionado, em cada medição, eram marcados nos corpos de prova. Cada medição era coletada através de um registro fotográfico

para sua posterior análise, tendo em vista o curto espaço de tempo que o operador tinha para a realização de todos os ensaios. Um exemplo deste registro é a Figura 5.12.

Figura 5.12 – Registro da leitura do esclerômetro



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.13 – Marcação do corpo de prova do ensaio de esclerometria



Fonte: Autora (2017)

Para a correta execução de todas as etapas de ensaio, foi elaborada uma lista de procedimentos que o operador pode utilizar para se orientar com relação ao período de tempo de cada atividade. O modelo da lista sugerido está apresentada no Apêndice A.

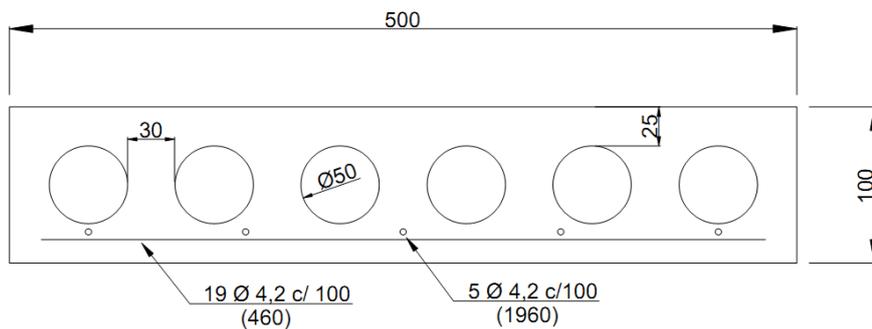
#### 5.4. Ensaio da laje alveolar

Com a finalização dos ensaios de caracterização do concreto, foi realizado o ensaio com uma laje alveolar. Nesta etapa, assim como na caracterização do concreto, os corpos de prova e a laje foram ensaiados nas primeiras 24 horas e aos 7 e 28 dias.

A laje alveolar foi produzida no próprio laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). A dimensão da laje produzida foi de 10 x 50 x 200 cm<sup>3</sup>, e seus alvéolos de 5 cm de diâmetro, como esquematizado na Figura 5.15.

Para a confecção da laje foi utilizada uma fôrma de madeira e seis tubos de PVC para moldar os alvéolos (Figura 5.14). Para o suporte da laje, foi posicionada na parte inferior uma tela de Ø 4,2 e 10 cm de espaçamento.

Figura 5.14 – Dimensões da laje alveolar produzida em laboratório



VISTA FRONTAL

UNIDADE: MM

Fonte: Autora (2017)

Figura 5.15 – Molde da laje alveolar



Fonte: Autora (2017)

Com o intuito de analisar a influência do aço na leitura do ultrassom, a laje foi projetada como duas partes de um metro de comprimento. Em uma das partes, foi adicionada uma armadura superior de  $4 \varnothing 6,3$  no sentido longitudinal da laje, com o objetivo de avaliar a influência de uma armadura qualquer nos resultados. Esta armadura foi calculada de acordo com a armadura mínima apresentada pela ABNT NBR 6118:2014 para uma laje maciça, considerando o concreto de 50 MPa (Figura 5.16). A concretagem da laje ocorreu de maneira padrão, sendo adicionado o concreto ao longo dos seus dois metros de comprimento e adensando o mesmo com a agulha vibratória (Figura 5.17).

Figura 5.16 – Armação da laje



Fonte: Autora (2017)

Após a concretagem da laje, os tubos de PVC que moldavam os alvéolos foram girados a cada 30 minutos para os mesmos não aderirem ao concreto e serem retirados com uma maior facilidade. Contudo, o concreto levantou os tubos de maneira que eles flexionaram, e mesmo utilizando uma empilhadeira para sua retirada, não foi possível extraí-los. Desta forma, como a permanência dos tubos não influenciaria nos ensaios, estes foram mantidos dentro da laje concretada. A Figura 5.18 apresenta a laje após a retirada da fôrma.

Figura 5.17 – Concretagem da laje



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.18 – Laje desmoldada



Fonte: Autora (2017)

O desmolde da laje ocorreu sete horas após a concretagem e o início das leituras, uma hora após o desmolde. Os horários das realizações das leituras estão apresentados na Tabela 5.3.

Cada lado da laje foi dividido em oito seções, três centrais de 10 cm para a realização do ensaio de ultrassom, e cinco seções de 14 cm nas extremidades para a esclerometria. Para o

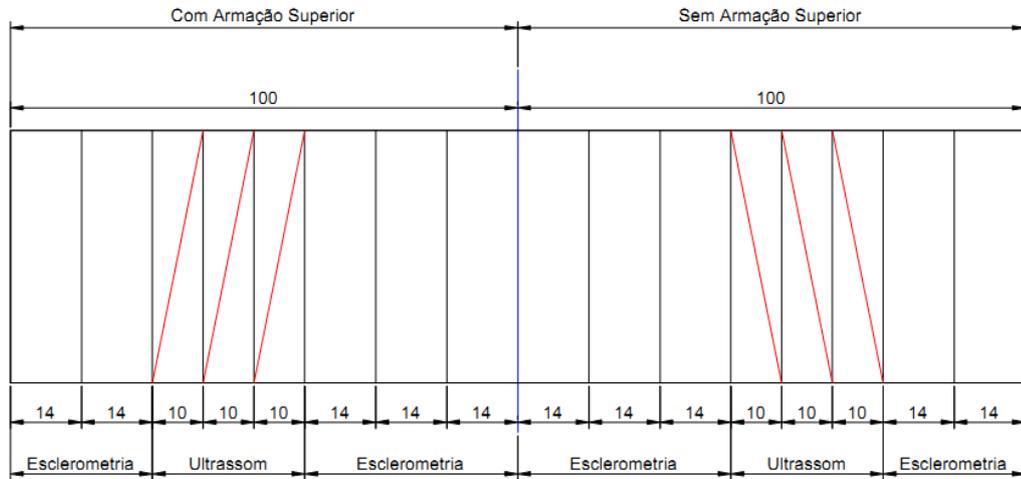
monitoramento dos resultados, os lados da laje foram nomeados como C, o qual possuía armadura superior, e S, o que não tinha armadura. As seções da laje utilizadas para o ensaio de ultrassom foram identificadas como  $U_i$  ( $i = 1, \dots, 3$ ), e as que serviram como corpo de prova para o ensaio de esclerometria foram numeradas de 1 a 5. Esta divisão está apresentada nas Figuras 5.19 e Figura 5.20.

Tabela 5.3 – Horário das leituras do ensaio com a laje alveolar

	Tempo após concretagem	Ensaio	
Leituras no ensaio da laje alveolar	8h	ensaio de ultrassom	
	9h	Compressão	
	9:15h	Esclerometria	
	10h	ensaio de ultrassom	
	11h	Compressão	
	11:15h	Esclerometria	
	13h	ensaio de ultrassom	
	14h	Compressão	
	14:15h	Esclerometria	
	15h	ensaio de ultrassom	
	16h	Compressão	
	16:15h	Esclerometria	
	17h	ensaio de ultrassom	
	18h	Compressão	
	18:15h	Esclerometria	
	19h	ensaio de ultrassom	
	20h	Compressão	
	20:15h	Esclerometria	
	22h	ensaio de ultrassom	
	23h	Compressão	
	23:15h	Esclerometria	
	24h	ensaio de ultrassom	
	25h	Compressão	
	25:15h	esclerometria	
	7 dias		ensaio de ultrassom
			compressão
			esclerometria
	28 dias		ensaio de ultrassom
		compressão	
		esclerometria	

Fonte: Autora (2017)

Figura 5.19 – Representação da divisão da laje



VISTA SUPERIOR DA LAJE  
UNIDADE: CM

Fonte: Autora (2017)

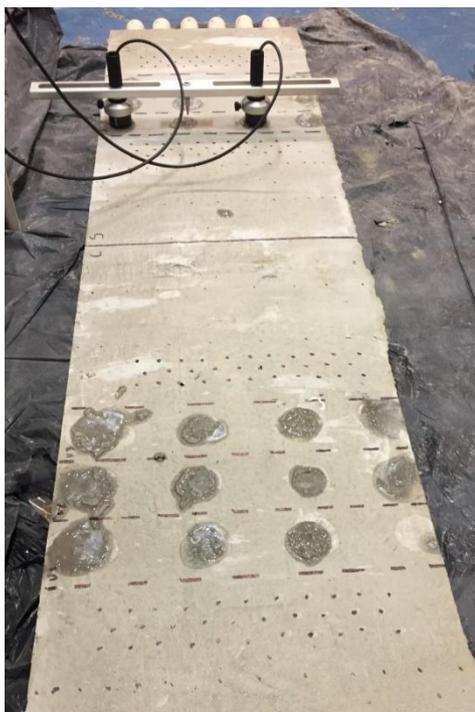
Figura 5.20 – Laje com as primeiras marcações



Fonte: Autora (2017)

O ensaio de ultrassom foi o primeiro ensaio a ser realizado ao longo dos horários. As leituras foram iniciadas em um dos corpos de prova cilíndricos, que posteriormente seriam ensaiados a compressão. As medições na laje foram orientadas sempre na mesma ordem, primeiro era feito um tipo de transmissão no lado com armadura, e em seguida a mesma transmissão no lado sem armadura. As leituras foram ordenadas em direta, indireta de 15 cm, de 30 cm e de 45 cm. A Figura 5.21 exemplifica uma leitura de transmissão indireta de 30 cm no lado sem armadura.

Figura 5.21 – Leitura indireta do ensaio de ultrassom na laje



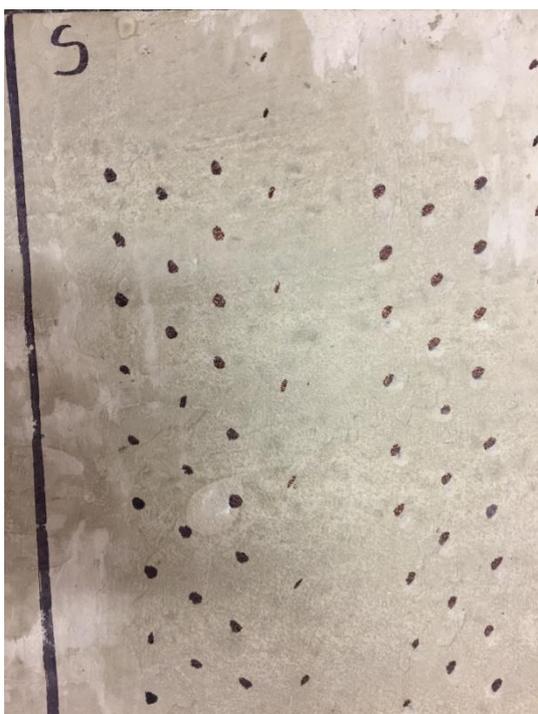
Fonte: Autora (2017)

O ensaio de compressão ocorreu da mesma forma como descrito para os ensaios de caracterização do concreto. Em cada hora foram ensaiados três corpos de prova distintos, sendo o primeiro deles ensaiado com o ultrassom anteriormente.

Para o ensaio de esclerometria, as leituras também foram ordenadas primeiramente no lado com armadura e, posteriormente, no lado sem armadura. A laje foi marcada de maneira a formar seções de 15 cm de largura, o que reproduziu o equivalente a cinco corpos de prova para cada lado. Em cada horário de leitura eram realizadas 16 medições, sendo possível realizar duas leituras em cada corpo de prova definido na laje. A Figura 5.22 mostra duas seções sem armadura onde se realizaram quatro leituras.

Para este ensaio, as 16 medições foram realizadas sem discriminação se ocorriam na alma ou em cima do alvéolo da laje. Contudo, as leituras eram identificadas através de registro fotográfico, para uma posterior análise da influência nos resultados. Na região onde ocorreu a flexão do tubo de PVC, a capa do alvéolo ficou fina e sem resistência superficial, o que fez com que não fosse possível a real resistência do material nesta região, pois o mesmo se despedaçou (Figura 5.23). As medições nestes pontos foram ignoradas nos resultados.

Figura 5.22 - Seção de leitura da esclerometria



Fonte: Autora (2017)

Figura 5.23 - Região do tubo flambado



Fonte: Autora (2017)

Para uma melhor orientação de todos os ensaios pelo operador, foi desenvolvida uma lista de procedimentos que será apresentada no Apêndice B. Esta tem como objetivo orientar o operador sobre a ordem da execução dos ensaios, sendo admissíveis alterações quanto aos horários de leitura.

Todos os dados coletados e os gráficos gerados a partir dos ensaios estão apresentados no capítulo 6.

### 5.5. Considerações Finais

Durante a realização de ensaios em laboratório, diversas dificuldades são encontradas ao longo do processo de execução, nos ensaios apresentados isto não foi exceção.

O principal problema ao longo dos ensaios foi o curto intervalo de tempo para cada atividade, que desgastava o operador aumentando o risco de erro.

As dificuldades encontradas nas duas etapas de ensaio foram diferentes. Para caracterização do concreto, o maior problema foi a fôrma metálica que era difícil de ser retirada e sua presença interferia nos resultados do ultrassom. Além disso, por questões de logística, as leituras dos ensaios só foram realizadas após o final da pega. Cada ciclo de procedimentos de ensaio tinha uma duração de 50 minutos, aproximadamente.

Para a etapa da análise na laje alveolar, a maior dificuldade obtida foi com a retirada dos tubos de PVC que moldavam os alvéolos, sendo necessário mantê-los na laje. Nesta segunda etapa, o operador sofreu um desgaste ainda maior porque cada ciclo de procedimento dos três ensaios durava em média 1h50min.

Portanto, todos os procedimentos desenvolvidos na pesquisa foram necessários, mas com grandes dificuldades de serem executados.

## 6. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da execução dos ensaios expostos no capítulo anterior. A exibição dos resultados será dividida em três tópicos. O primeiro tópico relata os resultados obtidos nos ensaios com os corpos de prova, posteriormente serão apresentados os dados coletados com o ensaio da laje. Para, por fim, realizar-se a correlação entre ambos.

### 6.1. Ensaios nos corpos de prova de diferentes traços

#### 6.1.1. Ensaio de tempo de pega

O ensaio de tempo de pega foi realizado com o objetivo de examinar a correlação entre o tempo de pega e a velocidade do pulso ultrassônico do concreto, de forma a se determinar o final da pega com o auxílio do ensaio não destrutivo de ultrassom. Para o ensaio de tempo de pega, a ABNT NBR NM 9:2003 define dois métodos a fim de se obter a idade do início e do final da pega, o método analítico e gráfico. O método analítico apresentado na norma consiste na determinação, pelo método dos mínimos quadrados, dos coeficientes  $a_0$  e  $a_1$  da equação:

$$\log(r_p) = a_0 + a_1 \log(t) \quad (6.1)$$

onde:  $r_p$  é a resistência a penetração em MPa e  $t$  é o tempo em minutos; ambos obtidos experimentalmente.

A utilização deste método é permitida caso o coeficiente de correlação calculado para a regressão seja maior ou igual a 0,98. Para os dados obtidos nos ensaios, a regressão, a partir da Equação 6.1, sugerida pela norma, apresentou um coeficiente de correlação inferior a 0,98 para um dos ensaios realizados, como demonstrado na Figura 6.1. Os valores de tempo calculados a partir deste método estão na Tabela 6.1. Desta forma, a obtenção dos tempos de pega foi verificada através do método gráfico.

A norma supracitada define que para o método gráfico deve-se plotar os pontos com o tempo decorrido em minutos, no eixo das abscissas, e a resistência a penetração em MPa, nas ordenadas. A idade do início do tempo de pega é definida como a idade que a resistência apresenta o valor de 3,5 MPa e o final quando a resistência obtida seja de 27,6 MPa. Os

gráficos executados de tal maneira estão apresentados na Figura 6.2 e os tempos obtidos na Tabela 6.2.

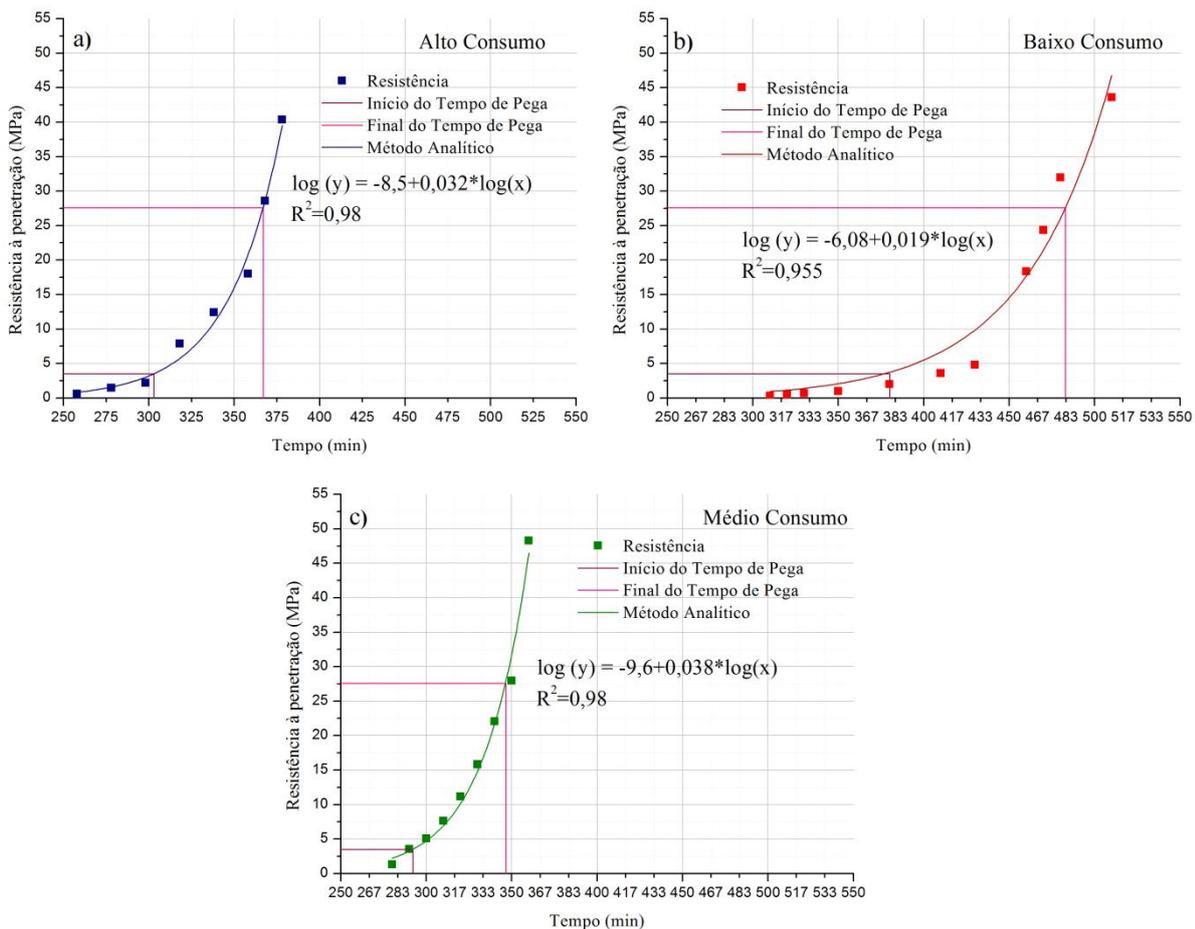
Tabela 6.1 - Tabela com as idades dos tempos de pega em minutos obtidos pelo método analítico.

Consumo de cimento	Início da Pega (min)	Final da Pega (min)
Alto	304,77	369,31
Baixo	382,09	483,78
Médio	292,18	346,52

Fonte: Autora (2017)

Figura 6.1 - Gráficos obtidos de acordo com o especificado na ABNT NBR NM 9:2003 para o método analítico:

- a) Concreto com alto consumo de cimento, b) concreto com baixo consumo de cimento, c) concreto com consumo de cimento médio.



Fonte: Autora (2017)

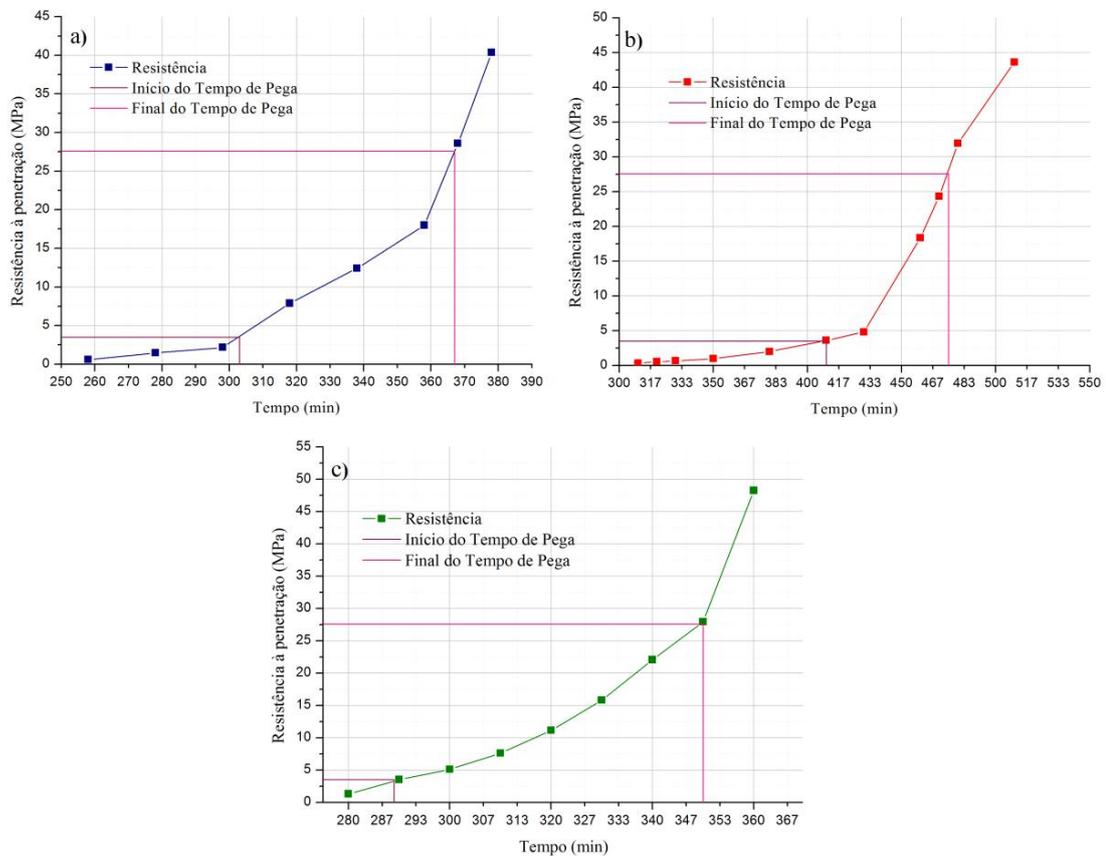
Tabela 6.2 - Tabela com as idades dos tempos de pega obtidos em minutos pelo método gráfico.

Consumo de cimento	Início da Pega (min)	Final da Pega (min)
Alto	303	367
Baixo	410	475
Médio	289	350

Fonte: Autora (2017)

Figura 6.2 - Gráficos obtidos de acordo com o especificado na ABNT NBR NM 9:2003 para o método gráfico:

a) Concreto com alto consumo de cimento, b) concreto com baixo consumo de cimento, c) concreto com consumo de cimento médio.



Fonte: Autora (2017)

Sabendo-se que o método gráfico é impreciso quanto à exatidão das leituras das idades do início e final do tempo de pega, utilizou-se como solução alternativa um método analítico a partir de uma regressão exponencial. A equação empregada na regressão foi apresentada por Haach, Juliani & Da Roz (2015) como uma solução representativa da correlação entre a resistência à compressão e o tempo (Equação 6.2). Para a análise da aplicabilidade desta equação em outros tipos de resistência do concreto, será feita uma extrapolação da proposta sugerida pelo autor e a Equação 6.2 será utilizada para relacionar a resistência à penetração e o tempo.

$$y = A(1 - e^{-Bt})^c \quad (6.2)$$

onde  $y$  é a resistência à compressão em MPa em um tempo qualquer,  $A$  é a resistência à compressão em MPa aos 28 dias,  $B$  e  $C$  são constantes definidas através da regressão e  $t$  o tempo em horas.

A Equação 6.2 foi utilizada na regressão dos gráficos plotados da mesma maneira que o método gráfico e considerando o tempo em minutos. A partir dos coeficientes obtidos para a equação, determinou-se a idade do início da pega e o final do tempo de pega. Os gráficos e as equações obtidas estão apresentados na Figura 6.3 e as idades determinadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 -Tabela com as idades dos tempos de pega obtidos pela regressão exponencial da Equação 6.2.

Consumo de cimento	Início da Pega (min)	Final da Pega (min)
Alto	306,65	366,71
Baixo	422,55	475,23
Médio	295,39	345,65

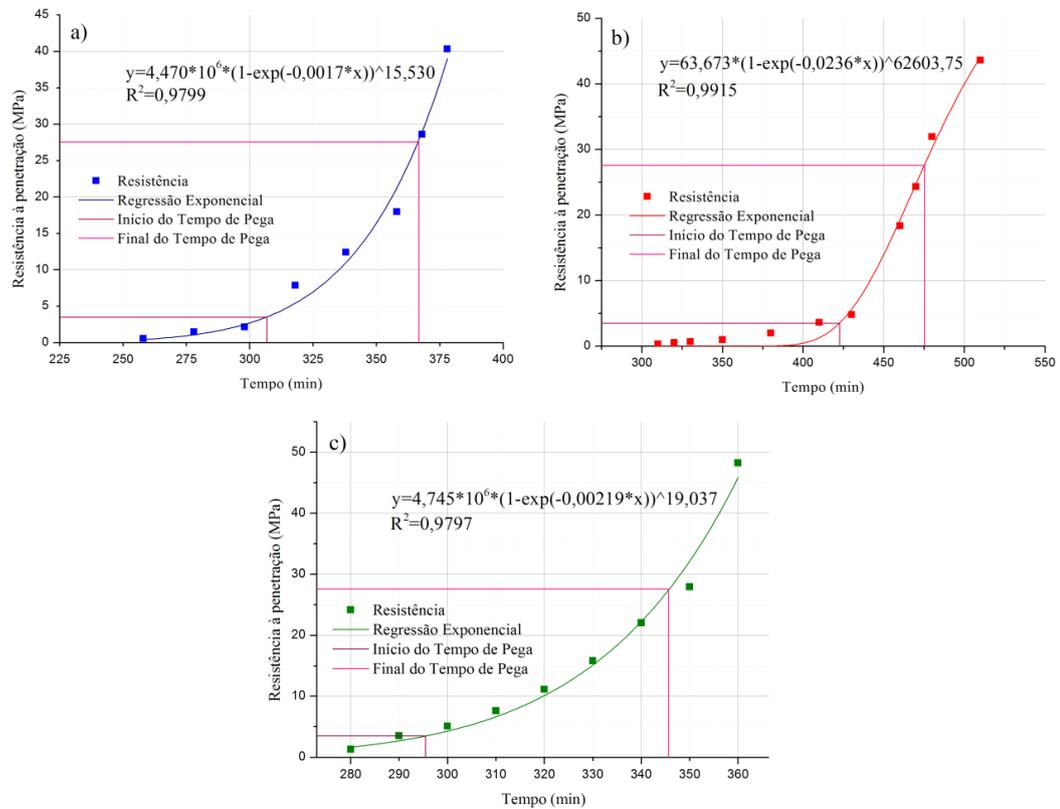
Fonte: Autora (2017)

A Tabela 6.4 apresenta a diferença percentual entre os três métodos utilizados para a obtenção do tempo de pega; os métodos, analítico e gráfico, sugeridos pela norma e o método analítico indicado neste trabalho. O ensaio que apresentou a maior diferença entre os métodos utilizados foi o ensaio com baixo consumo de cimento, chegando a 9,4% de diferença entre os ensaios analíticos utilizados. E a menor diferença encontrada foi no ensaio com maior consumo de cimento entre os métodos sugeridos pela norma.

Portanto, comparando-se as porcentagens obtidas pelo método gráfico e analítico através da regressão exponencial com a Equação 6.2, é possível afirmar que a Equação 6.1, sugerida pela norma, pode ser substituída por outra equação que apresente um coeficiente de correlação superior ou igual a 0,98 para se obter valores semelhantes ao método gráfico de maneira mais precisa.

No tópico 6.1.4 será apresentada a relação entre o tempo de pega e a velocidade do pulso ultrassônico.

Figura 6.3 – Gráficos plotados com os dados de ensaio e equações obtidas por regressão exponencial. a) Concreto com alto consumo de cimento, b) concreto com baixo consumo de cimento, c) concreto com médioconsumo de cimento.



Fonte: Autora (2017)

Tabela 6.4 – Comparação da diferença percentual dos resultados das análise de dados do ensaio de tempo de pega.

Consumo de Cimento	Comparações	Percentual da Diferença dos resultados
Alto	Analítico - Gráfico	0,63
	Gráfico - Exponencial	1,2
	Analítico - Exponencial	0,71
Baixo	Analítico - Gráfico	6,19
	Gráfico - Exponencial	3,06
	Analítico - Exponencial	9,44
Médio	Analítico - Gráfico	1,1
	Gráfico - Exponencial	2,21
	Analítico - Exponencial	1,09

Fonte: Autora (2017)

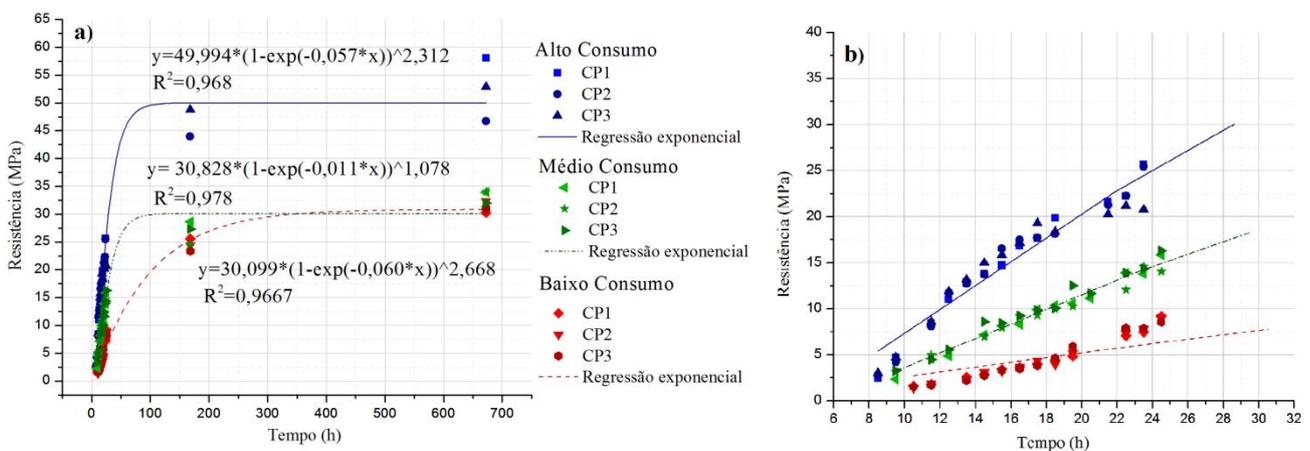
### 6.1.2. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram iniciados após o final do tempo de pega, pois o concreto já havia iniciado o ganho de resistência do material. Nos ensaios de compressão foi possível analisar o crescimento da resistência de maneira detalhada nas primeiras 24h a partir de todos os corpos de prova ensaiados ao longo da idade, ou seja, três corpos de prova por idade ensaiada, resultando um total de 45 corpos de prova para o traço de alto e médio consumo de cimento e 42 para o traço com baixo consumo.

A melhor equação que representou a curva de resistência por tempo foi obtida pela regressão exponencial definida pela Equação 6.2 supracitada. Esta equação já havia sido sugerida como uma função representativa da correlação entre a resistência e o tempo por Haach, Juliani & Da Roz (2015).

Para cada traço de concreto ensaiado foi gerada uma equação do tipo da Equação 6.2, como apresentado na Figura 6.4a. O ensaio que utilizou o concreto com alto consumo de cimento apresentou um crescimento mais acentuado, resultando em uma maior resistência aos 28 dias, como era o esperado de acordo com a literatura. O concreto com baixo consumo de cimento apresentou a menor taxa de crescimento inicial; contudo seu  $f_{ck}$  apresentou um resultado equivalente ao do ensaio que utilizou um concreto com consumo médio de cimento. Isto ocorreu em virtude de que os três corpos de prova ensaiados aos 28 dias do concreto com consumo médio de cimento foram retirados das suas fôrmas prematuramente e colocados na câmara úmida antes de serem ensaiados, interferindo, desta forma, no resultado.

Figura 6.4 – a) Gráfico dos resultados do ensaio de compressão; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Ao analisar os dados das primeiras 24 horas isoladamente, fica claro que as taxas de crescimento iniciais são bem representadas pela Equação 6.2. Assim como o aumento da velocidade de ganho de resistência com o aumento do consumo de cimento (Figura 6.4b).

A ABNT NBR 6118:2014 define que a evolução da resistência a compressão com a idade deve ser obtida através de ensaios e orienta que na ausência desses seja adotada a Equação 6.3.

$$f_{cd} = \beta_1 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (6.3)$$

sendo  $\beta_1$  é 1 para idades iguais ou superiores aos 28 dias. Para idades inferiores aos 28 dias  $\beta_1$  é determinado através da Equação 6.4.

$$\beta_1 = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \quad (6.4)$$

sendo: s constante definida de acordo com o tipo de cimento e t a idade efetiva do concreto em dias.

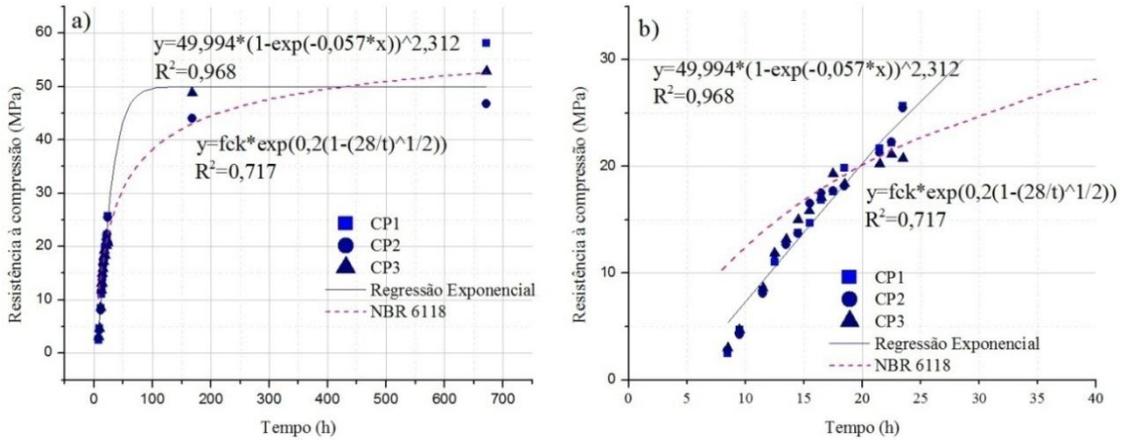
A fim de realizar uma comparação com a orientação da norma, adotou-se a equação apresentada pela ABNT NBR 6118:2014 (Equação 6.3). Para tal, definiu-se o valor do  $f_{ck}$  como as resistências característica aos 28 dias obtidas no ensaio, como determinado pela ABNT NBR NM 12655:2015, s igual a 0,2, como determinado na norma para o cimento CPV-ARI; e  $\gamma_c$  igual a 1,0 para valores de ensaio. Desta forma, a equação resultante apresentada nos gráficos foi:

$$f_{cd} = \exp\{0,2[1 - (28/t)^{1/2}]\} \frac{f_{ck}}{1,0} \quad (6.5)$$

Os gráficos de resistência à compressão pelo tempo que foram elaborados estão apresentados nas Figuras 6.5 a 6.7.

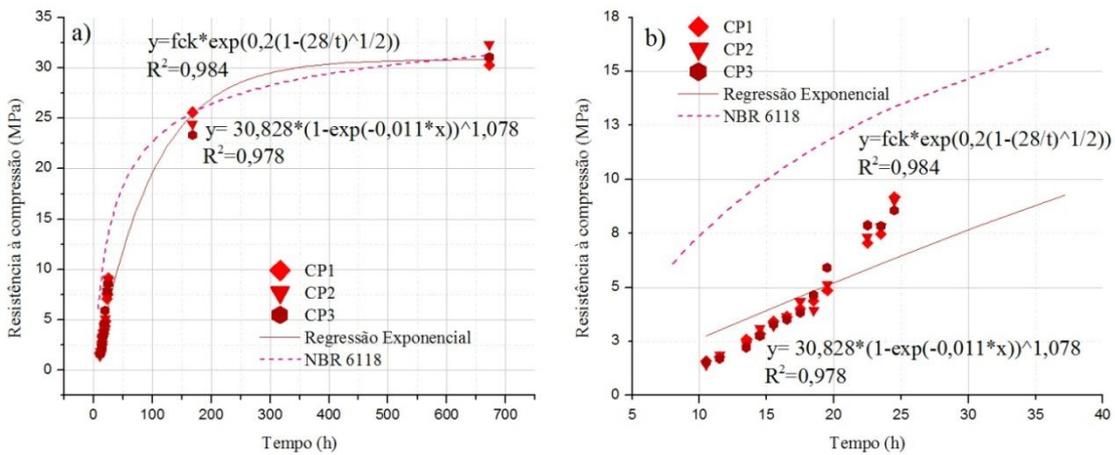
Ponderando os gráficos apresentados nas Figuras 6.5a, 6.6a e 6.7a, a equação sugerida pela ABNT NBR 6118:2014 apresenta comportamento semelhante ao encontrado em ensaio, tornando-a uma boa alternativa para a obtenção dos valores da resistência à compressão.

Figura 6.5 – a) Gráfico dos resultados do ensaio de compressão para o traço com alto consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



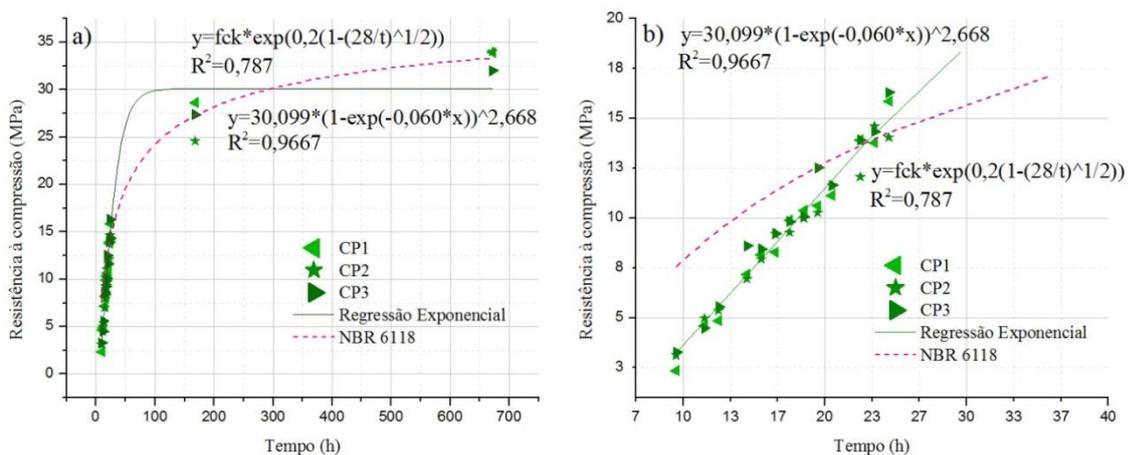
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.6 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de compressão para o traço com baixo consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.7 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de compressão para o traço com médio consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Contudo, ao isolar os dados das primeiras 24 horas, a Equação 6.5 apresenta uma mudança de comportamento. Nos concretos com alto e médio consumo de cimento, a equação apresenta valores majorados para resistências com idades inferiores a 23 horas. Para o concreto com baixo consumo de cimento, a equação resulta em valores superiores aos dados de ensaio para o tempo de até 7 dias, aproximadamente. Desta forma, fica explícito que é necessário ter atenção quando a recomendação da norma for utilizada para as primeiras idades do concreto (Figura 6.5b, 6.6b e 6.7b).

### 6.1.3. Ensaio de esclerometria

Para se obter a correlação entre o índice esclerométrico e o tempo, foram realizados dois tipos de regressão exponencial. A primeira, a partir da Equação 6.2, sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015). A segunda regressão exponencial foi realizada para a equação do tipo:

$$y = a - bc^x \quad (6.6)$$

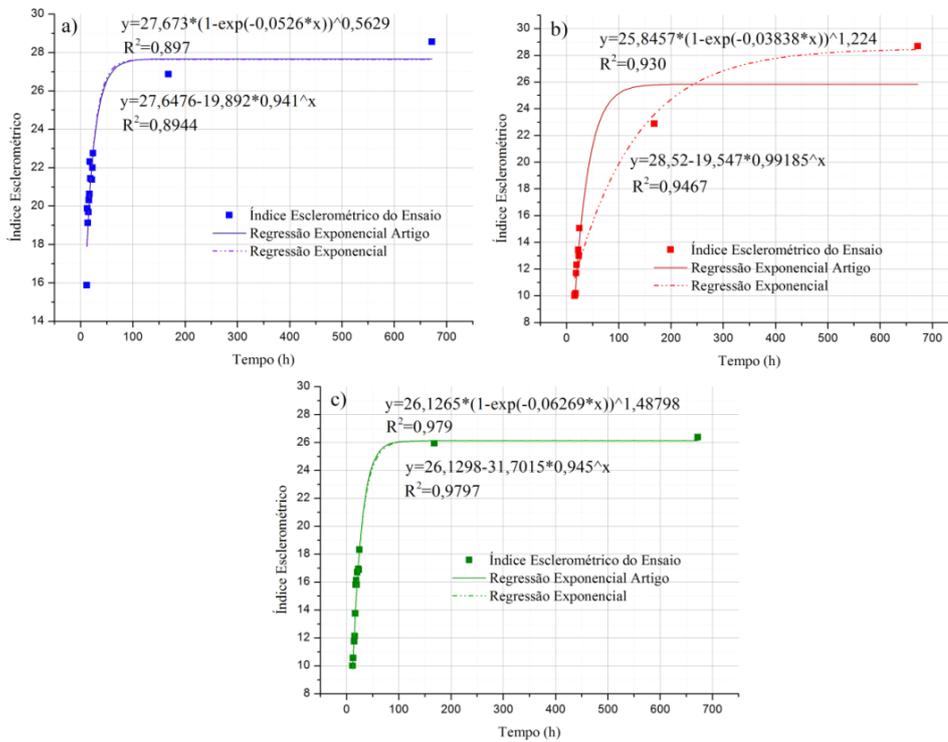
sendo  $y$  é o índice esclerométrico,  $a$  é o índice obtido aos 28 dias,  $b$  e  $c$  são constantes e  $t$  é o tempo em hora.

Avaliando ambas as regressões, é possível averiguar que as duas equações obtidas, para cada traço de concreto, representam de maneira satisfatória os resultados coletados; sendo, no caso do concreto com baixo consumo de cimento, a Equação 6.6 mais representativa (Figura 6.8).

A fim de se obter o valor da resistência do concreto a partir do índice esclerométrico coletado em ensaio, a empresa responsável pelo equipamento fornece uma curva de conversão pré-determinada que correlaciona estes parâmetros. A curva fornecida pela Proceq®, marca do esclerômetro utilizado nos ensaios, foi apresentada na Figura 3.4 do Capítulo 3. Esta foi elaborada para corpos de prova cúbicos e para idades de 14 a 56 dias. A título de realizar uma comparação entre os resultados obtidos em ensaio e os fornecidos pela curva, os gráficos da Figura 6.9 expõe estes dados.

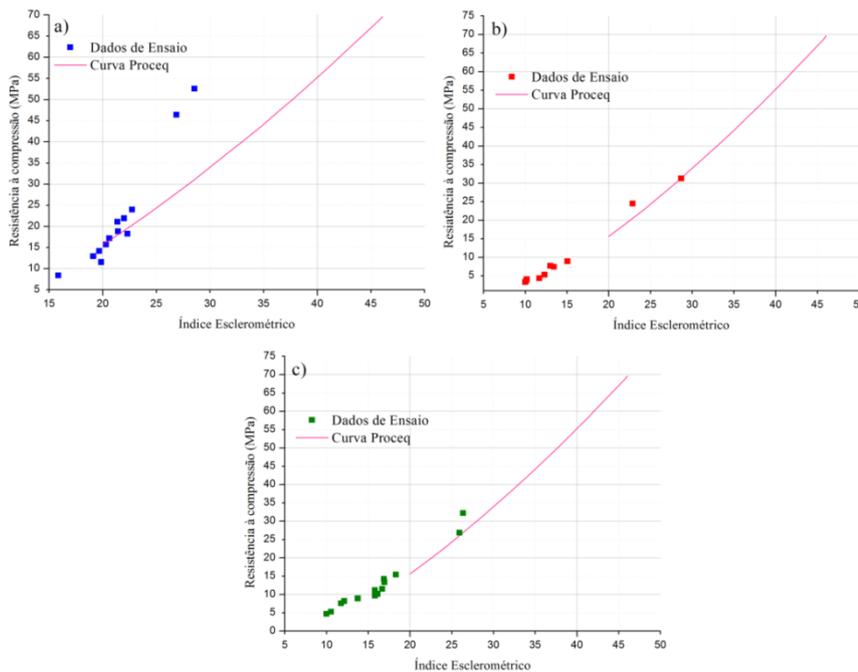
A partir dos gráficos da Figura 6.9, percebe-se que os resultados obtidos para as primeiras 24 horas seguem a linha de tendência da curva sugerida pelo fabricante do equipamento. Todavia, para os resultados de 7 e 28 dias, as curvas apresentaram resultados mais conservadores.

Figura 6.8 – Resultado dos índices esclerométricos pelo tempo: a) ensaio com alto consumo de cimento; b) ensaio com baixo consumo de cimento; c) ensaio do concreto com médio consumo de cimento.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.9- Resultado das resistências à compressão pelos índices esclerométricos e curva Proceq®: a) ensaio com alto consumo de cimento; b) ensaio com baixo consumo de cimento; c) ensaio do concreto com médio consumo de cimento.

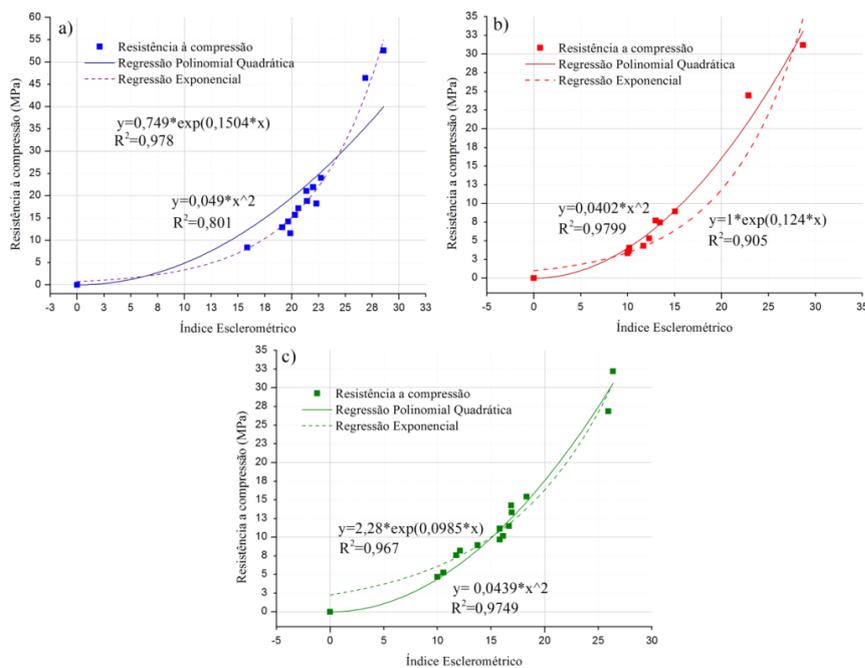


Fonte: Autora (2017)

Desta forma, mesmo ocorrendo danificação na superfície do concreto, e os valores dos índices esclerométricos serem muito baixos para a realização de leituras precisas em concretos de resistência inferior a 10 MPa, como previsto por Bungey & Millard (2006), é possível afirmar que o ensaio de esclerometria tende a apresentar uma correlação entre resistência e índice esclerométrico nas primeiras idades tão boa quanto aos 14 e 28 dias.

Visto que é possível obter relações entre os resultados obtidos com o ensaio de esclerometria e os de compressão axial, foram elaborados gráficos onde o índice esclerométrico foi disposto no eixo das abscissas e as resistências às compressões, no das ordenadas; e realizada análise quanto às relações obtidas (Figura 6.10).

Figura 6.10 -Resultado das resistências à compressão pelos índices esclerométricos: a) ensaio com alto consumo de cimento; b) ensaio com baixo consumo de cimento; c) ensaio do concreto com médio consumo de cimento.



Fonte: Autora (2017)

A relação entre resistência à compressão e índice esclerométrico foi estabelecida a partir de dois tipos de equações padrão obtidas através da regressão exponencial e polinomial quadrática, onde os fatores originam no zero e crescem de maneira proporcional. Estas equações foram escolhidas por serem as que apresentaram melhor representatividade entre as analisadas com o mesmo comportamento. As equações padrão para as regressões são as Equações 6.7 e 6.8, respectivamente.

$$y = be^{cx} \quad (6.7)$$

$$y = a_0x^2 \quad (6.8)$$

onde:  $y$  é a resistência à compressão em MPa;  $a_0$ ,  $b$ , e  $c$  são constantes; e  $x$  é o índice esclerométrico.

Apesar da regressão exponencial apresentar curvas mais representativas, a regressão polinomial permite fazer uma análise mais simplificada do comportamento das propriedades, em virtude que  $a_0$  é a relação  $\frac{\text{Resistência}}{\text{índice esclerométrico}^2}$ . Com isso, é possível afirmar que a resistência a compressão é, aproximadamente, de 5 a 4% do valor do índice esclerométrico ao quadrado, sendo essa variação dependente do consumo de cimento do concreto. Também foram analisadas as relações polinomiais cúbicas e quadráticas do tipo da Equação 6.8, contudo estas apresentaram representatividades inferiores a quadrática.

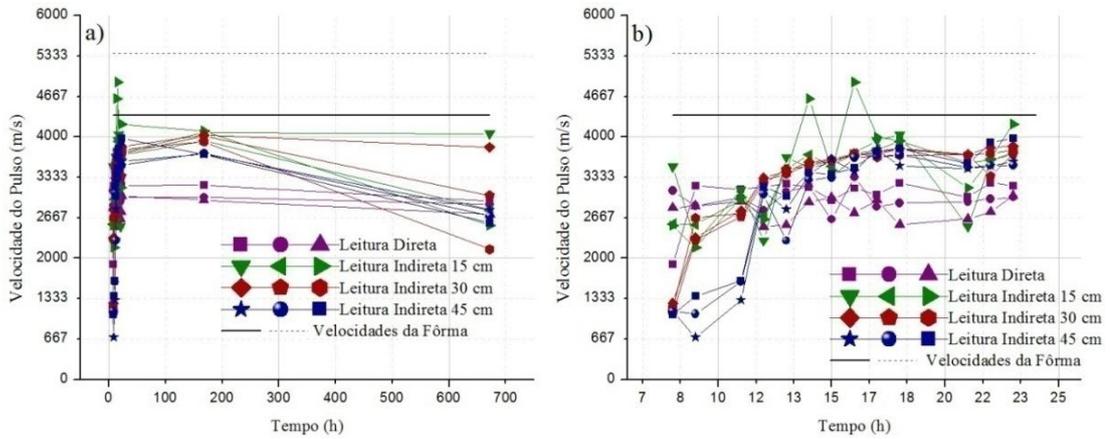
Ao analisar as equações polinomiais, nota-se que o coeficiente  $a_0$  decresce a medida que o consumo de cimento diminui, ou seja, a relação  $\frac{\text{Resistência}}{\text{índice esclerométrico}^2}$  reduz seu valor de acordo com a redução do consumo de cimento. Desta forma, para uma mesma resistência, o índice esclerométrico resulta em um valor mais alto para um consumo de cimento mais baixo, assim como definido pela BS 1881: Part 202-86.

#### 6.1.4. Ensaio de ultrassom

No ensaio de ultrassom foram coletados, através dos transdutores, os tempos de percurso das ondas ultrassônicas longitudinais, de forma que a velocidade obtida foi igual à distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores pelo tempo captado pelo aparelho. Tendo em vista que foram usados os mesmos tipos de agregados para os três traços, a influência dos agregados na utilização do equipamento de ultrassom não será analisada. Todos os resultados das leituras realizadas ao longo do tempo estão apresentados nos gráficos das Figuras 6.11 a 6.13.

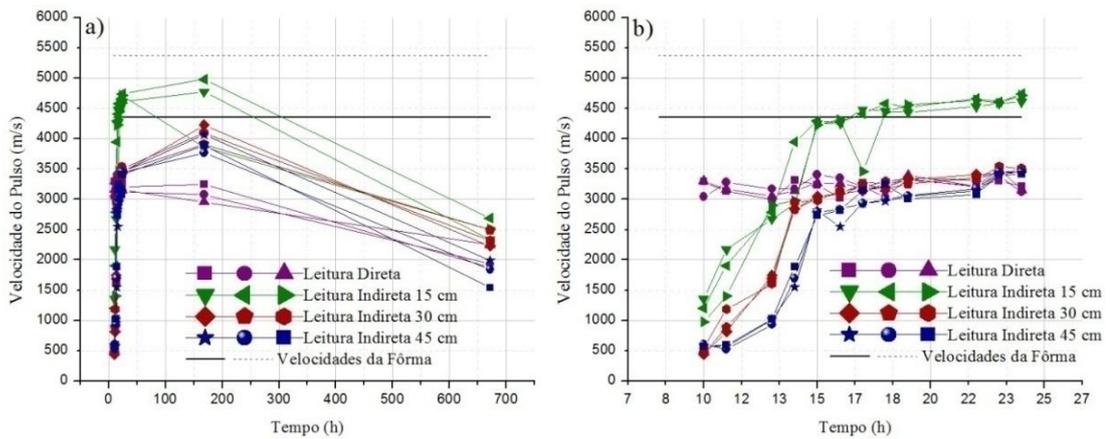
Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados dentro das fôrmas em virtude de não apresentarem resistência e rigidez suficientes para serem desmoldados nas primeiras idades. Desta forma, foi imprescindível considerar a influência da fôrma metálica nos dados, sendo necessário realizar uma leitura do ultrassom na fôrma metálica vazia.

Figura 6.11 – a)Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom ensaio com alto consumo de cimento; b)Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



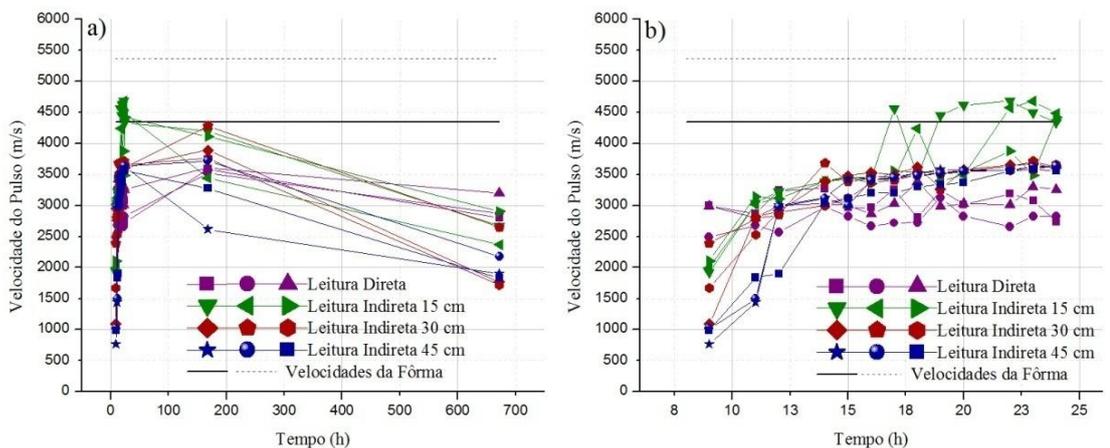
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.12-a)Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom ensaio com baixo consumo de cimento; b)Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.13 -a)Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom ensaio com um médioconsumo de cimento; b)Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

As leituras foram realizadas de duas formas: a primeira com o posicionamento do transdutor no centro das laterais da fôrma, de forma que o percurso da onda foi um “C” de 0,65 metros; e a segunda, o transdutor posicionado na extremidade da fôrma formando um percurso de 0,5 metros.

Como o princípio físico que rege o ensaio de ultrassom é a propagação de ondas mecânicas, ou seja, é indispensável um meio material para as ondas se propagarem; admitiu-se que a velocidade mais rápida de ensaio seria a velocidade de pulso ultrassônico na fôrma, ou seja, o do aço, pois as ondas ultrassônicas não se propagam no vazio, percorrendo desta forma, somente o caminho da fôrma. Todavia, a fôrma é montada a partir de quatro chapas, possibilitando a presença de pequenos vazios entre elas o que reduz a velocidade de propagação da onda do ultrassom. Desta forma, os valores das velocidades ultrassônicas obtidas para as fôrmas foi de 4350 e 5376 m/s, para os dois tipos de leituras, respectivamente; sendo estes valores inferiores a velocidade do aço de 5900 m/s.

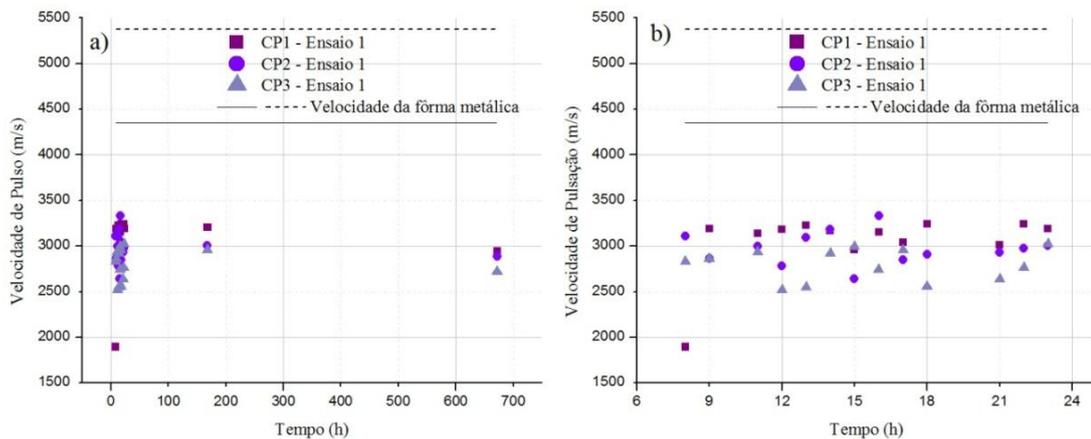
As velocidades apresentadas no início do monitoramento foram superiores a velocidade do ar de 300 m/s, como era o esperado em virtude da presença do meio material do concreto; todavia esta velocidade foi inferior a da água de 1430 m/s. Segundo Keating et al (1989) e Sayers e Grenfell (1993), este fenômeno pode ser causado pelo ar aprisionado na pasta de cimento a partir da presença de bolhas de ar na água de mistura, ou geradas durante o processo de mistura.

No entanto, o ultrassom é um ensaio extremamente sensível, onde os resultados obtidos são vulneráveis às condições do ambiente e aos procedimentos de ensaio. Como apresentado nos resultados dispostos nas Figuras 6.11 a 6.13, as leituras das velocidades obtidas foram inferiores a velocidade do aço da fôrma, como esperado. Isto ocorreu porque a presença dos vazios no concreto torna sua velocidade inferior a do aço, que é um material totalmente homogêneo. À medida que as reações químicas vão ocorrendo, o número de vazios vai diminuindo e a água que estava livre vai sendo consumida, com isso as velocidades vão aumentando de maneira não linear.

Nas Figuras 6.11b a 6.13b é possível verificar que as leituras indiretas de 15 centímetros de distância entre os transdutores apresentam uma velocidade ligeiramente superior aos outros tipos de leitura, confirmando o que a afirmação de MALHOTRA & CARINO (2004) que, na prática, distâncias menores apresentam uma maior variação e uma velocidade ligeiramente superior. Com os gráficos das Figuras 6.11 a 6.13, também é possível verificar que a maior influência da presença da fôrma durante as leituras foi no tipo de leitura direta.

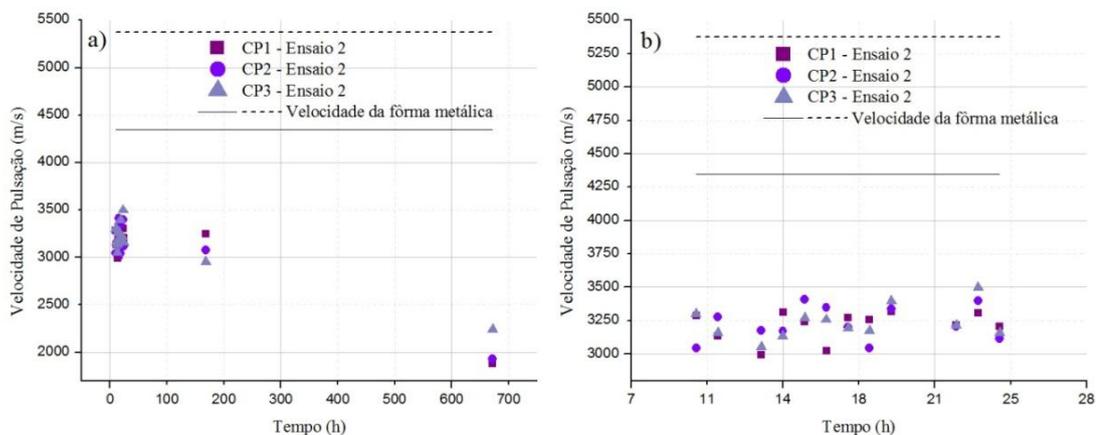
Como apresentado nos gráficos das Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, as leituras diretas apresentaram resultados que flutuam em torno de um valor constante. Deste modo, torna-se possível a suposição que a velocidade obtida em ensaio seja uma combinação de velocidades do concreto com a fôrma, de forma que mesmo com a diminuição dos vazios e a modificação da velocidade interna do concreto, a fôrma interferiu de maneira que o tempo gasto pelo pulso permanecesse inalterado, mantendo a velocidade quase que constante nas primeiras 24 horas. Portanto, nos ensaios de leitura direta com fôrmas metálicas, os resultados foram afetados de maneira significativa pela interface concreto-aço sendo necessário um estudo futuro mais aprofundado para que os dados coletados neste tipo de ensaio possam ser utilizados.

Figura 6.14 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura direta ensaio do concreto com alto consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



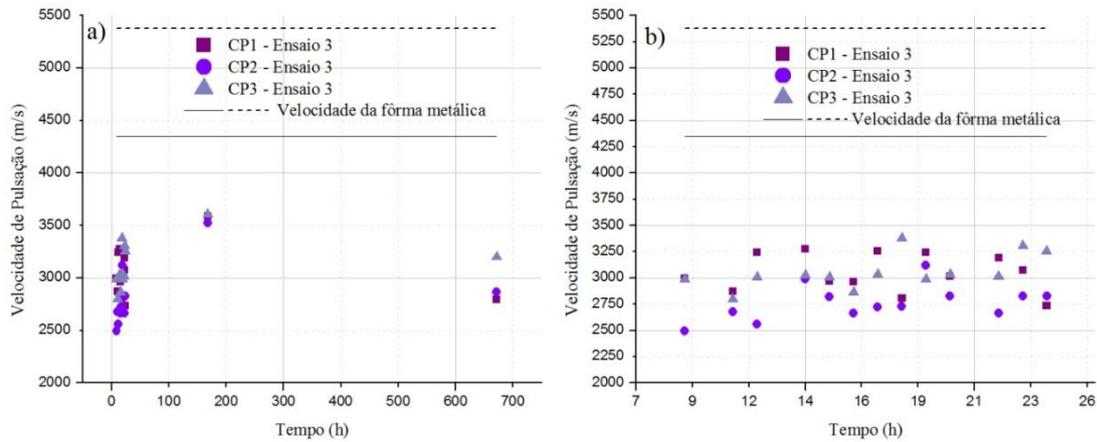
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.15 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura direta ensaio do concreto com baixo consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.16 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura direta ensaio do concreto com consumo médio de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.

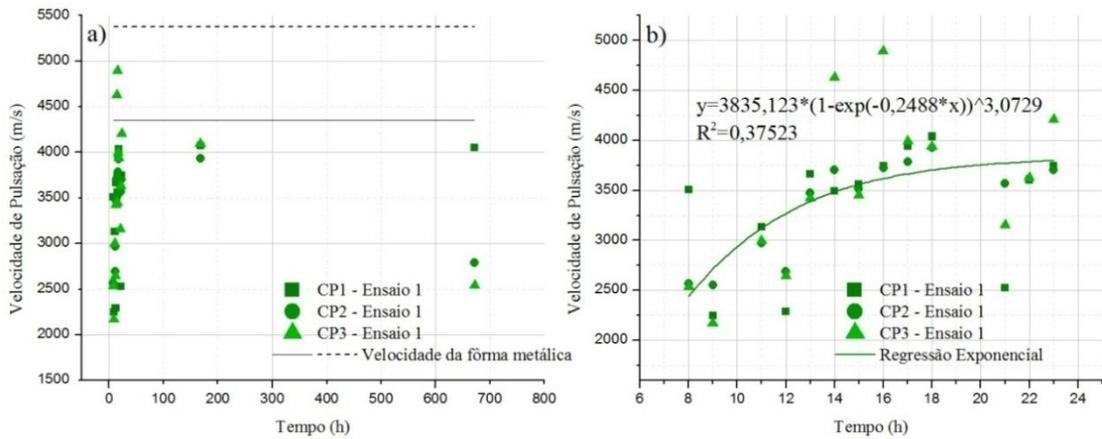


Fonte: Autora (2017)

Malhotra & Carino (2004) afirmam que em virtude da hidratação do cimento é esperado que a redução da porosidade seja mais alta nas primeiras idades, acarretando um aumento acentuado na velocidade neste período, e uma posterior diminuição do crescimento ao longo da vida do concreto, até se alcançar um valor limite, da mesma forma que ocorre com a resistência à compressão. Entretanto, ocorreu uma diminuição das velocidades nas idades de 7 e 28 dias quando comparado com o obtido nas primeiras idades para todos os tipos de leituras ensaiadas. Como esta alteração aconteceu ao longo de todos os ensaios, supõe-se que em virtude dos corpos de prova terem sido curados ao ar livre, ocorreu uma retração no concreto que interferiu nas medições das velocidades. Assim como na leitura da velocidade da fôrma metálica o espaço entre as chapas reduziu a velocidade que deveria ser igual a do aço; o espaço gerado entre a fôrma e os corpos de prova pela retração, reduziu a velocidade do pulso ultrassônico ao longo dos 7 e 28 dias de idade do concreto. Estas alterações estão apresentadas nas Figuras 6.17a a 6.25a.

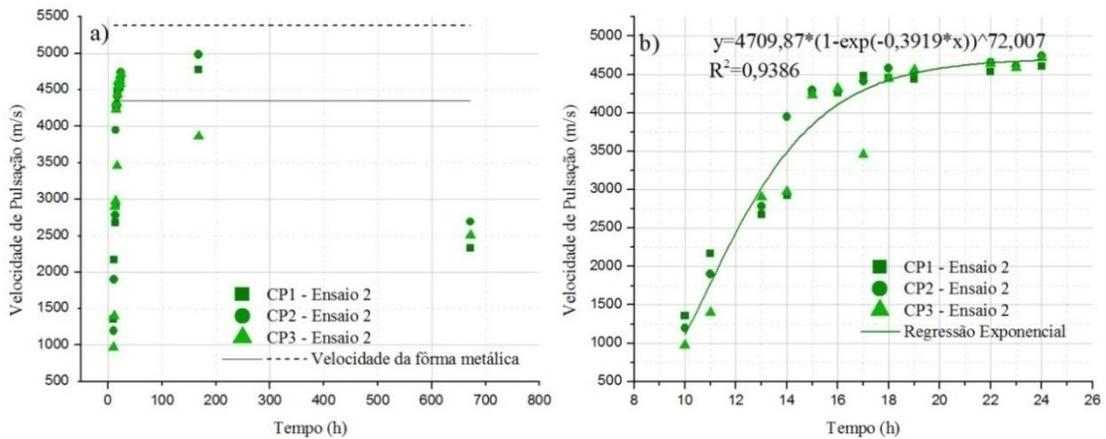
Desconsiderando os resultados obtidos nas idades de 7 e 28 dias e focando nas primeiras 24 horas do concreto, foram estabelecidas relações entre o aumento da velocidade do pulso e o tempo a partir da Equação 6.2 (Figuras 6.17b a 6.25b).

Figura 6.17 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 15 cm do concreto com alto consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



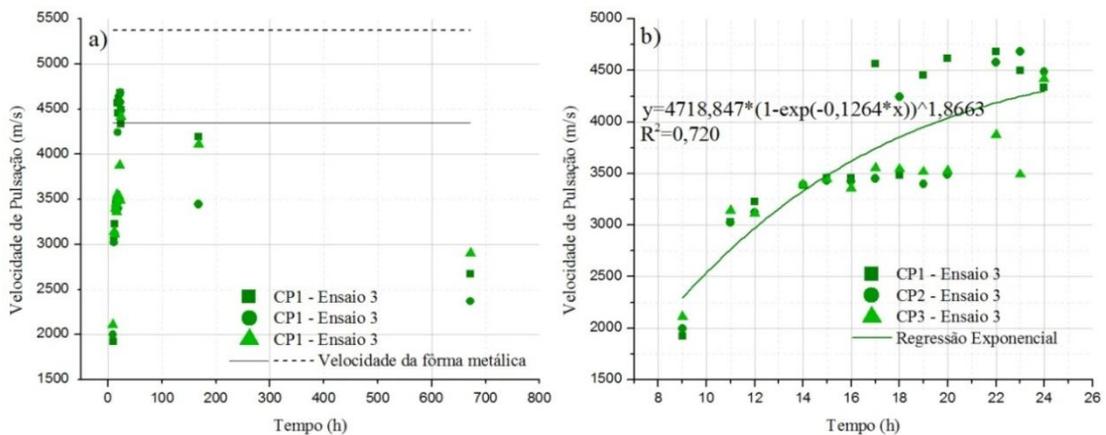
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.18 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 15 cm do concreto com baixo consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.19 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 15 cm do concreto com consumo de cimento médio; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

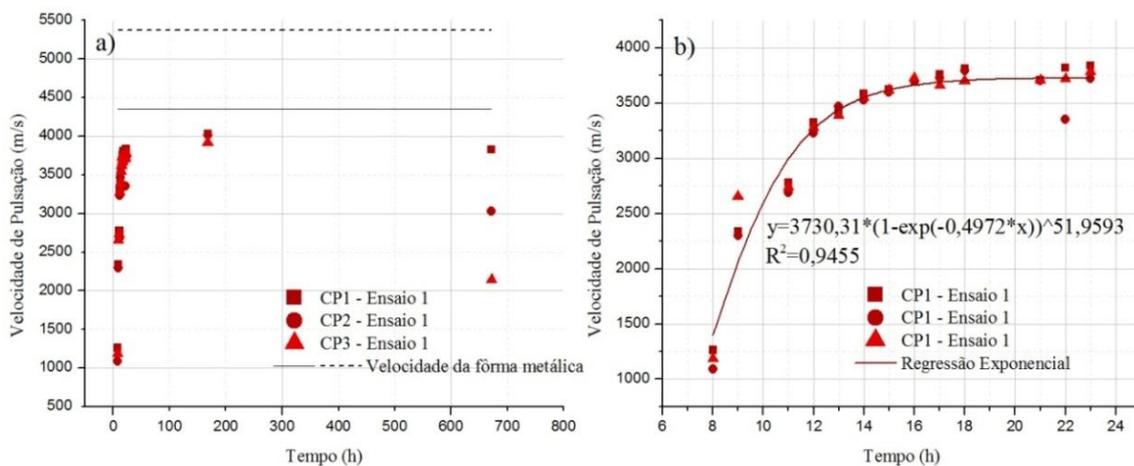
Como explicitado anteriormente, o posicionamento dos transdutores de forma indireta a 15 centímetro de distância foi o que apresentou resultados com valores mais altos. Para este tipo de leitura, as velocidades obtidas apresentaram uma alta dispersão tornando as relações obtidas nas regressões exponenciais pouco representativas (Figuras 6.17b, 6.18b e 6.19b).

As leituras das velocidades de pulso ultrassônico, a partir do posicionamento dos transdutores a 30 centímetros de distância entre eles, foram as que apresentaram resultados mais consistentes ao esperado pela literatura. Embora tenha ocorrido a queda da velocidade aos 28 dias, é possível observar um crescimento consistente da velocidade ao longo do tempo (Figura 6.20 a 6.22).

Analisando separadamente as primeiras horas, foi possível obter relações que correlacionam de maneira satisfatória a velocidade e o tempo. A Equação 6.2 apresentou resultados com altos coeficientes de determinação, relacionando os parâmetros de maneira eficaz. Assim como para resistência, o parâmetro A representa o valor da propriedade aos 28 dias, neste caso a velocidade de pulso ultrassônico em m/s. Os parâmetros B e C são constantes definidas através da regressão e t o tempo em horas.

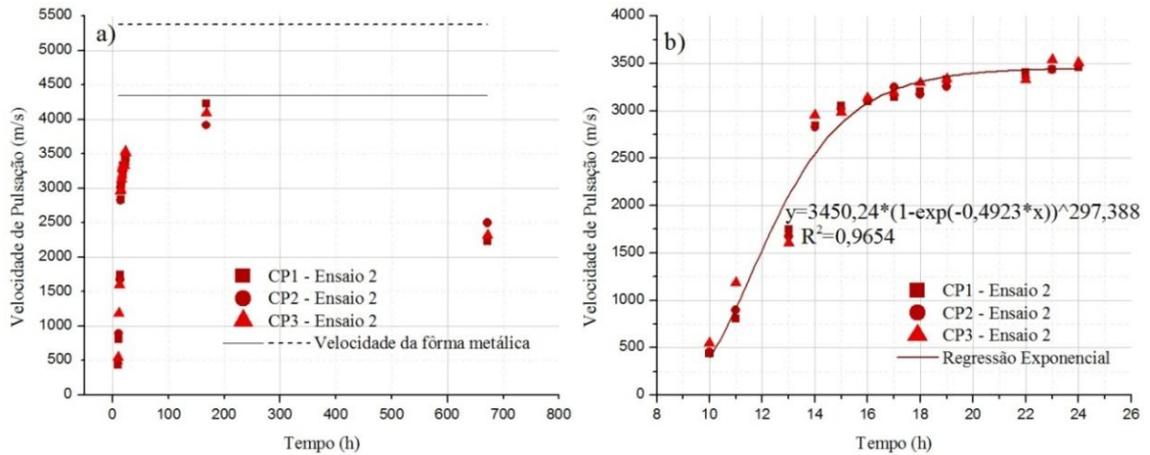
Observando os gráficos 6.20b a 6.22b, percebe-se que o fator que tem uma maior influência com as mudanças da relação a/c é o fator c, podendo afirmar que o mesmo está relacionado com a variação do fator água/ cimento. O parâmetro b permanece quase que constante para os três traços ensaiados.

Figura 6.20 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 cm do concreto com alto consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



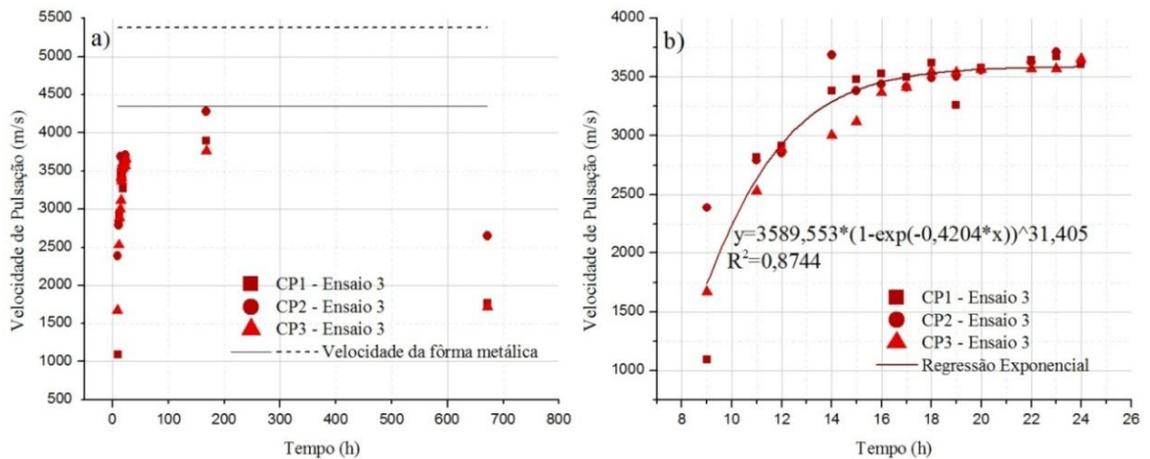
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.21 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 cm do concreto com baixo consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

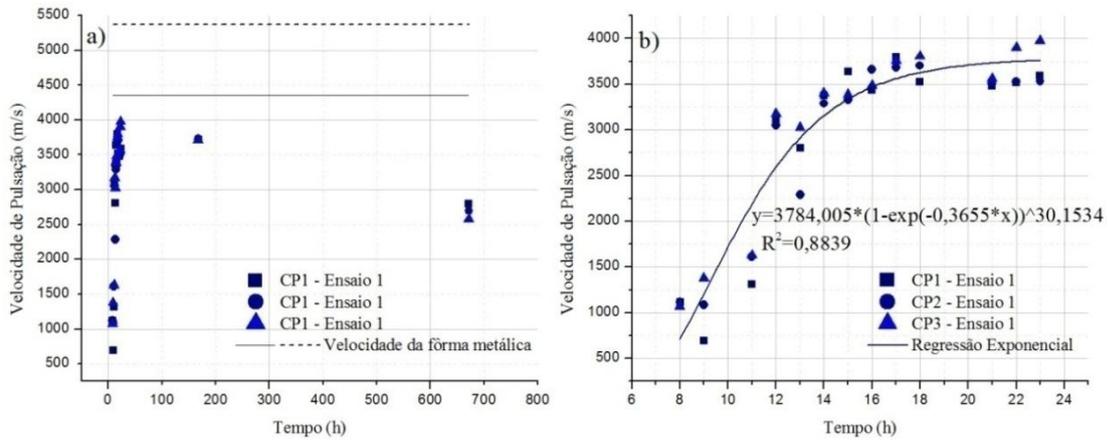
Figura 6.22 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 cm do concreto com consumo de cimento médio; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

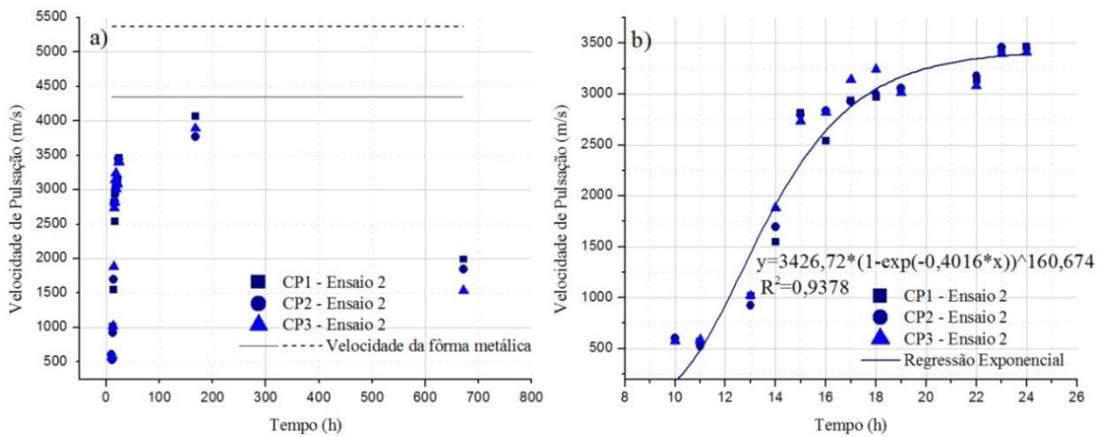
Para as leituras com os transdutores a 45 centímetros de distância, os resultados foram muito similares aos obtidos para a distância de 30 centímetros. No entanto, a equação apresentou uma precisão inferior (Figura 6.23b a 6.25b). As Equações 6.2 obtidas a partir da regressão exponencial, também apresentaram os coeficientes com as mesmas observações que as obtidas para 30 cm.

Figura 6.23 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 45 cm do concreto com alto consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



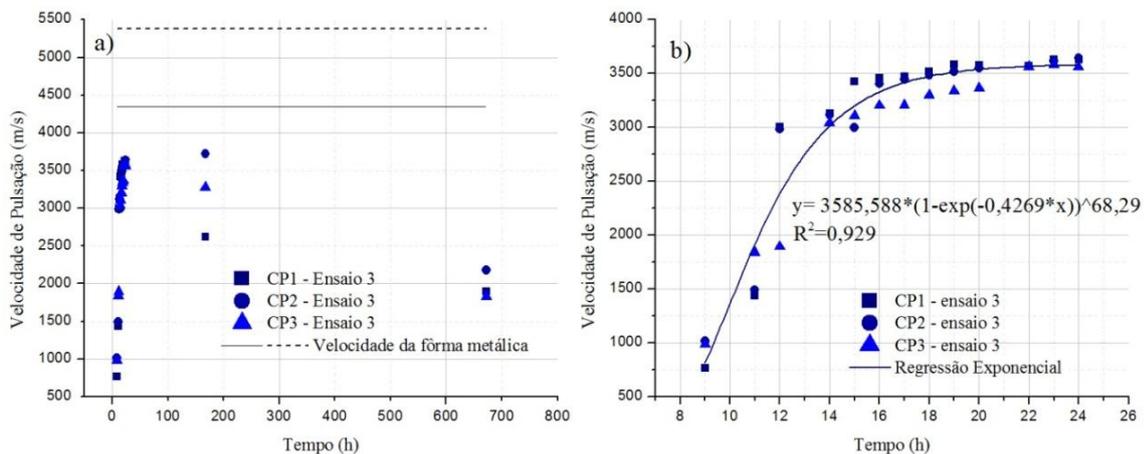
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.24 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 45 cm do concreto com baixo consumo de cimento; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

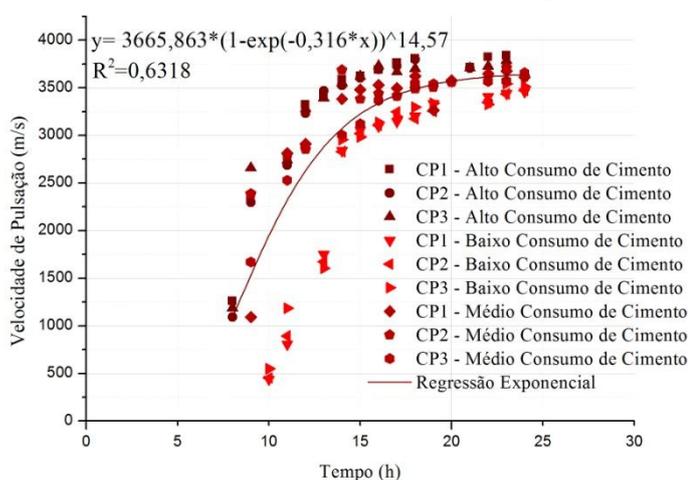
Figura 6.25 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 45 cm do concreto com consumo de cimento médio; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Em virtude das leituras do tipo indiretas de 30 cm de distância terem apresentado resultados mais próximos para os três traços, quando comparados com os outros tipos de posicionamento dos transdutores, analisaram-se separadamente seus resultados das primeiras 24 horas. Para os três traços ensaiados, percebeu-se um comportamento semelhante quanto ao crescimento da velocidade do pulso ultrassônico ao longo do tempo. Desta maneira, ocorreu a tentativa de obter uma única relação, do tipo da Equação 6.2, que independesse do traço do concreto. Apesar de ter sido possível a obtenção de uma única relação para os diferentes tipos de traço, esta apresentou um ajuste inferior ao desejado para considerar tal equação como representativa dos dados (Figura 6.26).

Figura 6.26 – Resultados da leitura indireta de 30 centímetros para todos os resultados.

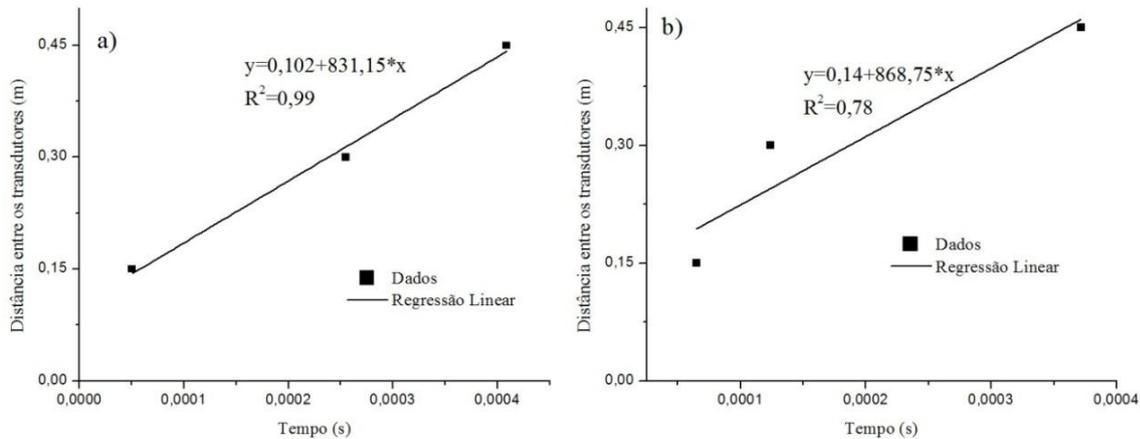


Fonte: Autora (2017)

É possível verificar a partir Figura 6.26 que, como esperado na literatura, quanto maior a relação a/c e, conseqüentemente, a porosidade, menor será a velocidade de propagação no meio. Ou seja, os mais altos valores de velocidade obtidos foram para os traços com um maior consumo de cimento.

Assim como determinado pela ABNT NBR 8802:2013, gráficos, onde o eixo das abscissas correspondia aos tempos de propagação da onda e o eixo das ordenadas, as distâncias entre o transdutor-emissor e o transdutor-receptor, foram executados para a obtenção das velocidades de propagação das ondas através da inclinação das retas geradas. Como exemplo, dois dos gráficos gerados estão apresentados na Figura 6.27, sendo todos os gráficos produzidos dispostos no Apêndice C.

Figura 6.27 – Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com alto teor de cimento como determinado pela ABNT NBR 8802:2013. a) Leitura realizada 8 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 9 horas após o ensaio.



Fonte: Autora (2017)

A partir das velocidades obtidas graficamente, os gráficos da velocidade do pulso ultrassônico pelo tempo foram gerados e estão nas Figuras 6.28 a 6.30.

A título de se obter uma equação que relacione as velocidades calculadas para as leituras indiretas e o tempo, foram realizadas duas regressões. A primeira, com a Equação 6.2 apresentada anteriormente nesse capítulo. A segunda regressão foi realizada a partir da equação:

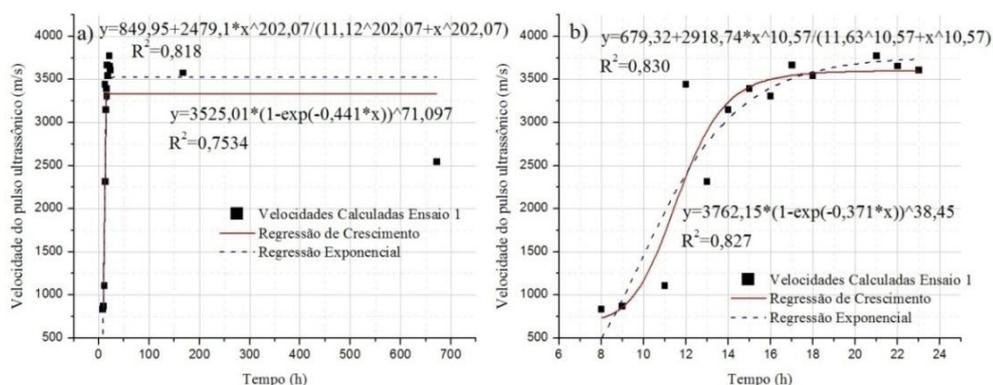
$$y = V_i + (V_f - V_i) \frac{x^n}{k^n + x^n} \quad (6.9)$$

sendo  $V_i$  é a velocidade inicial do pulso,  $V_f$  é a velocidade final do pulso;  $k$  e  $n$  são constantes,  $y$  é a velocidade no tempo  $x$ .

Como é possível perceber a partir dos gráficos das Figuras 6.28a, 6.29a, 6.30a, o problema apresentado por conta da regressão aos de 7 e 28 dias tornou as regressões não representativas. Desta forma se analisou de maneira isolada os resultados das primeiras 24 horas.

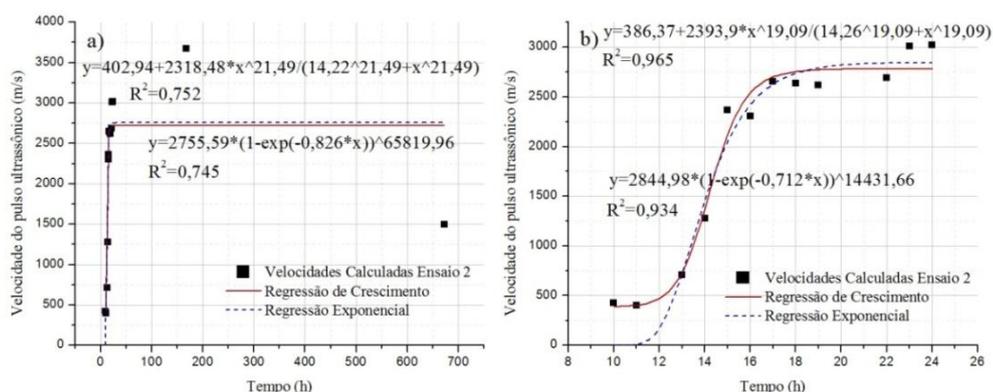
As equações de regressão do tipo da Equação 6.9 apresentaram valores das velocidades iniciais e finais do pulso maiores quanto menor fosse a relação  $a/c$ , como esperado de acordo com a literatura. Os coeficientes  $k$  e  $n$  aumentam seus valores com o aumento da relação  $a/c$ , assim como os coeficientes  $B$  e  $C$  da Equação 6.2.

Figura 6.28 - a) Resultado calculado da velocidade das leituras indiretas do ensaio de ultrassom de acordo com a ABNT NBR 8802:2013 no concreto com alto consumo de cimento; b) Detalhe das primeiras 24 horas após a concretagem.



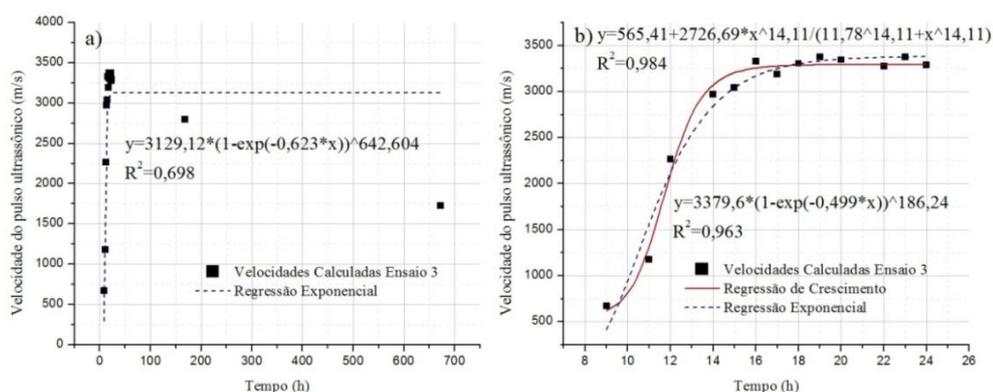
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.29 - a) Resultado calculado da velocidade das leituras indiretas do ensaio de ultrassom de acordo com a ABNT NBR 8802:2013 no concreto com baixo consumo de cimento; b) Detalhe das primeiras 24 horas após a concretagem.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.30 - a) Resultado calculado da velocidade das leituras indiretas do ensaio de ultrassom de acordo com a ABNT NBR 8802:2013 no concreto com médio consumo de cimento; b) Detalhe das primeiras 24 horas após a concretagem.



Fonte: Autora (2017)

De maneira generalizada o comportamento das velocidades calculadas a partir do procedimento sugerido pela ABNT NBR 8802:2013 se aproxima do obtido para o ensaio de leitura indireta de 30 cm de distância entre os transdutores, tornando a execução somente da leitura de 30 cm mais prática.

Para obter uma correlação ideal entre o tempo de pega do concreto e a velocidade do pulso ultrassônico, a situação perfeita seria que o monitoramento do concreto com o ultrassom ocorresse de maneira contínua a partir do instante que o concreto fosse colocado na fôrma, contudo isso não foi possível por motivos práticos de execução. Deste modo, o monitoramento com o ultrassom só foi iniciado após o final da pega do concreto; que ocorreu em torno de 6 horas após a concretagem para o traço de alto e médio consumo de cimento e 8 horas para o baixo consumo, como apresentado no item 6.1.1; tornando inviável analisar de maneira precisa a correlação destas duas propriedades.

De acordo com Trtnik et al (2008) é possível afirmar que o final da pega ocorre quando a velocidade do pulso ultrassônico na pasta de argamassa atinge a velocidade do pulso na água, que é de aproximadamente 1430 m/s. Analisando a Figura 6.31, percebe-se que as velocidades iniciais apresentadas nas leituras indiretas de 30 cm nos diferentes traços, após o tempo de pega, são inferiores ou próxima a velocidade da água.

Apesar dos tipos de ensaios de tempo de pega utilizados por Trtnik et al (2008) e no presente trabalho serem diferentes, o comportamento das curvas foram semelhantes, sendo admissível afirmar que caso as leituras tivessem sido iniciadas mais cedo, seria possível determinar de maneira exata a velocidade que o concreto atinge no final da pega. Todavia, nos três traços, quando o concreto atingiu a velocidade da água o final da pega já havia ocorrido. Portanto, é possível adotar a velocidade do pulso na água como um parâmetro base para se determinar que o final do tempo de pega já ocorreu.

A velocidade de pulso ultrassônico pode ser relacionada de maneira não linear com a resistência à compressão do concreto porque ambos os parâmetros tem seu comportamento definido pela hidratação do cimento. Para determinar numericamente esta relação, RILEM NDT1 (1972) recomenda três equações analítica, as quais são a Equação 6.10, 6.11 e 6.12.

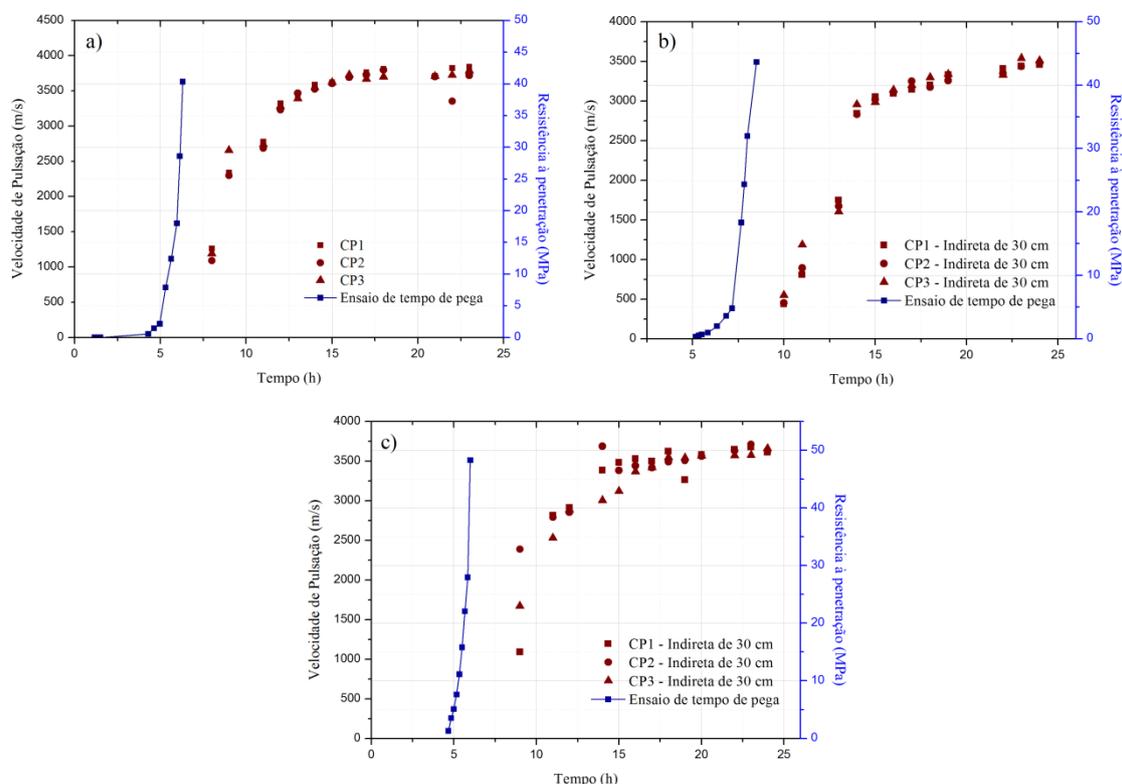
$$y = ax^b \quad (6.10)$$

$$y = ae^{bx} \quad (6.11)$$

$$y = ax^2 + bx + c \quad (6.12)$$

onde: a, b e c são constante, y resistência à compressão e x velocidade de pulso ultrassônico.

Figura 6.31 – Correlação entre o tempo de pega e a velocidade do pulso ultrassônico para leituras de 30 cm: a) ensaio do concreto com alto consumo de cimento; b) ensaio do concreto com baixo consumo de cimento; c) ensaio do concreto com médio consumo de cimento.



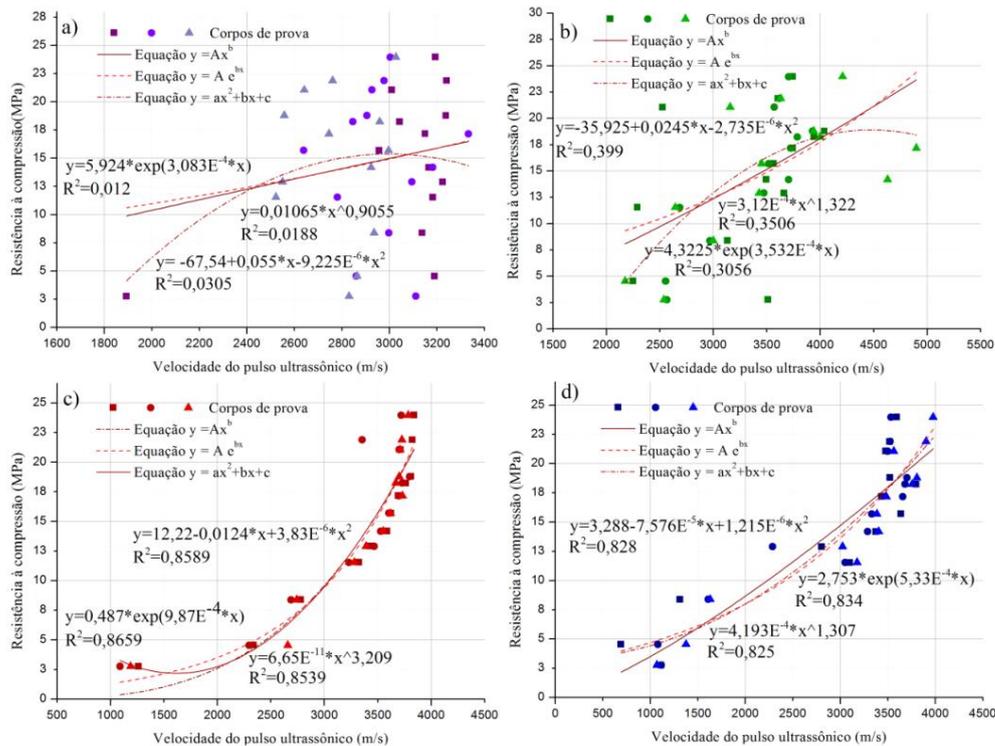
Fonte: Autora (2017)

Em virtude do comportamento do pulso ultrassônico nas idades de 7 e 28 dias ter sido alterado, estes dados foram descartados para a análise do comportamento da relação entre resistência à compressão e velocidade por estarem comprometidos. Desta forma, os dados coletados durante as primeiras 24 horas do ensaio de ultrassom e de resistência à compressão axial foram correlacionados graficamente e por meio das equações supracitadas.

O traço do concreto que apresentou os resultados mais uniformes ao longo das primeiras 24 horas foi o concreto com alto consumo de cimento. Para este ensaio foi possível correlacionar a resistência à compressão com a velocidade de pulso a partir das três equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972) para todas as leituras (Figura 6.32).

O melhor posicionamento para os transdutores foi a partir da leitura indireta de 30 centímetros de distância, foi o tipo de leitura que apresentou o comportamento de crescimento mais consistente com a literatura e com menos interferência da fôrma metálica. Para este caso, a equação que apresentou uma melhor representatividade foi a Equação 6.11.

Figura 6.32 – Relação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com alto consumo de cimento: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



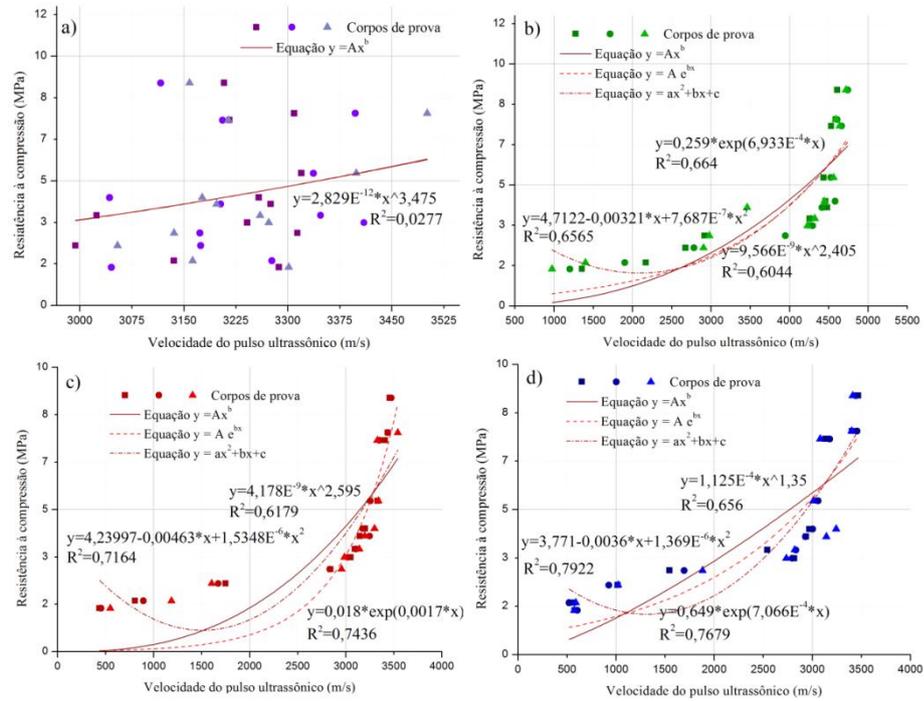
Fonte: Autora (2017)

No ensaio com baixo consumo de cimento, os resultados da leitura direta foram muito dispersos de forma a impossibilitar a obtenção das equações do tipo da Equação 6.11 e 6.12. Para este caso, as posições indiretas de 30 e 45 centímetros apresentaram resultados de precisões similares, mas ainda inferiores às obtidas no ensaio com um consumo mais alto de cimento. A Figura 6.33 apresenta estes resultados.

O último concreto, com um consumo de cimento com valor entre os apresentados anteriormente, proporcionou resultados com valores de precisão entre os valores obtidos nos ensaio supracitados. Para este caso, o posicionamento dos transdutores de maneira indireta a 30 e 45 centímetros de distância também foram os mais satisfatórios (Figura 6.34).

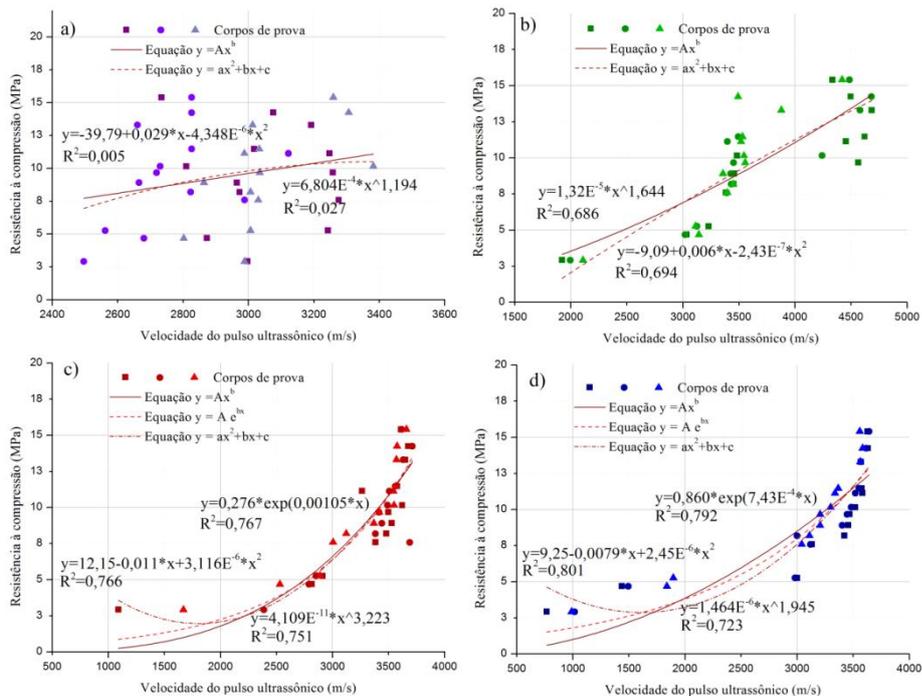
De maneira geral, pode-se afirmar que os melhores tipos de leituras para esta correlação, em ensaios nas primeiras 24 horas com a presença das fôrmas metálicas, são as leituras indiretas de 30 e 45 centímetros de distância. Sendo a leitura a 30 centímetros melhor representada pela Equação 6.11, e a 45 centímetros pela Equação 6.12. Todavia, esta representatividade ainda é considerada insuficiente para consagrá-la como solução prática desta correlação

Figura 6.33 - Relação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com baixo consumo de cimento: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.34 - Relação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com consumo de cimento médio: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



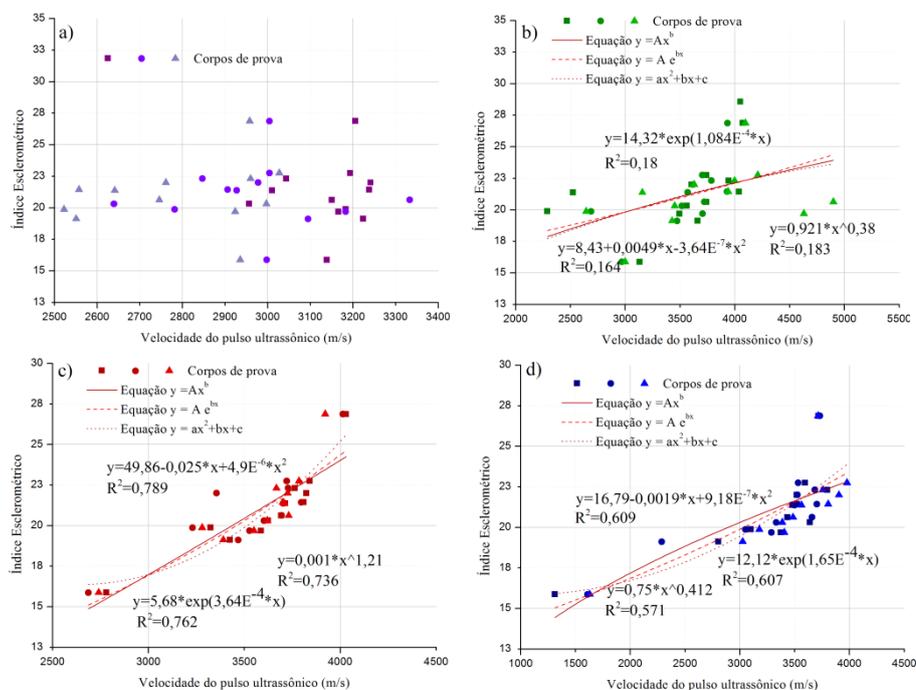
Fonte: Autora (2017)

Estendendo a aplicabilidade das equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972), estas foram utilizadas para a análise da relação entre os índices esclerométricos e as velocidades do pulso ultrassônico. Para a obtenção das curvas, as idades onde o índice esclerométrico foi inferior ao valor mínimo de leitura do aparelho foram desprezadas; assim como, as leituras de 28 dias após a concretagem, onde a presença da fôrma interferiu nos dados. Os resultados para os três traços de concreto ensaiados estão apresentados nas Figuras 6.35 a 6.37.

Analisando as equações obtidas é possível verificar que os melhores resultados foram os com os transdutores posicionados a 30 centímetros de distância, assim como foi encontrado para a resistência à compressão. No entanto, a representatividade do comportamento dos dados foi inferior quando comparado com o resultado obtido para a resistência.

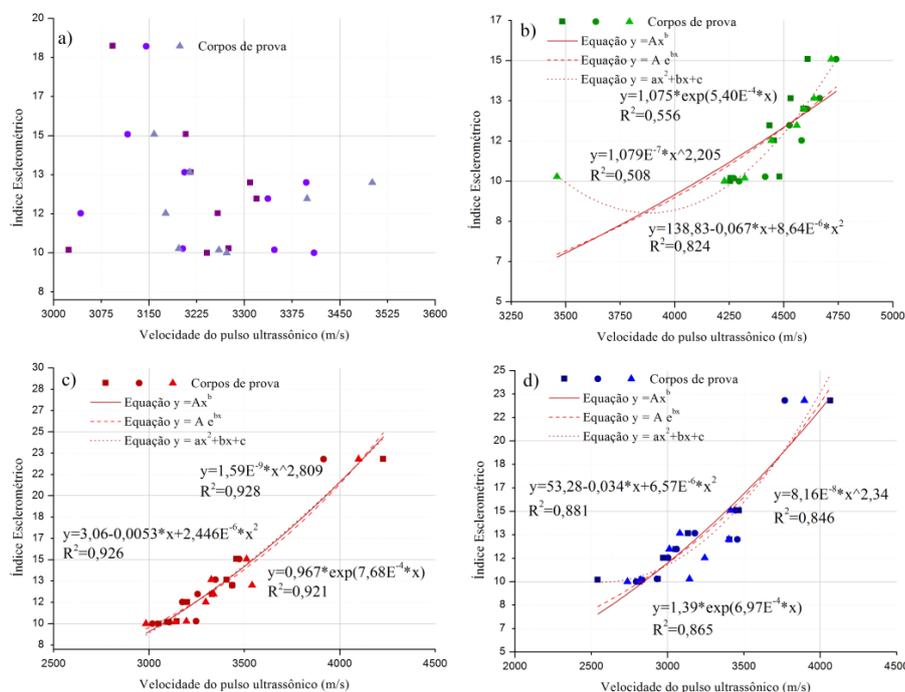
Entre todas as regressões analisadas a polinomial quadrática foi a que apresentou o melhor resultado. Desta forma, pode-se afirmar que é possível estender a aplicação da equação quadrática sugeridas por RILEM NDT1 (1972) para correlacionar o índice esclerométrico com a velocidade, sendo o posicionamento indicado para os transdutores de 30 centímetros. O comportamento dos dados deve ser analisado com extrema atenção.

Figura 6.35 - Relação entre índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com alto consumo de cimento: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



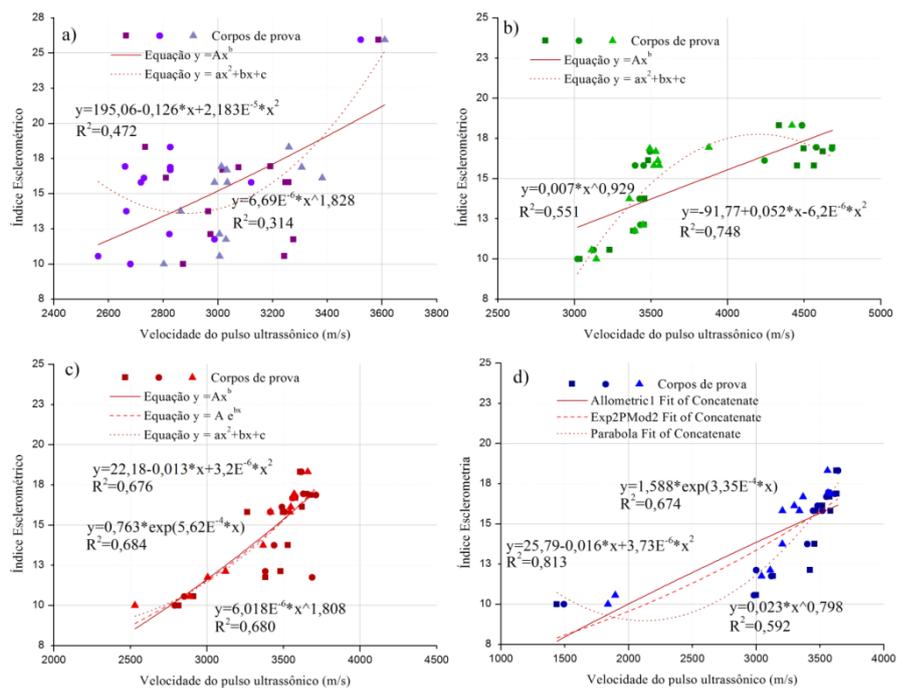
Fonte: Autora (2017)

Figura 6.36 - Relação entre índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com baixo consumo de cimento: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.37 - Relação entre índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio com baixo consumo de cimento: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



Fonte: Autora (2017)

Diferentemente de Irrigaray, Pinto & Padaratz (2016), não foi possível estabelecer uma única relação para todos os tipos de traços e leituras, em virtude da influência da fôrma metálica nos dados.

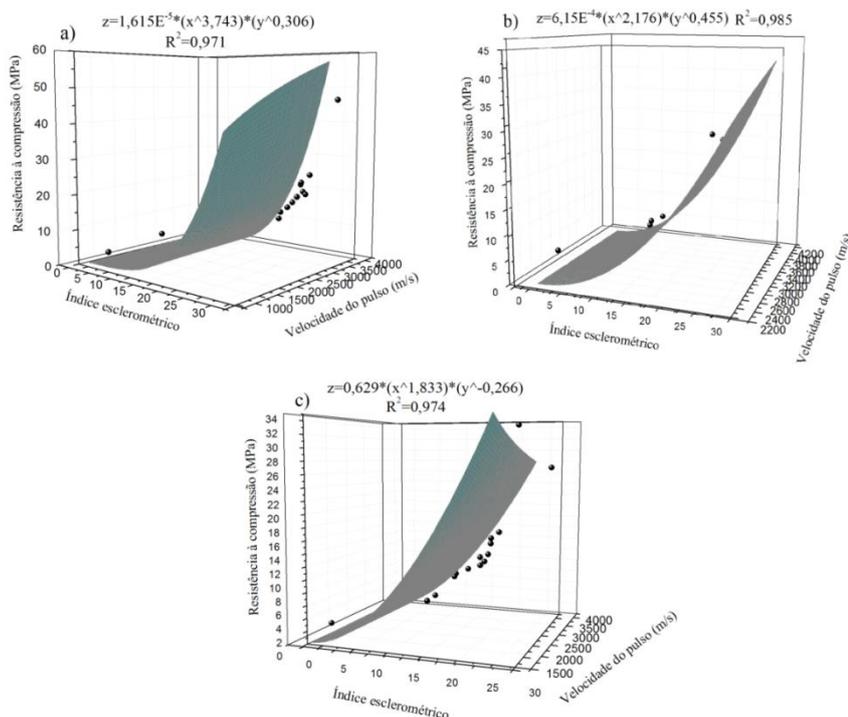
Como apresentado no Item 3.3, de acordo com diversos pesquisadores é possível realizar uma boa correlação entre os parâmetros dos ensaios de esclerometria, ultrassom e resistência. Dentre todas as equações apresentadas como solução para esta correlação a Equação 6.13 foi utilizada neste trabalho em virtude de apresentar bons resultados em diversas situações e ser de fácil utilização, segundo a literatura.

$$f_c = k V^a I_e^b \quad (6.13)$$

Sendo:  $f_c$  a resistência à compressão axial,  $V$  a velocidade do pulso ultrassônico,  $I_e$  o índice esclerométrico;  $k$ ,  $a$  e  $b$  constantes.

A Figura 6.38 apresenta os resultados e equações obtidos para os dados coletados dos três ensaios, sendo utilizadas as velocidades de pulso para as leituras com os transdutores separados a 30 cm de distância.

Figura 6.38 – Correlação entre os ensaios de esclerometria, ultrassom leitura indireta 30 cm e resistência à compressão: a) ensaio com alto consumo de cimento; b) ensaio com baixo consumo de cimento; c) ensaio do médio consumo de cimento.



Fonte: Autora (2017)

É possível observar que as equações apresentaram um alto coeficiente de determinação o que demonstra que a Equação 6.13 é uma excelente correlação múltipla entre estes ensaios. Contudo, não foi possível obter uma correlação entre a variação dos parâmetros  $k$ ,  $a$  e  $b$  e a relação  $a/c$ .

As principais equações encontradas durante a análise dos dados estão apresentadas na Tabela 6.5. Estas mesmas análises serão realizadas nos dados coletados nos ensaios executados na laje alveolar apresentados no tópico subsequente.

Tabela 6.5 – Principais equações obtidas nos ensaios.

Ensaio	Consumo de cimento	Equações obtidas a partir do ensaio em corpos de prova com melhores resultados	Coefficiente de determinação ( $R^2$ )
Compressão	Alto	$y=49,994(1-e^{(-0,057x)})^{2,312}$	0,968
	Baixo	$y=31,21\exp(0,2(1-(28/x)^{0,5}))$	0,984
	Médio	$y=30,099(1-e^{(-0,06x)})^{2,668}$	0,967
Esclerometria	Alto	$y=27,673(1-e^{(-0,0526x)})^{0,5629}$	0,897
	Baixo	$y=28,52-19,55*0,992^x$	0,947
	Médio	$y=26,13-31,70*0,945^x$	0,979
Resistência x índice	Alto	$y=0,749e^{(0,1504x)}$	0,978
	Baixo	$y=0,0402*x^2$	0,979
	Médio	$y=0,0439*x^2$	0,975
Ultrassom	Alto	$y=3730,31(1-e^{(-0,4972x)})^{51,959}$	0,9455
	Baixo	$y=3450,24(1-e^{(-0,4923x)})^{297,388}$	0,965
	Médio	$y=3589,55(1-e^{(-0,4204x)})^{31,405}$	0,8744
Resistência x Velocidade	Alto	$y=0,487e^{(E^{(-4)x})}$	0,866
	Baixo	$y=0,018e^{(0,0017x)}$	0,744
	Médio	$y=0,276e^{(0,00105x)}$	0,767
Índice esclerométrico x Velocidade	Alto	$y=49,86-0,025*x+(4,9E^{(-6)})*x^2$	0,789
	Baixo	$y=3,06-0,0053*x+(2,44E^{(-6)})*x^2$	0,926
	Médio	$y=0,763*\exp(5,62E^{(-4)})*x$	0,684
Correlação entre os ensaios	Alto	$fc=(1,615E^{(-5)})(V^{3,743})(Ie^{0,306})$	0,971
	Baixo	$fc=(6,15E^{(-4)})(V^{2,716})(Ie^{0,455})$	0,985
	Médio	$fc=0,629(V^{1,833})(Ie^{-0,266})$	0,974

Fonte: Autora (2017)

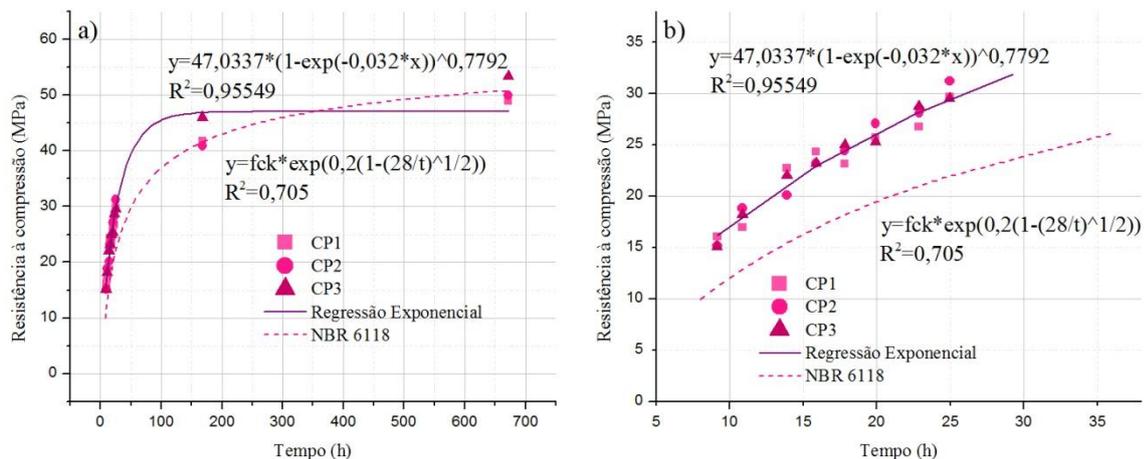
## 6.2. Ensaio na laje alveolar

Com o intuito de realizar uma comparação entre os dados, os resultados obtidos com a laje alveolar foram trabalhados do mesmo modo que os dados da caracterização do concreto.

### 6.2.1. Ensaio de resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão, os resultados apresentaram o mesmo comportamento da etapa anterior, visto que este ensaio foi realizado exatamente com o mesmo tipo de corpo de prova e os mesmos procedimentos. Deste modo, foi possível caracterizar a relação resistência à compressão vs. tempo a partir da regressão exponencial e obter uma equação do tipo da Equação 6.2. Em relação à Equação 6.5 sugerida pela ABNT NBR 6118:2014, esta se apresentou representativa ao longo de todas as leituras (Figura 6.39a). Todavia, ao se analisar isoladamente as primeiras 24 horas, a curva apresenta valores mais conservadores aos obtidos em ensaio, ficando a favor da segurança ao longo de todo o processo de ganho de resistência ensaiado, como apresentado na Figura 6.39b.

Figura 6.39 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de compressão dos cilindros moldados com o mesmo concreto que a laje alveolar; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

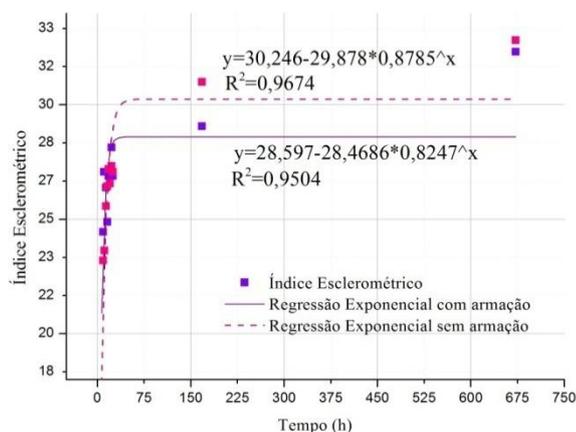
### 6.2.2. Ensaio de esclerometria

A Figura 6.40 apresenta o crescimento dos índices esclerométricos ao longo do tempo para as seções da laje com e sem adição de armadura. Apesar da influência devido à deformação dos tubos de PVC que fletiram, os resultados finais dos índices com e sem a presença de armadura foram muito próximos, sendo essa pequena queda do valor do índice com armadura resultado da espessura final da capa de concreto sobre os tubos que sofreram flexão.

Diferentemente da caracterização do concreto, não foi possível relacionar os índices esclerométricos com tempo a partir da equação sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015)

(Equação 6.2). Contudo, a Equação 6.6 correlacionou estes parâmetros de maneira satisfatória (Figura 6.40).

Figura 6.40 - Resultado dos índices esclerométricos pelo tempo na laje.

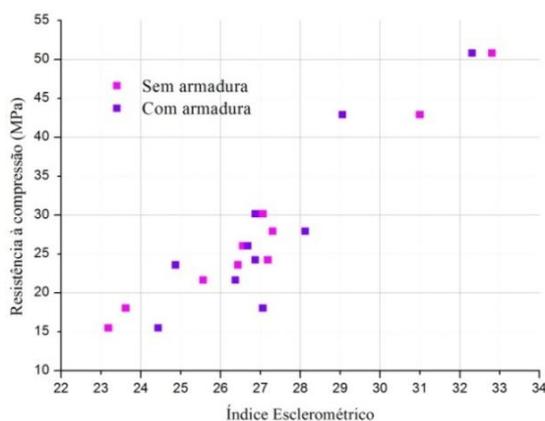


Fonte: Autora (2017)

Da mesma maneira que na caracterização do ensaio, a Equação 6.6 foi utilizada para representar a relação entre o ganho de resistência à penetração e o tempo, sendo as equações obtidas para os lados com e sem presença de armadura bastante similar. Desta forma, concluiu-se que a presença da armadura não interferiu nos resultados da esclerometria. Isto porque o ensaio consiste em medir a dureza superficial do material, e a armadura estaria a uma significativa distância da superfície da peça de concreto como determinado pela ABNT NBR 6118:2014.

Assim como a relação entre o índice e o tempo, a relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico não sofre influência significativa da presença da armadura no ensaio, como demonstrado na Figura 6.41.

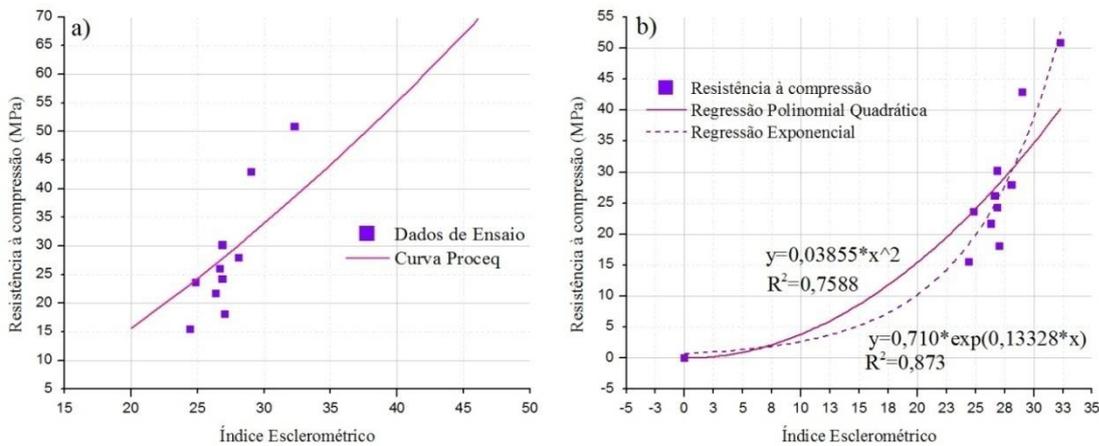
Figura 6.41 – Relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão na laje alveolar



Fonte: Autora (2017)

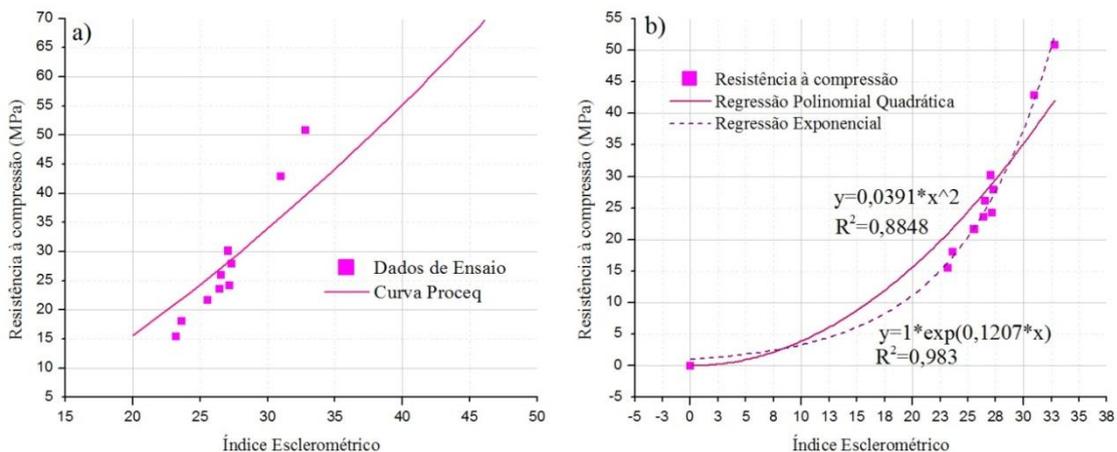
Comparando os valores obtidos em ensaio com a curva sugerida pelo fabricante do esclerômetro, a Proceq® apresenta valores de índice esclerométricos inferiores aos ensaiados para uma mesma resistência durante as primeiras 24 horas de idade do concreto. Desta maneira, o usuário obtém uma resistência à compressão superior a encontrada em ensaio, podendo afetar a segurança na utilização do material (Figura 6.42a e 6.43a).

Figura 6.42–Resultado das resistências à compressão pelos índices esclerométricos na laje com armadura: a) comparação com a curva Proceq®; b) Regressões.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.43 -Resultado das resistências à compressão pelos índices esclerométricos na laje sem armadura: a) comparação com a curva Proceq®; b) Regressões.



Fonte: Autora (2017)

Assim como na etapa de caracterização do concreto, foi possível estabelecer uma relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico através das Equações 6.7 e 6.8 (Figuras 6.42b e 6.43b). A regressão exponencial apresentou uma melhor representatividade dos resultados que a regressão polinomial quadrática.

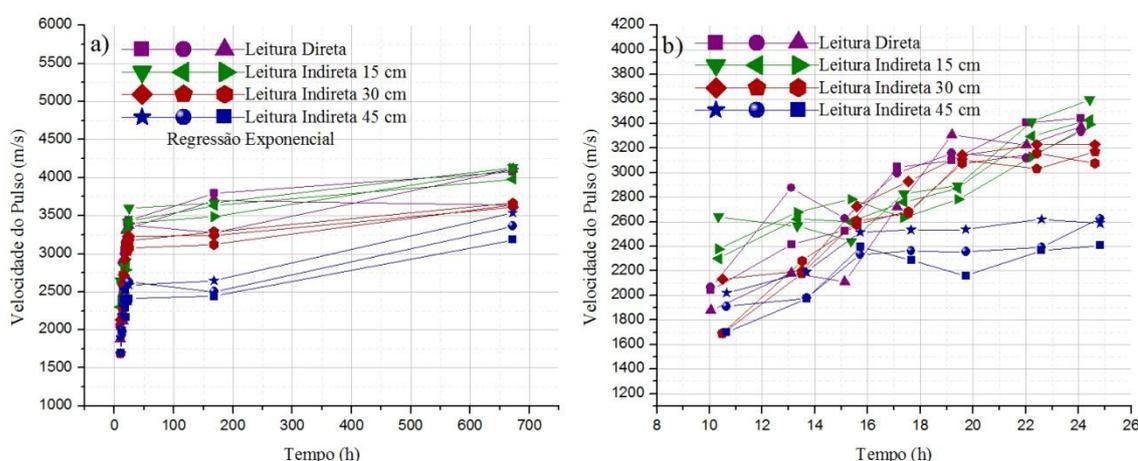
Analisando a equação do tipo da Equação 6.8, é possível afirmar que a relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico quase que se equiparam para a laje com e sem presença de armadura longitudinal. Desta forma, afirma-se que a relação entre estes dois parâmetros não sofre interferência da presença de armadura ao longo da laje alveolar, considerando-se o valor de armadura adotada.

### 6.2.3. Ensaio de ultrassom

Durante o ensaio de ultrassom na laje, verificou-se que a região sem a presença da armação apresentou velocidades levemente superiores a com armação, diferentemente do que era esperado, visto que a velocidade de propagação no aço é superior a no concreto (Figuras 6.44 e 6.45). Este comportamento se assemelhou ao obtido com a fôrma metálica. Dentre todos os tipos de leitura a que apresentou uma menor consistência dos resultados ao longo do tempo foi a leitura indireta de 45 centímetros de distância.

Como apresentado na literatura, sem a influência da fôrma metálica no ensaio, o tipo de leitura que apresenta os melhores resultados é a leitura direta. Contudo, esta é a leitura mais incômoda e demorada de ser realizada com um único operador. Desta forma, a leitura mais prática e que apresentou resultados mais consistentes foi a leitura indireta de 30 centímetros.

Figura 6.44 – a) Ensaio de ultrassom na laje lado com armação; b) Detalhe das primeiras 24 horas.

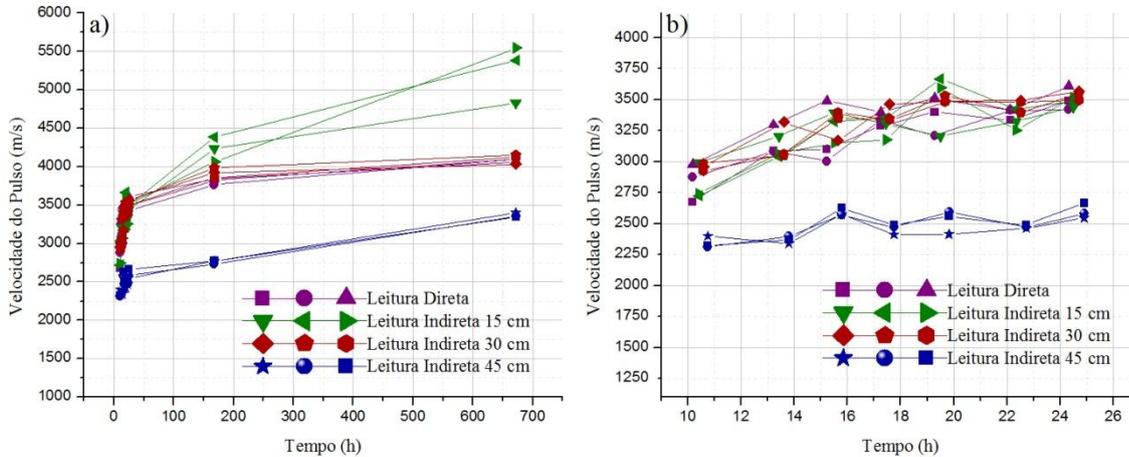


Fonte: Autora (2017)

Em todos os tipos de leituras para ambos os lados da laje, foi observado pequenas variações da velocidade do pulso ultrassônico ao longo do tempo, principalmente nas

primeiras 24 horas, onde o intervalo entre a velocidade da primeira leitura e da última leitura variou menos que 1000 m/s (Figura 6.44b e 6.45b).

Figura 6.45 -a)Ensaio de ultrassom na laje lado sem armação; b) Detalhe das primeiras 24 horas.



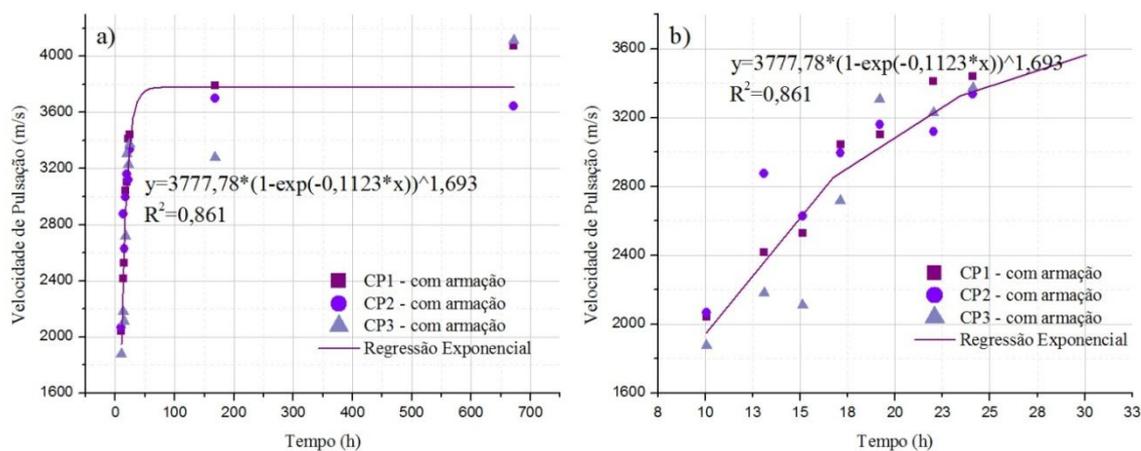
Fonte: Autora (2017)

Com o intuito de se obter um único tipo de relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e o tempo para os dois tipos de ensaios realizados, também foi adotada a Equação 6.2, sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015), como equação base para os dados.

O ensaio de leitura direta foi o que melhor conseguiu mapear o ganho de resistência ao longo do tempo (Figuras 6.46 e 47). Os resultados mais satisfatórios foram obtidos na seção da laje a qual tinha a presença da armação, porque o intervalo de variação da velocidade foi maior nesta seção do que na sem armadura. Para a região sem armadura da laje alveolar foi inviável obter uma relação que delineasse seu crescimento ao longo dos 28 dias (Figura 6.47a), sendo possível descrever somente as primeiras 24 horas (Figura 6.47b).

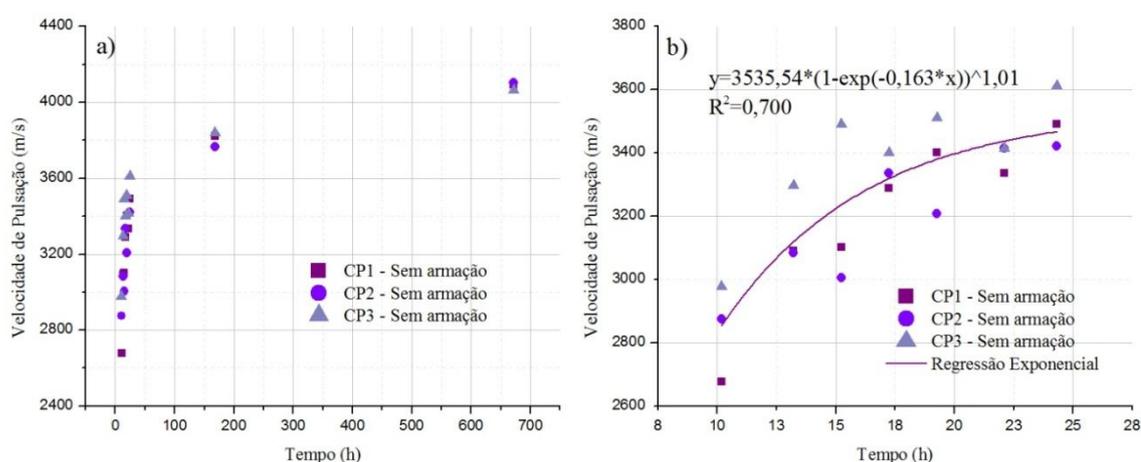
Averiguando as equações do tipo da Equação 6.2 obtidas para as primeiras 24 horas é possível perceber que os valores das constantes apresentam pequenas variações. Visto que, o intervalo de variação de velocidade é entorno de 2000 m/s ao longo de 28 dias, estas pequenas modificações nos coeficientes são suficientes para afirmar que a presença da armação interfere na obtenção das velocidades de propagação do pulso. Contudo, ela é de forma inversa ao esperado, ou seja, a presença da armadura auxiliou em um melhor mapeamento de dados, visto que aumentou o intervalo de variação da velocidade. Supõe-se que este fenômeno ocorreu em virtude do surgimento da camada de transição existe entre a barra de aço e o concreto, que retarda o tempo de percurso do pulso ultrassônico, aumentando o intervalo de variação da velocidade.

Figura 6.46 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura direta para laje alveolar com armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

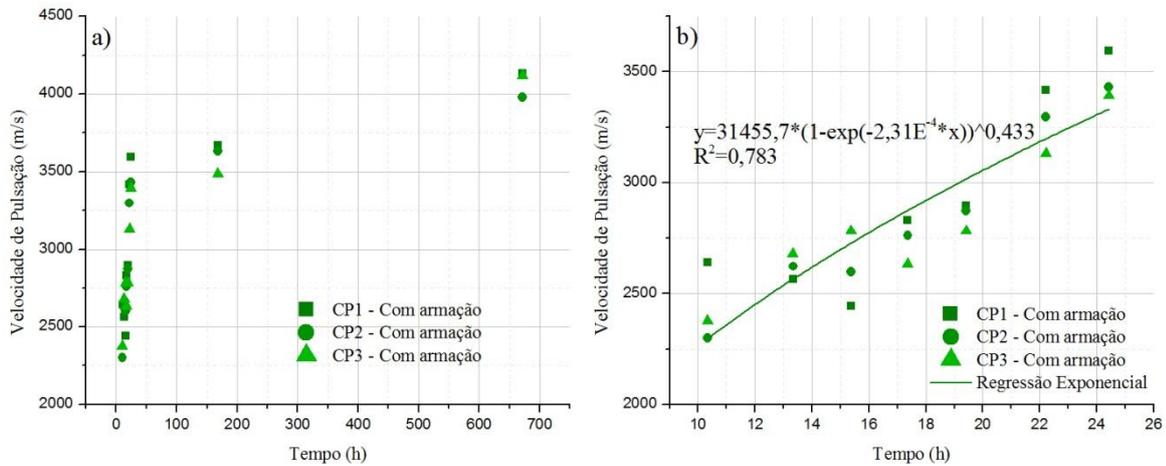
Figura 6.47 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura direta para laje alveolar sem armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

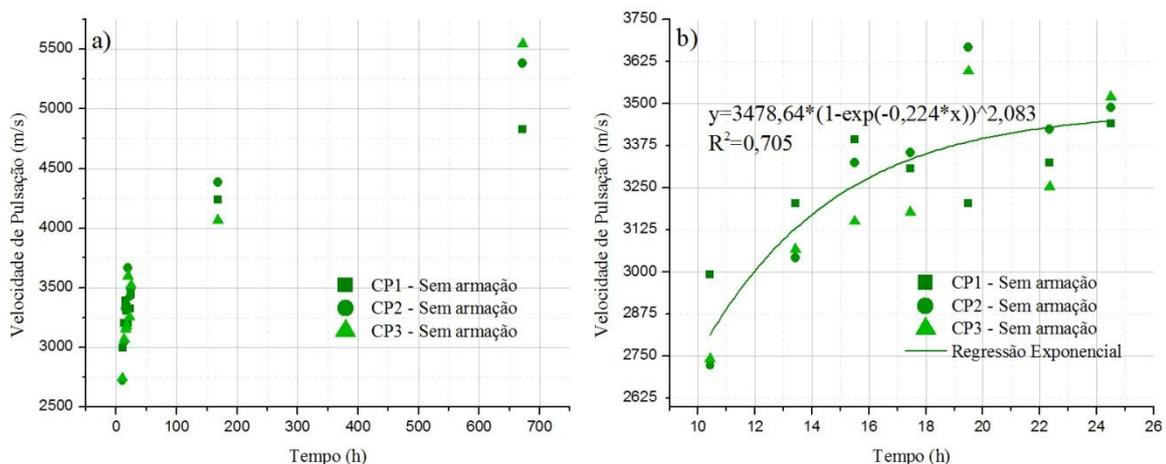
O monitoramento da velocidade a partir do posicionamento dos transdutores de forma indireta a 15 centímetros foi o que apresentou resultados mais insatisfatórios, pois o intervalo de variação das velocidades foi muito pequeno, em torno de 1000 m/s, o que torna a determinação dos dados muito imprecisa (Figuras 6.48 e 6.49). Do mesmo modo que o ensaio de caracterização do concreto, os valores das velocidades para este posicionamento foram os mais altos como definido na literatura.

Figura 6.48 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 15 centímetros para laje alveolar com armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.49 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 15 centímetros para laje alveolar sem armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.

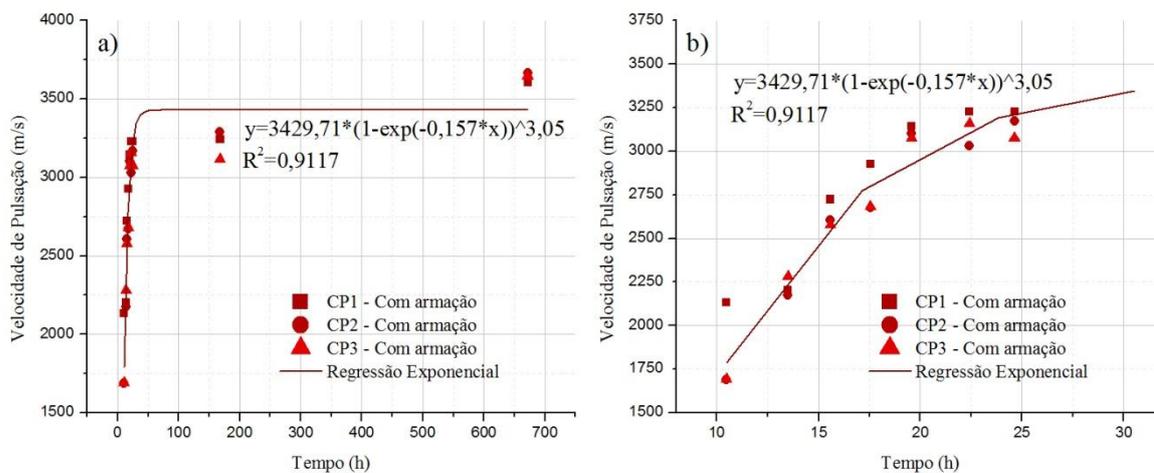


Fonte: Autora (2017)

Igualmente ao ensaio realizado nos corpos de prova, as leituras indiretas de 30 centímetros de distância entre os transdutores apresentaram um representativo crescimento ao longo do período de ensaio, como exposto nas Figuras 6.50 e 6.51. Todavia, somente foi possível estabelecer uma única equação para todo o tempo de ensaio para a seção com a presença de armadura devido ao crescimento abrupto de velocidade apresentado aos 7 e 28 dias para a seção sem o aço (Figura 6.51a).

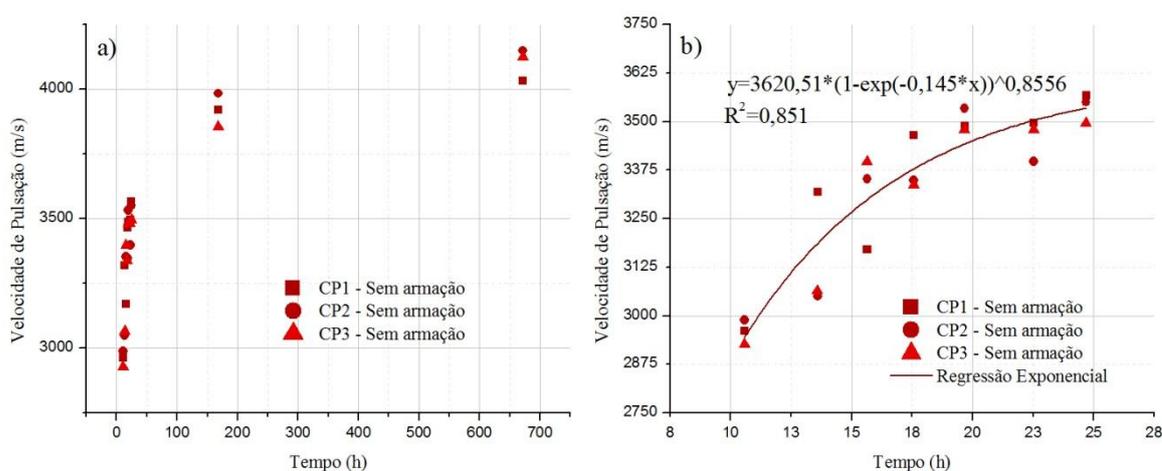
Da mesma forma que as leituras diretas, as indiretas de 30 centímetros resultaram em equações com pequenas diferenças variações que interferem na homogeneização dos resultados para a seção com e sem armadura.

Figura 6.50 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 centímetros para laje alveolar com armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

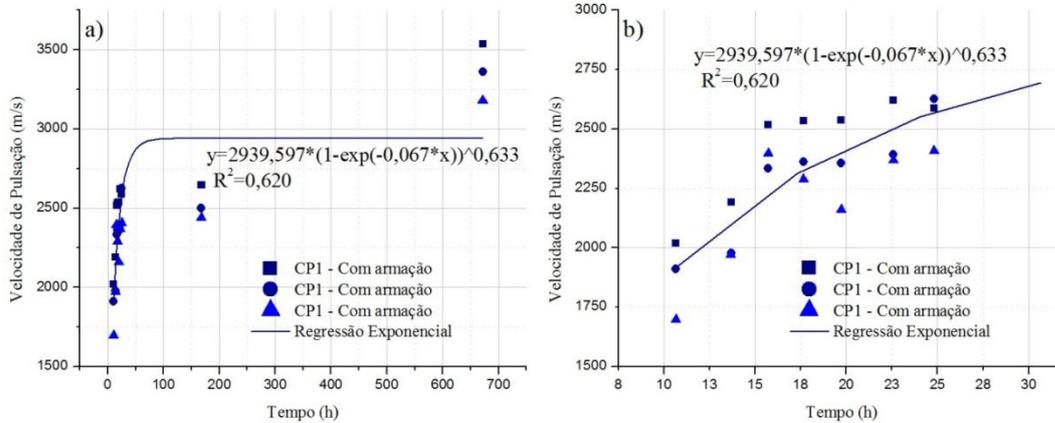
Figura 6.51 - a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 centímetros para laje alveolar sem armação; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

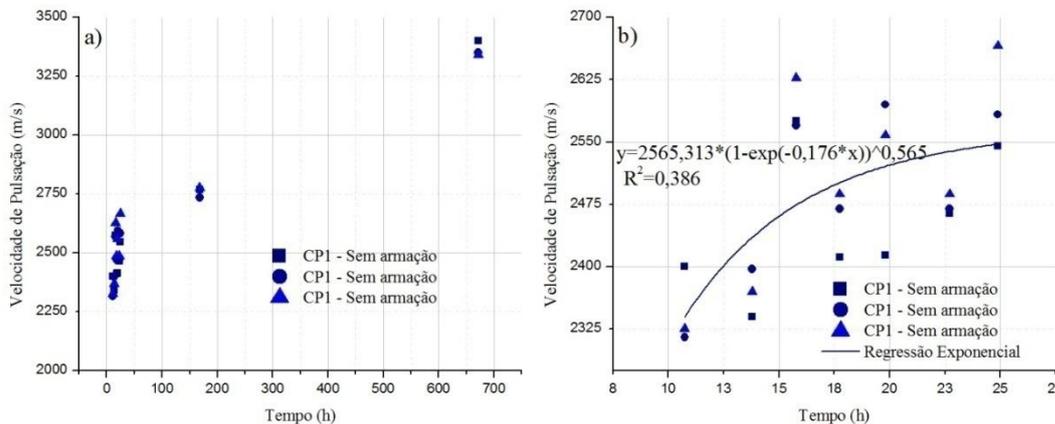
O posicionamento a 45 centímetro de distância foi o que apresentou resultados mais distintos entre todos os outros tipos. As velocidades com valores inferiores e, assim como o de 15 centímetros, reduzido intervalo de variação (Figuras 6.52 e 6.53).

Figura 6.52 -a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 45 centímetros para laje alveolar com armadura; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.53 -a) Gráfico dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 45 centímetros para laje alveolar sem armadura; b) Detalhe dos resultados das primeiras 24h do ensaio.



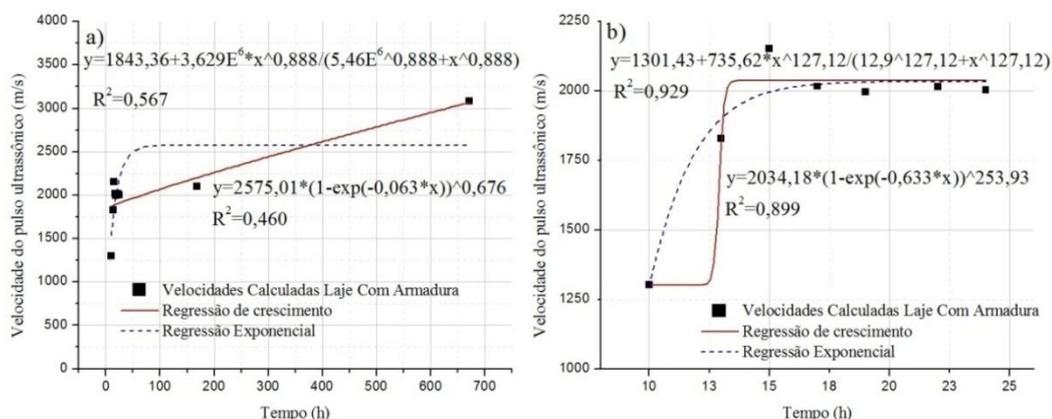
Fonte: Autora (2017)

Do mesmo modo como foi realizado com os resultados dos ensaios em corpos de prova, foram elaborados gráficos com as velocidades calculadas segundo a ABNT NBR 8802:2013 que estão apresentados no Apêndice C. Por falta de um maior número de leituras após as primeiras 24 horas, as regressões obtidas para todos os dados não foram representativas, chegando a regressão exponencial não convergir para os dados da laje sem a armadura (Figuras 6.54a e 6.55 a).

Analisando os resultados das primeiras 24 horas separadamente, é possível perceber que a Equação 6.2 apresentou um comportamento mais representativo dos dados que a Equação 6.9. Comparando os resultados da laje com e sem a presença da armadura, percebe-se que as equações obtidas apresentam diferenças significativas nos seus coeficientes, caracterizando que a presença da armadura interferiu nos resultados gerais do ensaio,

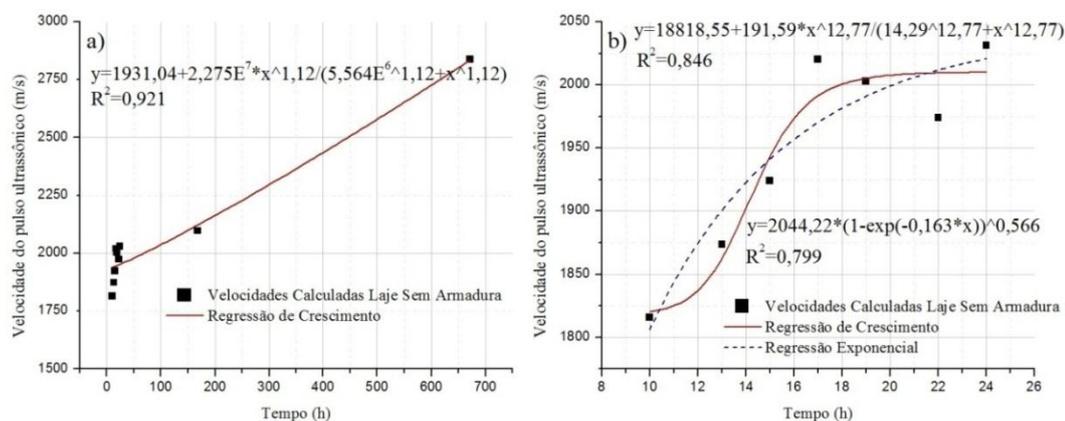
confirmando os resultados dos ensaios de cada tipo de espaçamento entre os transdutores analisados separadamente.

Figura 6.54 - a) Resultado calculado da velocidade das leituras indiretas do ensaio de ultrassom de acordo com a ABNT NBR 8802:2013 na laje com armadura; b) Detalhe das primeiras 24 horas após a concretagem.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.55 - a) Resultado calculado da velocidade das leituras indiretas do ensaio de ultrassom de acordo com a ABNT NBR 8802:2013 na laje sem armadura; b) Detalhe das primeiras 24 horas após a concretagem.

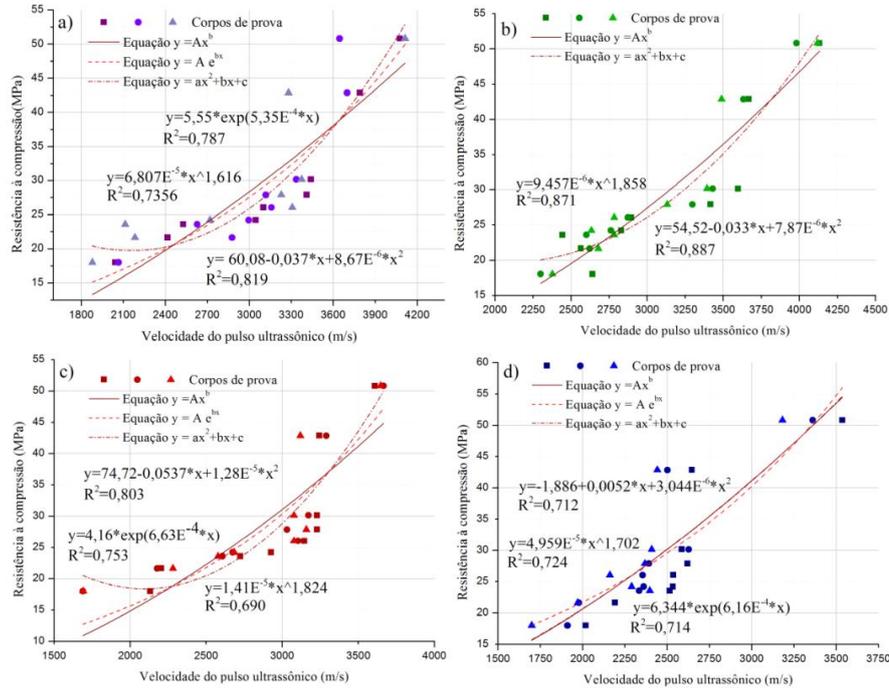


Fonte: Autora (2017)

A relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão, também ocorreu a partir as Equações 6.10, 6.11 e 6.12 sugeridas por RILEM NDT1 (1972). Em alguns casos, a Equação exponencial 6.11 não conseguiu convergir a um resultado.

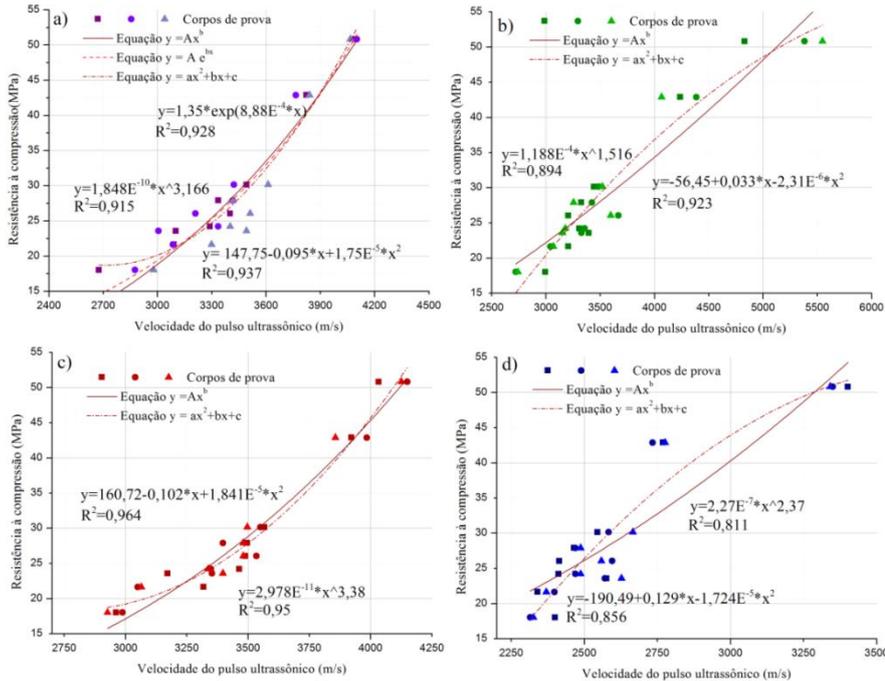
Para o crescimento da velocidade ao longo do tempo, as melhores regressões obtidas ocorreram na seção da laje onde era encontrada a presença do aço. Contudo, ocorreu o oposto na caracterização da relação velocidade e resistência, onde as regressões com os melhores coeficientes de determinação foram obtidas na seção sem a armadura (Figura 6.56 e Figura 6.57).

Figura 6.56 - Relação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio laje alveolar com armadura: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.57 - Relação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio da laje alveolar sem armadura: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



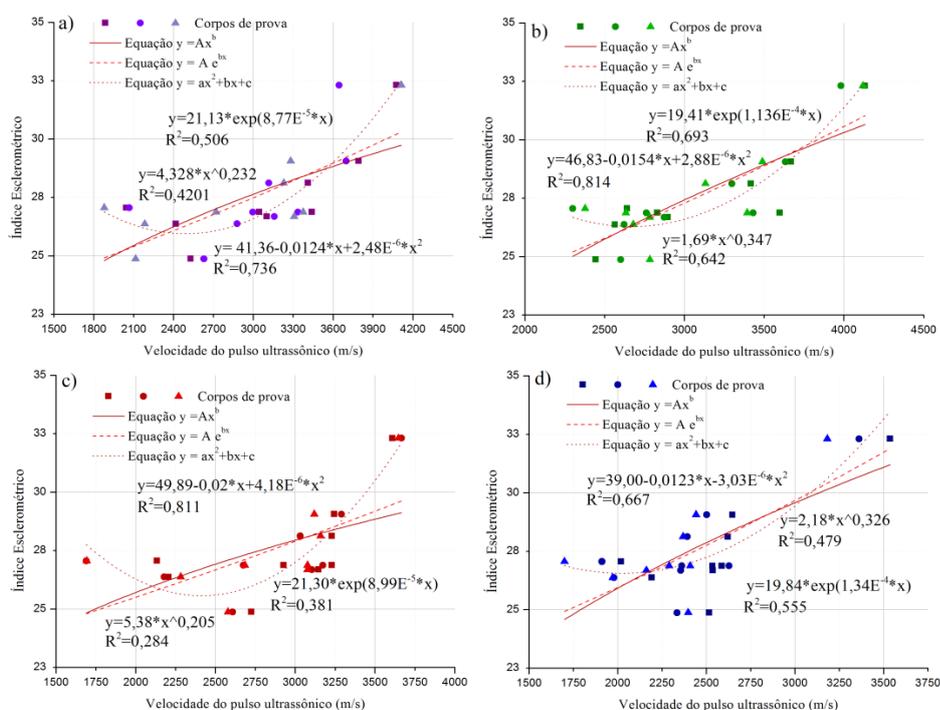
Fonte: Autora (2017)

As melhores representações obtidas, tanto para a seção sem armadura como para com, ocorreram no posicionamento dos transdutores de maneira direta e indireta a 30 centímetros de distância. E, em ambos os casos, a equação com melhor aproximação foi a polinomial quadrática (Equação 6.12).

Apesar das equações apresentarem valores altos para o coeficiente de determinação, não foi possível correlacionar de maneira universal os dados as duas seções da laje alveolar para nenhum tipo de posicionamento dos transdutores.

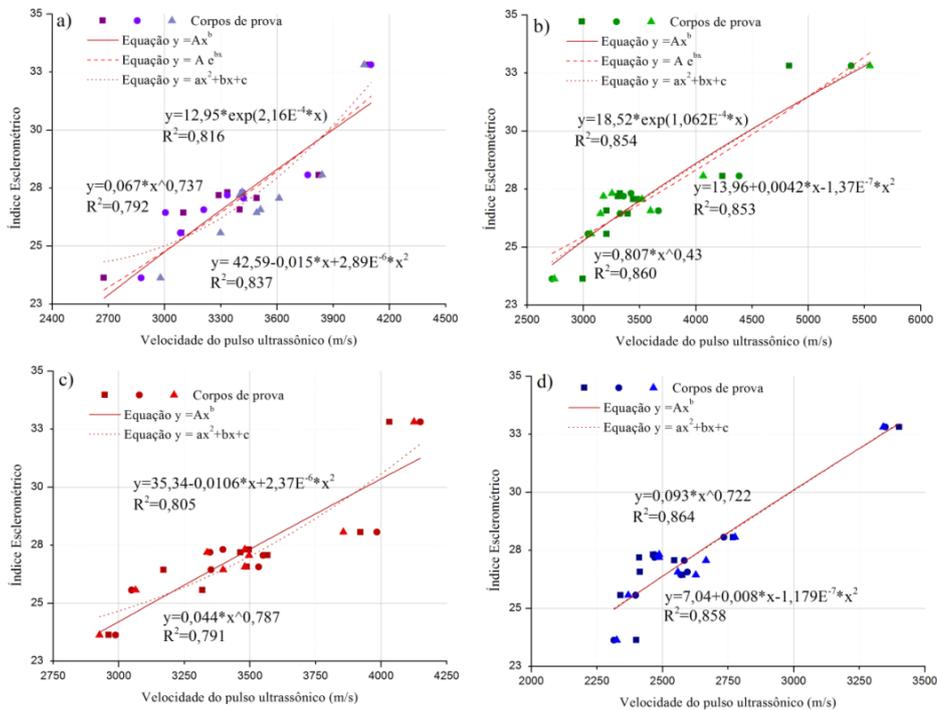
A extrapolação da aplicabilidade das equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972) também foram realizadas nesta segunda etapa dos ensaios. Para os ensaios nas lajes, os resultados apresentaram uma representatividade inferior a extrapolação nos corpos de prova, como mostram as Figuras 6.58 e 6.59. No entanto, a regressão polinomial quadrática representou de maneira aceitável o comportamento da relação entre o índice esclerométrico e a velocidade de ultrassom para a transmissão indireta de 30 centímetros de distância. Logo, a princípio, é cabível aceitar a utilização da equação polinomial quadrática sugerida para relacionar estes parâmetros nestas circunstâncias de ensaio.

Figura 6.58 - Relação entre índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio da laje alveolar com armadura: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.59 -Relação entre índice esclerométrico e velocidade do pulso ultrassônico para o ensaio da laje alveolar sem armadura: a) leitura direta; b) leitura indireta de 15 cm; c) leitura indireta de 30 cm; d) leitura indireta de 45 cm.



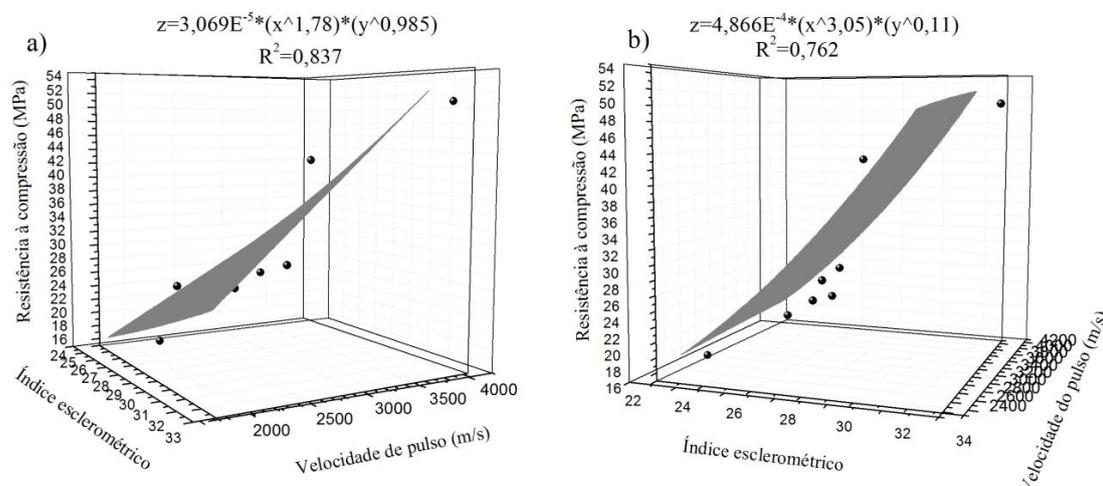
Fonte: Autora (2017)

A correlação múltipla entre todos os ensaios realizados com a laje foi representada pela Equação 6.13, assim como foi realizado anteriormente para os corpos de prova. Como os melhores resultados do ultrassom foram obtidos nas leituras de transmissão direta e indireta com distância de 30 cm, os resultados foram analisados para estes dois casos.

Assim como nos corpos de prova, foi possível obter uma boa correlação entre os fatores dos ensaios a partir da Equação 6.13. Todavia, também não foi possível estabelecer uma relação entre os parâmetros e a influência da presença da armadura, visto que os fatores variaram bastante (Figura 6.60 e Figura 6.61).

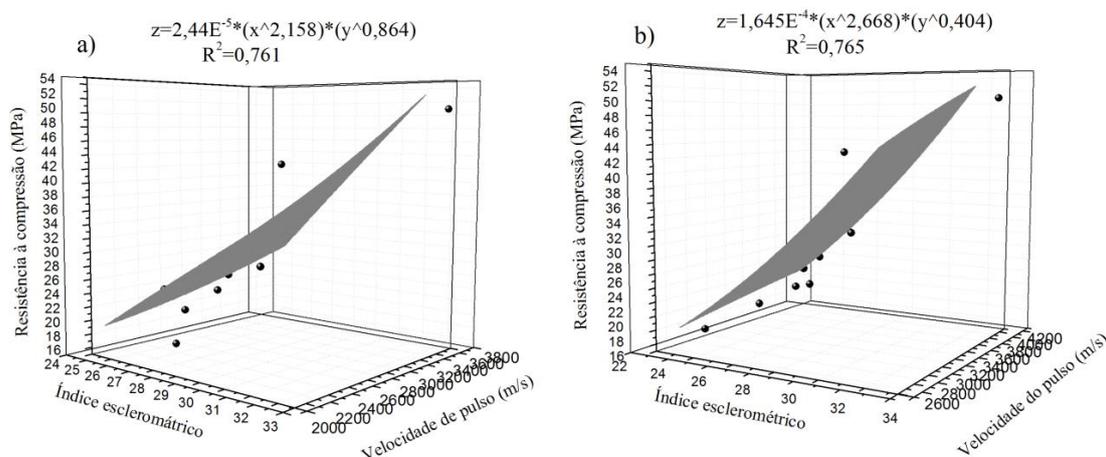
Outro fator que é possível analisar é a diferença entre os parâmetros das equações com e sem a presença do aço para os dois tipos de leitura do ultrassom, sendo possível adotar que a presença deste na laje interfere de maneira generalizada nos resultados dos ensaios.

Figura 6.60 - Correlação entre os ensaios de esclerometria, ultrassom leitura direta e resistência à compressão: a) laje com armadura; b) laje sem armadura.



Fonte: Autora (2017)

Figura 6.61 - Correlação entre os ensaios de esclerometria, ultrassom leitura indireta de 30 cm e resistência à compressão: a) laje com armadura; b) laje sem armadura.



Fonte: Autora (2017)

### 6.3. Analogia entre os ensaios

#### 6.3.1. Ensaio de compressão

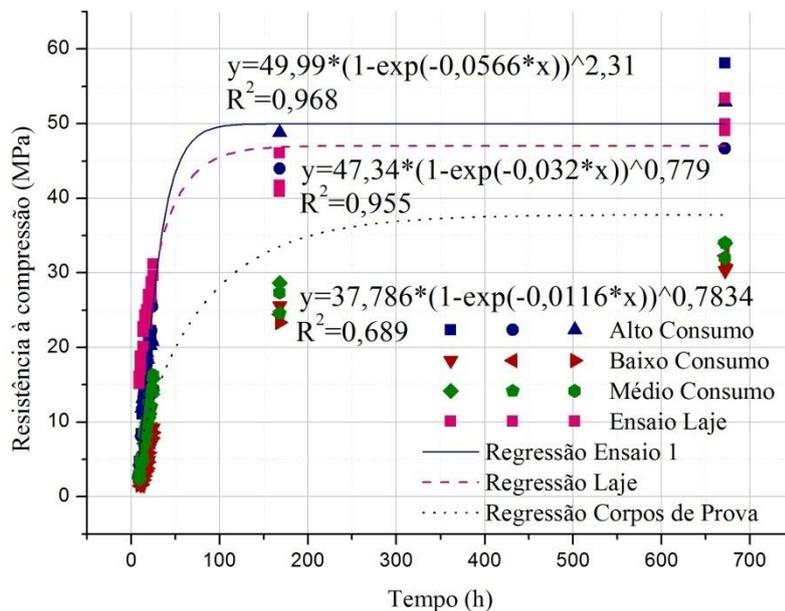
O ensaio mais consagrado e difundido entre todos os realizados foi o que apresentou resultados quase que idênticos para a caracterização do concreto e para o concreto usado na laje alveolar, visto que os ensaios foram realizados de forma idêntica nas duas etapas. Nos dois casos a Equação 6.2 sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015) foi mais precisa que a

apresentada pela ABNT NBR 6118:2014, visto que esta segunda apresenta resultados mais conservadores a favor da segurança para o concreto com 28 dias de idade.

Para o concreto pobre em cimento, a Equação 6.5 da ABNT NBR 6118:2014 deve ser usada com cautela, pois ela majora a resistência do concreto ao longo de todas as suas primeiras 60 horas, aproximadamente.

Assim como mostrado na Figura 6.62 é possível obter uma boa representatividade dos resultados do concreto da laje a partir de ensaios realizados em corpos de prova, quando estes apresentarem o mesmo traço, até porque o ensaio é realizado a partir do mesmo procedimento.

Figura 6.62- Comparação dos resultados do ensaio de compressão nos corpos de prova e na laje.



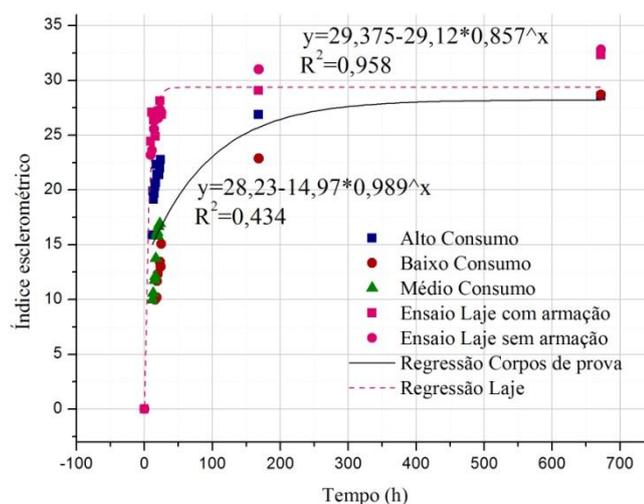
Fonte: Autora (2017)

### 6.3.2. Ensaio de esclerometria

O ensaio de esclerometria se apresentou como um excelente auxílio na obtenção da resistência do concreto nas primeiras idades. Nos dois tipos de ensaios realizados foi possível definir uma relação exponencial entre o ganho de resistência superficial e o tempo através da Equação 6.6.

A fim de se obter, quantitativamente, a diferença entre as equações encontradas para as duas etapas de ensaio, gerou-se uma regressão única para os três traços de concreto do ensaio dos corpos de prova, e uma para a laje com e sem armadura, como mostrado na Figura 6.63.

Figura 6.63 -Comparação dos resultados do ensaio de esclerometria nos corpos de prova e na laje.



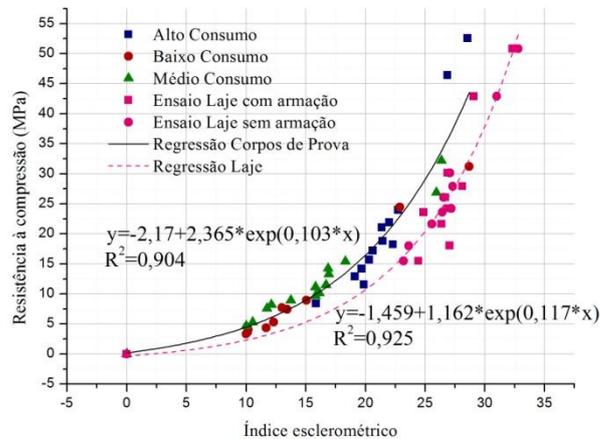
Fonte: Autora (2017)

Utilizando as equações obtidas a partir dos ensaios com corpos de prova, foram projetados valores para o índice esclerométrico na laje. A partir disto, calculou-se que a diferença entre os resultados projetados e os obtidos em ensaio para as primeiras 24 horas ficou em torno de 60%; para idades mais avançadas, esta diferença reduz para 8,5%. Em ambos os casos, os dados estão a favor da segurança, pois o índice calculado para laje a partir da equação do corpo de prova é inferior ao obtido em ensaio.

A correlação predeterminada para o esclerômetro em idades mais avançadas se apresentou representativa para as primeiras idades do material, com a ressalva que, em alguns momentos, a resistência obtida foi ligeiramente inferior a ensaiada. Isto aconteceu por influência dos alvéolos. Comparando os ensaios dos corpos de prova maciços e o da laje, percebe-se que no primeiro o comportamento da relação entre a resistência e o índice nas primeiras idades do concreto é exatamente como esperado para o equipamento; enquanto que no segundo ocorre um aumento do índice esclerométrico para uma mesma resistência. Pode-se concluir que a presença dos tubos de PVC para representar os alvéolos acarretou um aumento na medição da resistência superficial da peça. A presença do aço não interferiu nos resultados do ensaio de esclerometria.

Tendo como base os dois ensaios, foi possível definir que a Equação 6.7 representa de maneira satisfatória a relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico ao longo de todas as idades, independente da presença de armadura e de alvéolos. Desta forma, definiram-se parâmetros únicos para cada tipo de ensaio como mostrado na Figura 6.64.

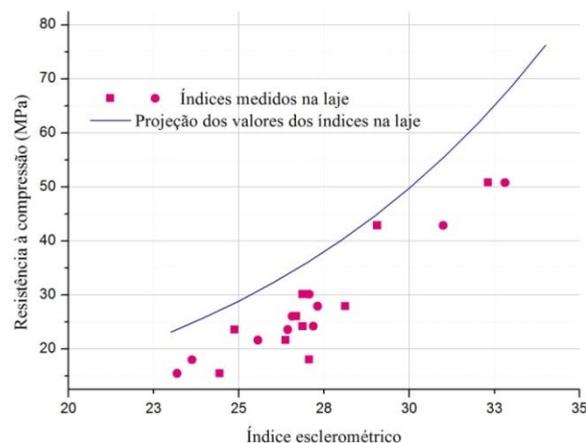
Figura 6.64- Comparação da relação entre o ensaio de esclerometria e resistência à compressão nos corpos de prova e na laje.



Fonte: Autora (2017)

Do mesmo modo que foi feito para o crescimento do índice esclerométrico ao longo do tempo, valores da resistência à compressão na laje foram projetados a partir da equação geral que correlaciona a resistência com o índice esclerométrico, obtida nos ensaios com os corpos de prova. A diferença percentual entre os resultados obtidos nos ensaios da laje e os projetados a partir da equação definida na caracterização do concreto variou entre 4% e 80%. Em todas as idades, os valores de projeção obtidos para a resistência da laje a partir da esclerometria são superiores aos encontrados no ensaio realizado diretamente na laje. A Figura 6.65 apresenta graficamente a diferença entre os valores projetados e os valores obtidos no ensaio realizado na laje.

Figura 6.65 - Relação entre os dados projetados e os ensaiados.



Fonte: Autora (2017)

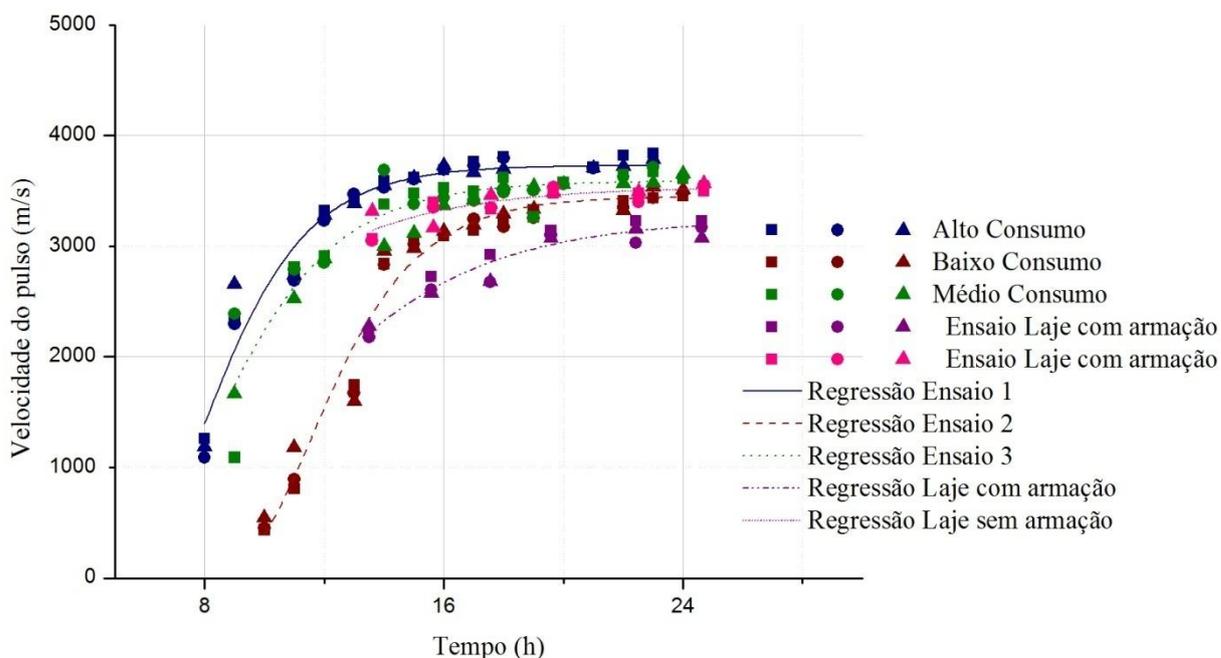
Os resultados projetados apresentam alto índice de majoração da resistência real do concreto. Portanto, é possível afirmar que a projeção da resistência do concreto na laje não deve ser executada tendo como base a relação obtida entre a resistência e o índice esclerométrico dos ensaios em corpos de prova.

### 6.3.3. Ensaio de Ultrassom

A presença da fôrma interferiu nos resultados do ensaio de caracterização do concreto de forma que descaracterizou os resultados obtidos aos 7 e 28 dias. Deste modo, inviabilizou uma analogia entre os resultados da primeira etapa de ensaio e os resultados encontrados no ensaio da laje alveolar e em estudos anteriores. Como também, prejudicou a utilização da leitura do tipo direta para caracterizar o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo.

Em todos os ensaios foi possível correlacionar a resistência com o tempo a partir da equação sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015) (Equação 6.2), principalmente em se tratando das primeiras idades. No entanto, não foi possível determinar uma única lei para todos os traços e ocasiões de ensaio (Figura 6.66 e Tabela 6.6).

Figura 6.66 - Comparação dos resultados do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 cm nos corpos de prova e na laje.



Fonte: Autora (2017)

Tabela 6.6 – Tabela com as equações obtidas para o ultrassom leitura indireta de 30 cm e curvas apresentadas da Figura 6.66.

Regressões	Equações	Coefficiente de Correlação
Alto Consumo	$y=3730,3*(1-\exp(-0,497*x))^{51,96}$	0,945
Médio Consumo	$y=3589,55*(1-\exp(-0,42*x))^{31,4}$	0,8744
Baixo Consumo	$y=3450,24*(1-\exp(-0,492*x))^{297,39}$	0,965
Laje sem armadura	$y=3538,69*(1-\exp(-0,272*x))^{4,72}$	0,706
Laje com armadura	$y=3249,43*(1-\exp(-0,265*x))^{13,5}$	0,921

Fonte: Autora (2017)

Dentre todos os tipos de leitura testados, os que apresentaram resultados mais satisfatórios foram o posicionamento direto dos transdutores e o indireto a 30 centímetros de distância entre eles. Tendo em vista a praticidade do ensaio, o posicionamento indireto apresentou-se como a melhor alternativa.

Diferentemente do imaginado, a presença de armadura longitudinal na laje alveolar não interferiu na velocidade de propagação do pulso do ensaio.

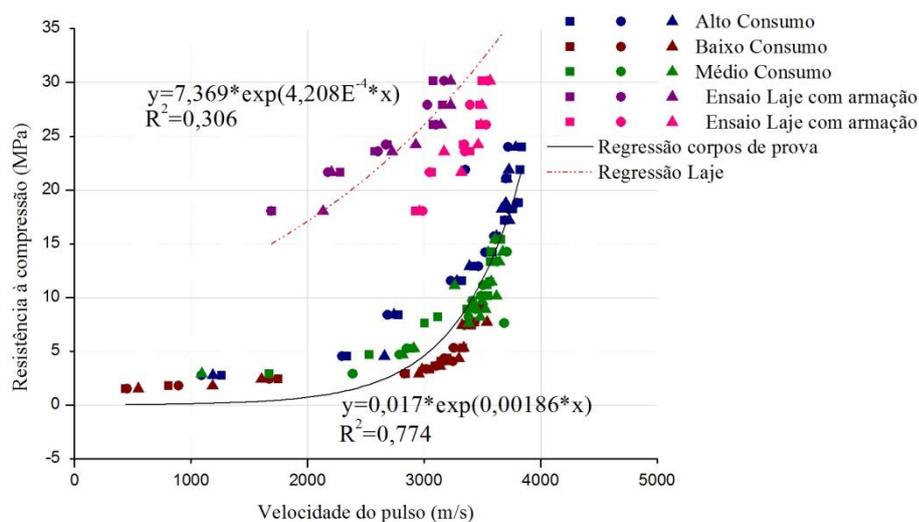
Em todas as regressões exponenciais do tipo da Equação 6.2, por conta do número reduzido de leituras após as 24 horas, ocorreu o surgimento de um patamar nas curvas o que não condiz com o comportamento do material ao longo do seu ganho de resistência.

Todas as equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972) para a relação resistência e velocidade de pulso ultrassônico, apresentaram-se representativas para todos os resultados obtidos nos ensaios. Contudo, cada uma se adaptou melhor para diferentes situações. Desta forma, optou-se por adotar a Equação 6.11 como solução única para os ensaios, gerando uma única equação para os três traços ensaiados com os corpos de prova; e uma para a laje com e sem armação (Figura 6.67).

Apesar da diferença entre os resultados está a favor da segurança, a diferença da grandeza numérica entre eles torna inadmissível correlacionar estes dois tipos de meios ensaiados.

Portanto, não foi possível estabelecer uma lei geral que regesse de maneira absoluta esta relação, e consagrasse o método como alternativa viável para a definição da resistência do concreto a partir do ultrassom, de maneira prática.

Figura 6.67 - Comparação da relação da resistência à compressão e a velocidade de pulso do ensaio de ultrassom leitura indireta de 30 cm nos corpos de prova e na laje.



Fonte: Autora (2017)

A extrapolação da aplicabilidade das equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972) para a correlação entre o índice esclerométrico e a velocidade de pulso ultrassônico não apresentou uma representatividade alta dos dados. Contudo, foi admissível aceitar a utilização da equação polinomial quadrática como solução temporária para relacionar estes parâmetros nas circunstâncias dos ensaios realizados.

Os resultados para as duas etapas do ensaio em relação à regressão múltipla comprovam que a Equação 6.13 supre o propósito de correlacionar os três parâmetros dos ensaios de maneira representativa. Entretanto, não foi possível obter uma equação universal para todos os ensaios realizados.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo correlacionar a velocidade de pulso do ensaio não destrutivo de ultrassom, preferencialmente posição de transmissão indireta, e a resistência à compressão axial nas primeiras idades, de forma a utilizar os resultados em corpos de prova como uma boa representação dos resultados em lajes alveolares.

Ensaio como o de tempo de pega e de esclerometria foram utilizados ao longo do trabalho com o intuito de auxiliarem na obtenção da resistência nas primeiras idades. Os ensaios não destrutivos podem ser empregados para ajudar no controle tecnológico do concreto utilizado na produção de lajes alveolares pré-fabricadas, onde a liberação da protensão ocorre com o concreto nas primeiras idades.

A fim de se obter a velocidade do pulso ultrassônico e as resistências, foram realizados ensaios no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC) em duas etapas. A primeira em corpos de prova e a segunda em uma laje alveolar. Na primeira etapa foram realizados ensaios com três traços diferentes, sendo a diferença entre eles o teor de cimento.

Para a determinação do tempo de pega do concreto, foram usados os dois métodos sugeridos pela norma ABNT NBR NM 9:2003: analítico e gráfico; além de uma análise analítica diferente da apresentada na norma. Com estes processos, foi possível confirmar que independentemente do tipo de regressão feita para os dados obtidos, se a equação apresentar uma representatividade igual ou superior a 0,98, como descrito na norma, esta pode ser usada para a obtenção do tempo de pega de maneira que o resultado seja coerente com o método gráfico.

Apesar do monitoramento com o ultrassom ter sido iniciado após o final da pega, também se constatou, com o ensaio de tempo de pega, que quando o concreto atingiu uma velocidade próxima a velocidade do pulso ultrassônico na água, o final da pega já havia ocorrido. Desta forma, é possível afirmar que o valor da velocidade de pulso da água, 1430 m/s, pode ser adotado como parâmetro de referência do final da pega no concreto.

O ensaio mais consagrado entre os executados nesta pesquisa é o ensaio de compressão axial. Para as duas etapas dos ensaios os procedimentos do ensaio de resistência à compressão foram exatamente iguais. Portanto, fica claro que, para este ensaio, a diferença entre os resultados foi somente de acordo com a mudança de traço.

Em relação à equação definida pela ABNT NBR 6118:2014 para a determinação da resistência à compressão do concreto em idades inferiores a 28 dias, quando não for possível a execução de ensaios, foi observado que ela apresenta uma boa representatividade das resistências do concreto. Contudo, deve-se ter cautela quando a mesma for utilizada para calcular a resistência do concreto nas primeiras idades, pois em alguns casos ela apresentou uma resistência três vezes maior que a obtida em ensaio, o que superestima a capacidade do concreto, podendo causar problemas de segurança na estrutura.

O ensaio de esclerometria se apresentou como um excelente auxílio na determinação da resistência do concreto. Como as propriedades dos ensaios crescem de maneira proporcional ao longo do tempo, é possível correlacioná-las de modo que a partir de uma se obtenha a outra. A curva que correlaciona a resistência ao índice esclerométrico, sugerida pela empresa responsável pela fabricação do esclerômetro usado no ensaio, apresentou uma excelente representatividade dos resultados. Desta forma, é possível adotar uma extensão desta curva, em caráter provisório, como solução para correlacionar os resultados do ensaio de resistência e esclerometria nas primeiras idades, mesmo que ela não tenha sido obtida para este propósito. A presença da armadura na laje não interferiu nos resultados dos ensaios.

A partir da equação polinomial obtida para os corpos de prova que correlaciona a resistência ao índice esclerométrico, determina-se que a resistência a compressão é, aproximadamente, de 5 a 4% do valor do índice esclerométrico ao quadrado, sendo essa variação dependente do consumo de cimento do concreto. A diferença entre os valores projetados com a equação polinomial obtida para os corpos de prova e os dados obtidos diretamente no ensaio da laje é inferior a 10%. Portanto, torna-se viável definir a resistência do concreto a partir da dureza superficial do material em corpos de prova.

No ensaio de ultrassom foi necessário realizar as leituras com o concreto ainda dentro da fôrma, em virtude destes não apresentarem resistência suficiente para desmolde nas primeiras idades, o que interferiu nos resultados. As principais influências que a presença da fôrma causou foram na leitura direta, tornando este tipo de leitura inviável; e nas idades de 7 e 28 dias, em virtude da retração que o concreto sofreu e que acarretou em um espaçamento entre o concreto e a fôrma. Desconsiderando esta interferência, percebeu-se que em todos os casos a velocidade inicial é superior a velocidade do pulso ultrassônico no ar; e a velocidade final, inferior a velocidade do aço, como esperado pela literatura.

Dentre todos os tipos de transmissão indireta realizadas, a que apresentou resultado mais consistente foi a leitura com os transdutores a 30 centímetros de distância. Para o ensaio realizado diretamente na laje alveolar, notou-se que a leitura direta também apresenta

resultados satisfatórios. Todavia, em virtude deste tipo de transmissão ser mais trabalhosa, sugere-se que o foco permaneça na leitura indireta de 30 cm.

Com a laje, também foi possível verificar que a presença da armadura não interferiu nos resultados da leitura do ultrassom. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados com uma armadura de diâmetro pequeno e a propagação da onda foi transmitida de maneira perpendicular a armadura.

A equação sugerida por Haach, Juliani & Da Roz (2015) para a determinação da velocidade pelo tempo, apresentou-se como uma boa representação dos dados. Contudo, como foram coletados dados em poucas idades após as 24 horas, a curva apresentou um patamar que não caracteriza o comportamento do concreto, o que deve ser analisado e considerado quando esta for utilizada. Além disso, não foi possível gerar uma equação universal que pudesse representar o crescimento da velocidade do pulso para todos os tipos de concreto, e tornasse este ensaio não destrutivo prático para o uso no controle de qualidade de lajes alveolares.

No que diz respeito à relação entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultrassom, todas as equações sugeridas por RILEM NDT1 (1972) são boas alternativas para a correlação entre os fatores. Entretanto, não foi possível determinar uma relação universal para todos os traços de concreto.

A partir dos dados, confirmou-se que a correlação múltipla entre os três ensaio é possível de ser encontrada, e apresenta uma boa representatividade dos resultados. Todavia, não foi possível obter valores de constantes universais para diferentes traços de concreto, com e sem a interferência da armadura.

Assim sendo, fica claro que, apesar de não se ter alcançado uma equação universal para correlacionar os ensaios, é possível ter um bom controle tecnológico da resistência do concreto a partir dos ensaios não destrutivos. Por este motivo, é necessário realizar mais alguns ensaios para se obter parâmetros únicos que possam ser utilizados de maneira generalizada. Algumas sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas no tópico subsequente.

## **7.2. Sugestão para trabalhos futuros**

Este trabalho foi de caráter exploratório e serviu como uma direção para trabalhos futuros que desejem se aprofundar no tema. Para pesquisas futuras, sugerem-se alguns pontos que devem ser melhorados e aprofundados.

- a) Executar as leituras com o ensaio do ultrassom a partir do instante que o concreto for moldado, de forma a capturar o início e fim de pega e definir de maneira precisa sua respectiva velocidade característica.
- b) Manter o mesmo horário das leituras em todos os ensaios realizados em diferentes traços, de maneira que a correlação entre os mesmos seja mais precisa.
- c) Explorar a caracterização do concreto com diferentes tipos de corpos de prova, uma maior quantidade de traços, e uma maior quantidade de leituras ao longo do tempo.
- d) Realizar os ensaios de ultrassom transmissão indireta de 30 centímetros de distância de forma que as leituras sejam contínuas nos corpos de prova durante 28 dias.
- e) Analisar de maneira mais detalhada a correlação múltipla entre os ensaios não destrutivos para a obtenção da resistência à compressão, variando a forma dos corpos de prova, os tipos de cimento e agregados no traço.
- f) Utilizar outros tipos de materiais para a fôrma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.R** Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. Farmington Hills, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R**. In-place methods to estimate concrete strength. Farmington Hills, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R**. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C125-15b**: Standard terminology relating to concrete and concrete Aggregates. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C597-09**: Standard method for pulse velocity through concrete. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C805-02**: Standard test method for rebound number of hardened concrete. Philadelphia, 2002.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultra-som**: aspectos básicos. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos – ABENDE, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estrutura de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão-Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14861**: Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 9**: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS (ASSAP). **The hollow core floor design and applications**. 1.ed. Belfiore, Verona, Italy, 2002 .

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: PART 202**: Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer. London, 1986.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: PART 203**: Recommendations for measurements of the velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.

BUNGEY, J.H.; MILLARD, S. G. **Testing of Concrete in Structures**, 3ª edição, London, Chapman & Hall, 2006.

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESCU-USP, 2000.

ELLIOTT, K. S. **Precast Concrete Structures**. Butterworth-Heinemann. Oxford, 2002.

HAACH, V.G.; JULIANI, L.M.; Da ROZ, M.R.; **Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early cement**. Construction and Building Materials 96 , 2015.

IRRIGARAY, M.A.P.; PINTO, R.C. de A.; PADARATZ, I.J. **A new approach to estimate compressive strength of concrete by the UPV method**. Revista Ibracon de estruturas e materiais. São Paulo, V. 9, n. 3. Jun.2016.

JULIANI, L.M. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KEATING, J.; et al, **Comparison of shear modulus and pulse velocity techniques to measure the build-up of structure in fresh cement paste used in oil well cementing**. Cement and Concrete Research 19, 1989.

MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

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

MIZUMOTO, C.; et al. **Aspectos técnicos referente a sistemática de controle e produção da laje alveolar de concreto pré-fabricado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-

PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 3, 2013, São Carlos, Anais. São Carlos: 3º PPP, 2013. CD-ROM.

NEPOMUCENO, M.C.S., **Ensaio não destrutivo em betão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Beira Interior, Covilhã, 1999.

NEVILLE, A. M.; **Propriedades do concreto**. 2ªed. São Paulo: PINI, 1997.

PETRUCELLI, N.S. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI. Manual for the design of hollow core slabs**. 2ed. Chicago, IL, U.S.A., 1998.

ROMANO, R.C. de O.; CARDOSO, F.A.;PILEGGI, R.G. Propriedade do concreto no estado fresco . In: ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Vol. I. São Paulo: IBRACON ,2011. p. 453-500.

PROCEQ S.A., **Concrete Test Hammer Types N and NR**: Operating instructions, Zurich, Switzerland.

RILEM NDT 1, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, 1972.**Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials**, RILEM, 2007. Kindle Edition.

SAYERS, C. M; GRENFELL, R.L. **Ultrasonic propagation through hydrating cements**. Ultrasonics 31, 1993.

SIMAVORIAN,D.**Análise do efeito do escoramento no comportamento de lajes de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.

TRTNIK, G. ET AL. **Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste**. Cement and concrete research 38, 2008.



## APÊNDICE A

### MODELO SUGERIDO DE PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM LABORATÓRIO

#### PROCEDIMENTOS

- Concretagem
  - 3 corpos de prova cilíndricos 15x30 cm<sup>2</sup> – ensaio tempo de pega
  - 3 corpos de prova prismáticos 15x15x50 cm<sup>3</sup> – ensaio ultrassom
  - 8 corpos de prova prismáticos 15x15x50 cm<sup>3</sup> – ensaio esclerométrico
  - 48 corpos de prova cilíndricos 10x20 cm<sup>2</sup> – ensaio de compressão
  
- Peneirar na peneira de 4,75mm um volume de 19 L para moldar 3 corpos de prova cilíndricos 15x30 cm<sup>2</sup> para o ensaio de tempo de pega;
- Misturar a argamassa peneirada e moldar. Em seguida, armazenar o corpo de prova coberto por um material impermeável;
- 1-2 horas após a concretagem realizar o ensaio de tempo de pega, no mínimo 7 pontos (tempo sugerido a cada meia hora);
- Marcar as posições das leituras de esclerometria nos corpos de prova
- Medir a fôrma sem concreto
- Após 5h de concretagem (aproximadamente 15horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 5:30h (aproximadamente 15:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 5:45h (às 15:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 6h de concretagem (aproximadamente 16 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 6:30h (aproximadamente 16:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 6:45h (às 16:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente

- Após 7h de concretagem (aproximadamente 17 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 7:30h (aproximadamente 17:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 7:45h (aproximadamente 17:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 8h de concretagem (aproximadamente 18 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 8:30h (aproximadamente 18:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 8:45h (aproximadamente 18:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 9h de concretagem (aproximadamente 19 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 9:30h (aproximadamente 19:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 9:45h (aproximadamente 19:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 12h de concretagem (aproximadamente 22 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
- Após 12:30h (aproximadamente 22:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 12:45h (aproximadamente 22:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 13h de concretagem (aproximadamente 23 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta

- Após 13:30h (aproximadamente 23:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 13:45h (aproximadamente 23:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 14h de concretagem (aproximadamente 24 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 14:30h (aproximadamente 24:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 14:45h (aproximadamente 24:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 15h de concretagem (aproximadamente 1 hora), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 15:30h (aproximadamente 1:30 hora), realizar o ensaio à compressão;
- Após 15:45h (aproximadamente 1:45 hora), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 16h de concretagem (aproximadamente 2 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 16:30h (aproximadamente 2:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 16:45h (aproximadamente 2:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 17h de concretagem (aproximadamente 3 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 17:30h (aproximadamente 3:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 17:45h (aproximadamente 3:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente

- Após 18h de concretagem (aproximadamente 4 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 18:30h (aproximadamente 4:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 18:45h (aproximadamente 4:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 21h de concretagem (aproximadamente 7 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 21:30h (aproximadamente 7:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 21:45h (aproximadamente 7:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 22h de concretagem (aproximadamente 8 horas), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 22:30h (aproximadamente 8:30 horas), realizar o ensaio à compressão;
- Após 22:45h (aproximadamente 8:45 horas), iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 4 dias de concretagem (segunda-feira), realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 4 dias, realizar o ensaio à compressão;
- Após 4 dias, iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  - 2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 28 dias de concretagem, realizar o ensaio de ultrassom:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
- Após 28dias, realizar o ensaio à compressão;
- Após 28 dias, iniciar o ensaio de esclerometria:

1. As leituras devem ser realizadas em 3 corpos de prova diferentes
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Coletar todas as leituras do ultrassom



## APÊNDICE B

### MODELO SUGERIDO DE PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DA LAJE ALVEOLAR PRODUZIDA NO LABORATÓRIO

#### PROCEDIMENTOS

- Concretagem
  - 1 Laje alveolar de  $10 \times 50 \times 200 \text{ cm}^3$  – ensaio de ultrassom e esclerometria
  - 48 corpos de prova cilíndricos  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  – ensaio de compressão
- Após a concretagem girar a cada 30-45 min os tubos de PVC que moldam os alvéolos
- Marcar as posições das leituras de esclerometria na laje
- Após 7h da concretagem, desmoldar a laje alveolar e retirar os tubos de PVC
- Após 8h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
  - 3. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 4. Realizar leitura direta
  - 5. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 8:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
  - 3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 9h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
- Após 9:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
  - 3. Realizar 16 medidas
  - 4. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 10h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
  - 3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 10:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
  - 1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  - 2. Realizar leitura direta
  - 3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 11h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;

- Após 11:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. Realizar 16 medidas
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 13h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 13:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 14h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
- Após 14:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. Realizar 16 medidas
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 15h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 15:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 16h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
- Após 16:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
  1. Realizar 16 medidas
  2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
- Após 17h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
  2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 17:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
  1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm

2. Realizar leitura direta
  3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 18h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 18:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
  - Após 19h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 19:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 20h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 20:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
  - Após 22h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 22:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 23h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 23:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
  - Após 24h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região sem armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta

3. Realizar a leitura do corpo de prova
- Após 24:30h de concretagem realizar o ensaio de ultrassom na região com armadura:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 25h realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 25:15h iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
  - Após 7 dias de concretagem realizar o ensaio de ultrassom:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 7 dias realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 7 dias iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente
  - Após 28 dias de concretagem realizar o ensaio de ultrassom:
    1. Realizar leitura indireta a 15, 30, 45 cm
    2. Realizar leitura direta
    3. Realizar a leitura do corpo de prova
  - Após 28 dias realizar o ensaio à compressão em 3 corpos de prova;
  - Após 28 dias iniciar o ensaio de esclerometria:
    1. Realizar 16 medidas
    2. Tirar foto de cada medida e realizar a leitura posteriormente

## APÊNDICE C

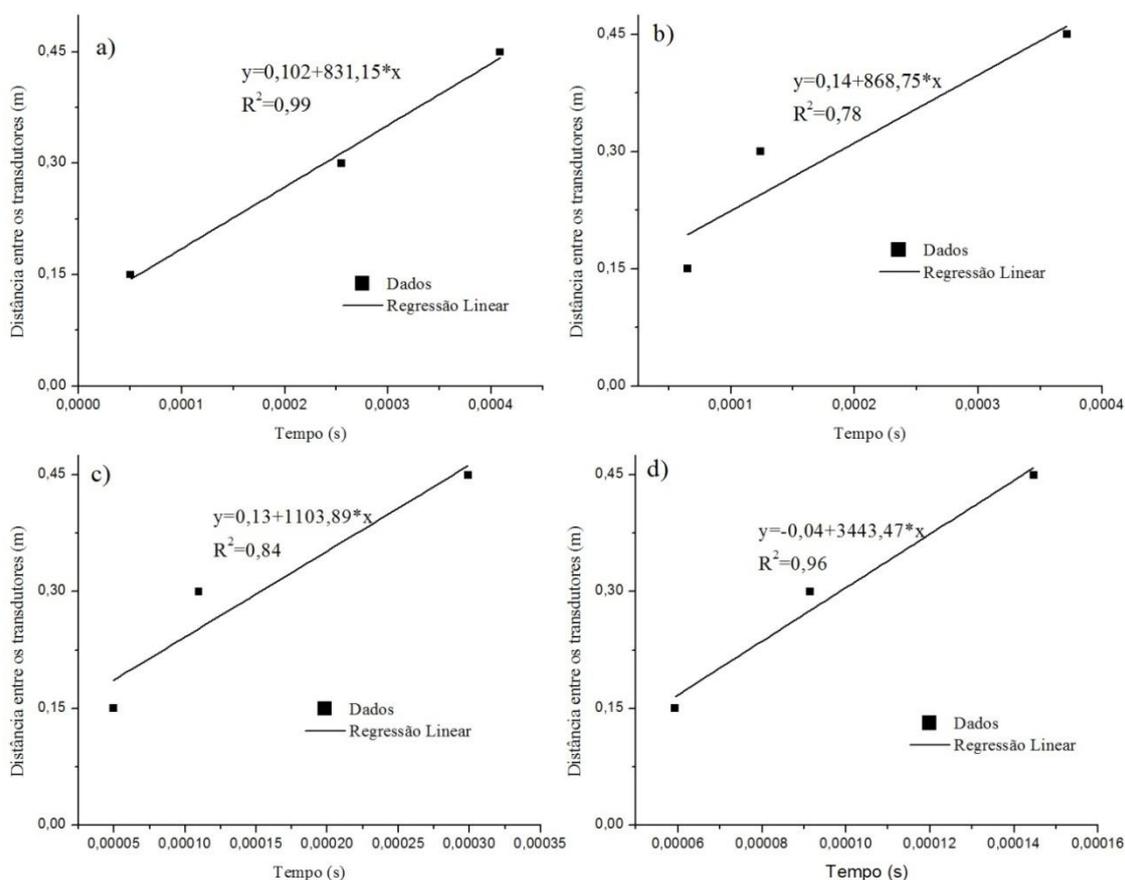
### GRÁFICOS UTILIZADOS PARA A OBTENÇÃO DAS VELOCIDADES DAS LEITURAS INDIRETAS COMO DETERMINADO PELA ABNT NBR 8802:2013

Para determinar a obtenção das velocidades de propagação das ondas através da inclinação das retas foram gerados gráficos para cada hora de leitura de cada traço ensaiado, onde o eixo das abscissas correspondia aos tempos de propagação da onda e o eixo das ordenadas, as distâncias entre o transdutor-emissor e o transdutor-receptor. Os gráficos gerados para cada traço de concreto nas duas etapas de ensaio estão apresentados nos tópicos abaixo.

#### C.1. Ensaio em corpos de prova com concreto com alto consumo de cimento

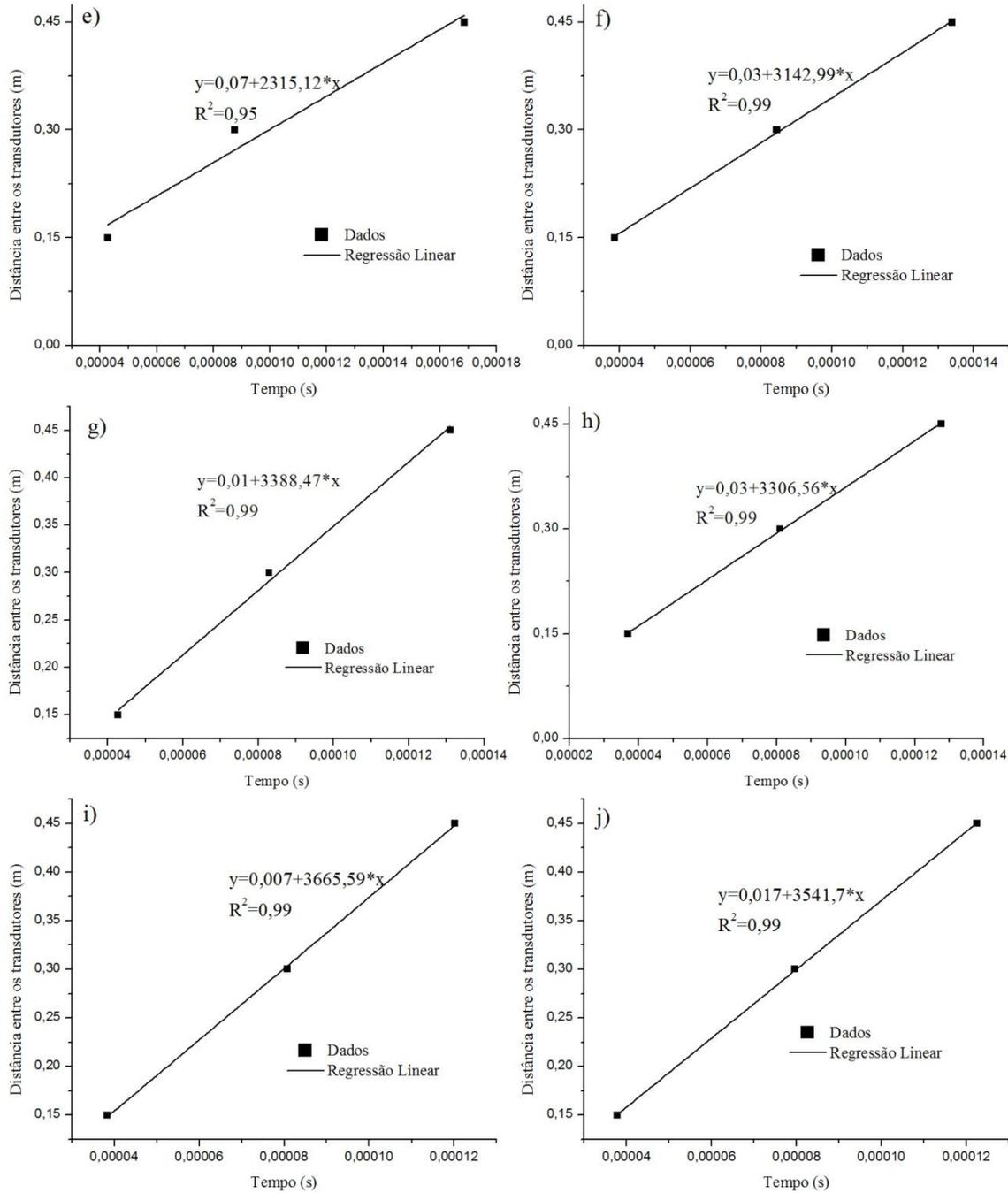
As Figuras C.1 a C.4 apresentam os gráficos gerados para as leituras realizadas no concreto com alto consumo de cimento.

Figura C. 1- Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com alto consumo de cimento: a) Leitura realizada 8 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 9 horas após o ensaio; c) Leitura realizada 11 horas após o ensaio; d) Leitura realizada 12 horas após o ensaio.



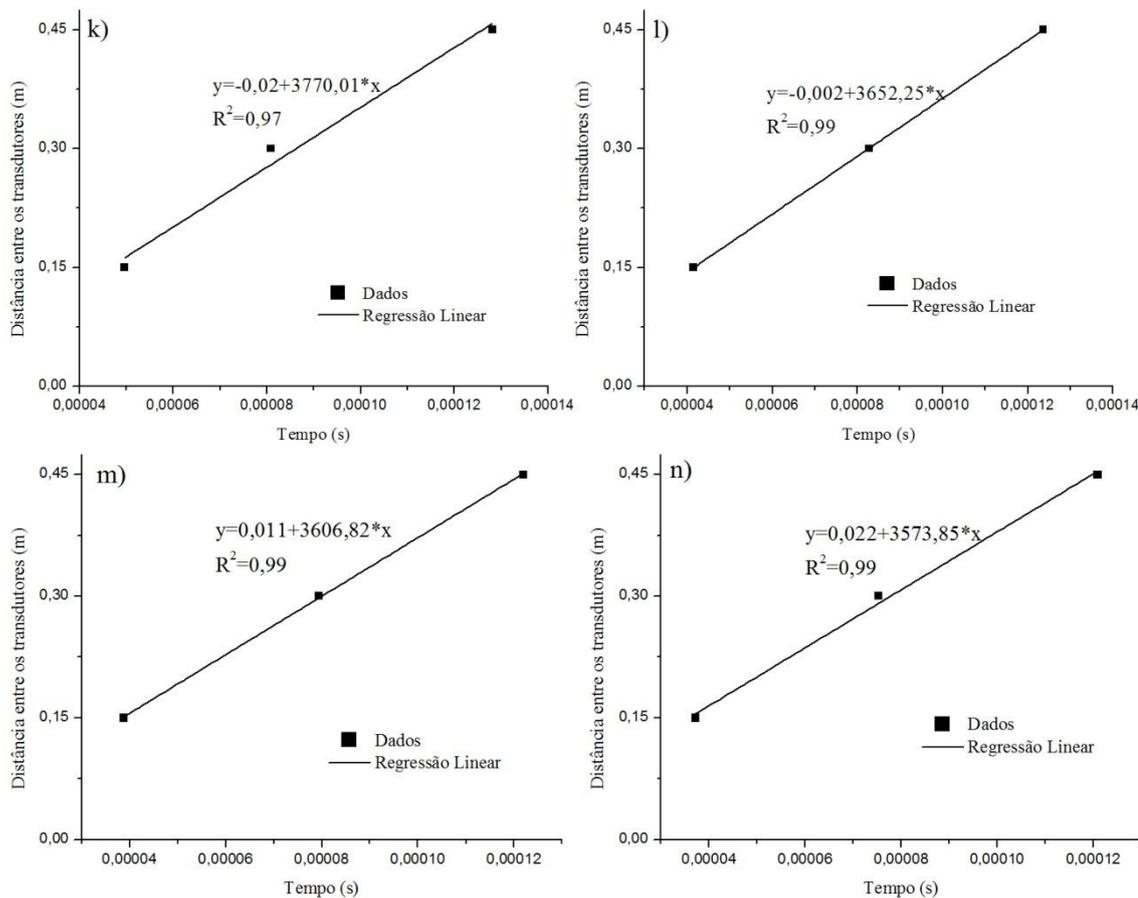
Fonte: Autora

Figura C.2 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com alto consumo de cimento: e) Leitura realizada 13 horas após o ensaio; f) Leitura realizada 14 horas após o ensaio; g) Leitura realizada 15 horas após o ensaio; h) Leitura realizada 16 horas após o ensaio; i) Leitura realizada 17 horas após o ensaio; j) Leitura realizada 18 horas após o ensaio.



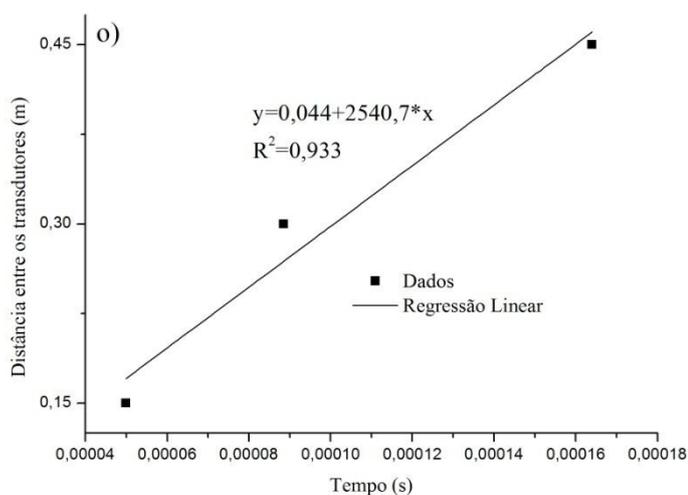
Fonte: Autora

Figura C.3 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com alto consumo de cimento: k) Leitura realizada 21 horas após o ensaio; l) Leitura realizada 22 horas após o ensaio; m) Leitura realizada 23 horas após o ensaio; n) Leitura realizada 7 dias após o ensaio.



Fonte: Autora

Figura C.4- o) Leitura realizada 28 dias após o ensaio.

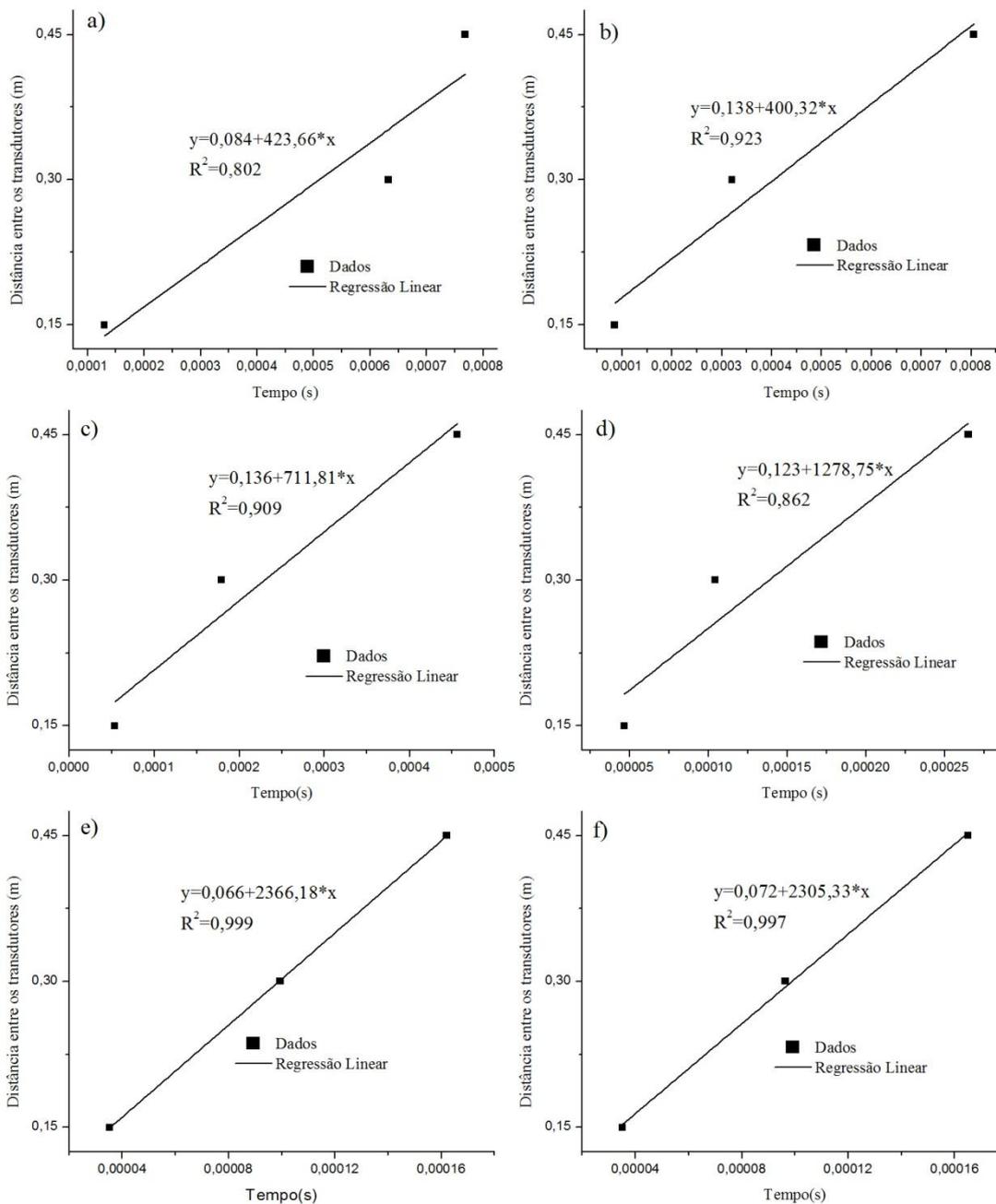


Fonte: Autora

## C.2. Ensaio em corpos de prova com concreto com baixo consumo de cimento

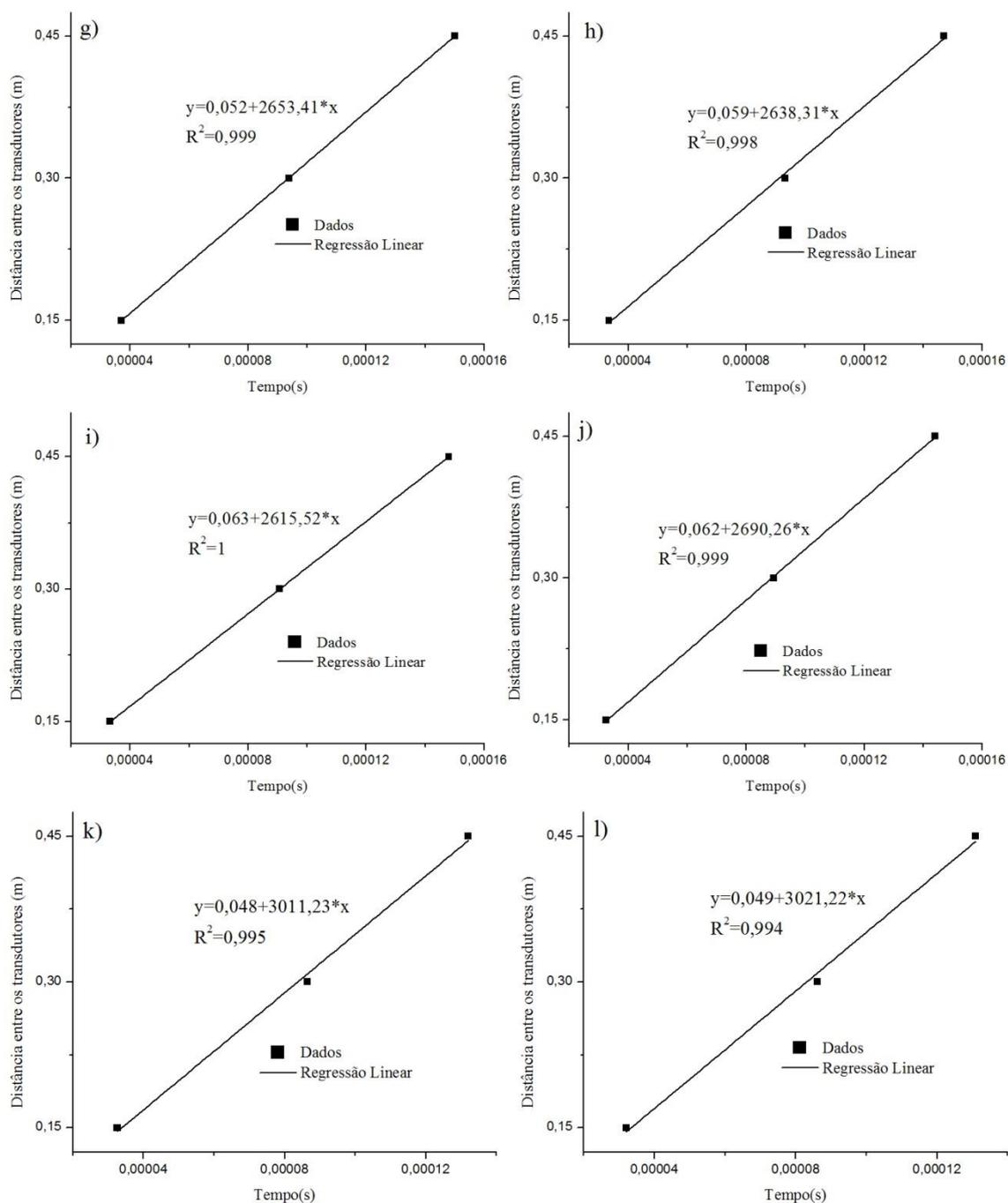
Os gráficos gerados para o concreto com baixo consumo de cimento estão apresentados nas Figuras C.5 a C.7.

Figura C.5 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: a) Leitura realizada 10 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 11 horas após o ensaio; c) Leitura realizada 13 horas após o ensaio; d) Leitura realizada 14 horas após o ensaio; e) Leitura realizada 15 horas após o ensaio; f) Leitura realizada 16 horas após o ensaio.



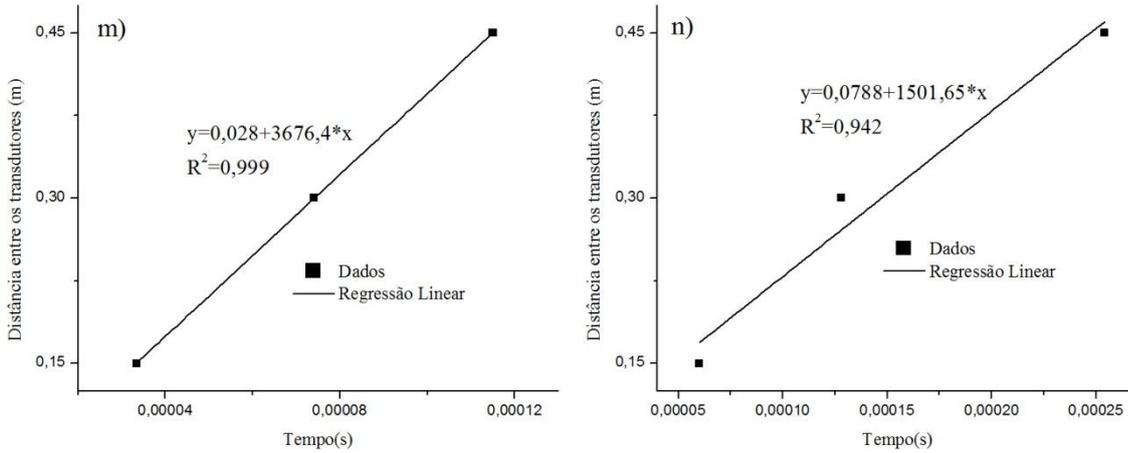
Fonte: Autora

Figura C.6 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: g) Leitura realizada 17 horas após o ensaio; h) Leitura realizada 18 horas após o ensaio; i) Leitura realizada 19 horas após o ensaio; j) Leitura realizada 22 horas após o ensaio; k) Leitura realizada 23 horas após o ensaio; l) Leitura realizada 24 horas após o ensaio.



Fonte: Autora

Figura C.7 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: g) Leitura realizada 7 dias após o ensaio; h) Leitura realizada 28 dias após o ensaio;

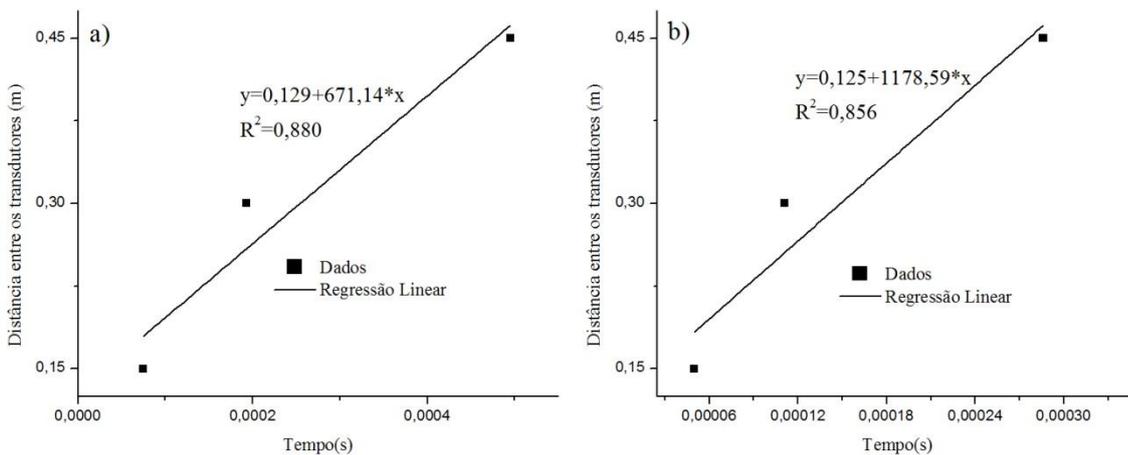


Fonte: Autora

### C.3. Ensaio em corpos de prova com concreto com médio consumo de cimento

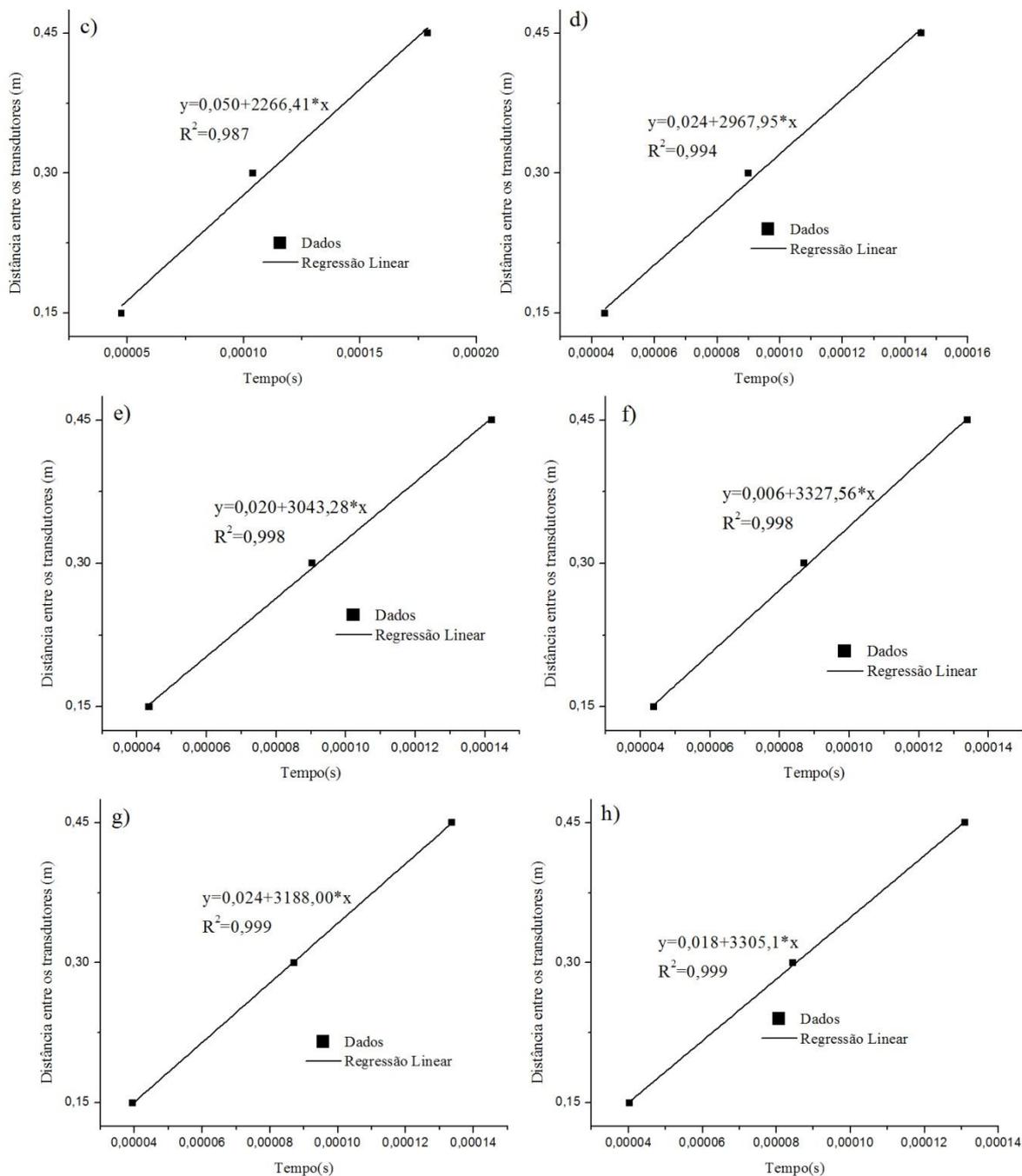
Para o concreto com um consumo de cimento médio foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras C.8 a C.11.

Figura C.8 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com médio consumo de cimento: a) Leitura realizada 9 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 11 horas após o ensaio.



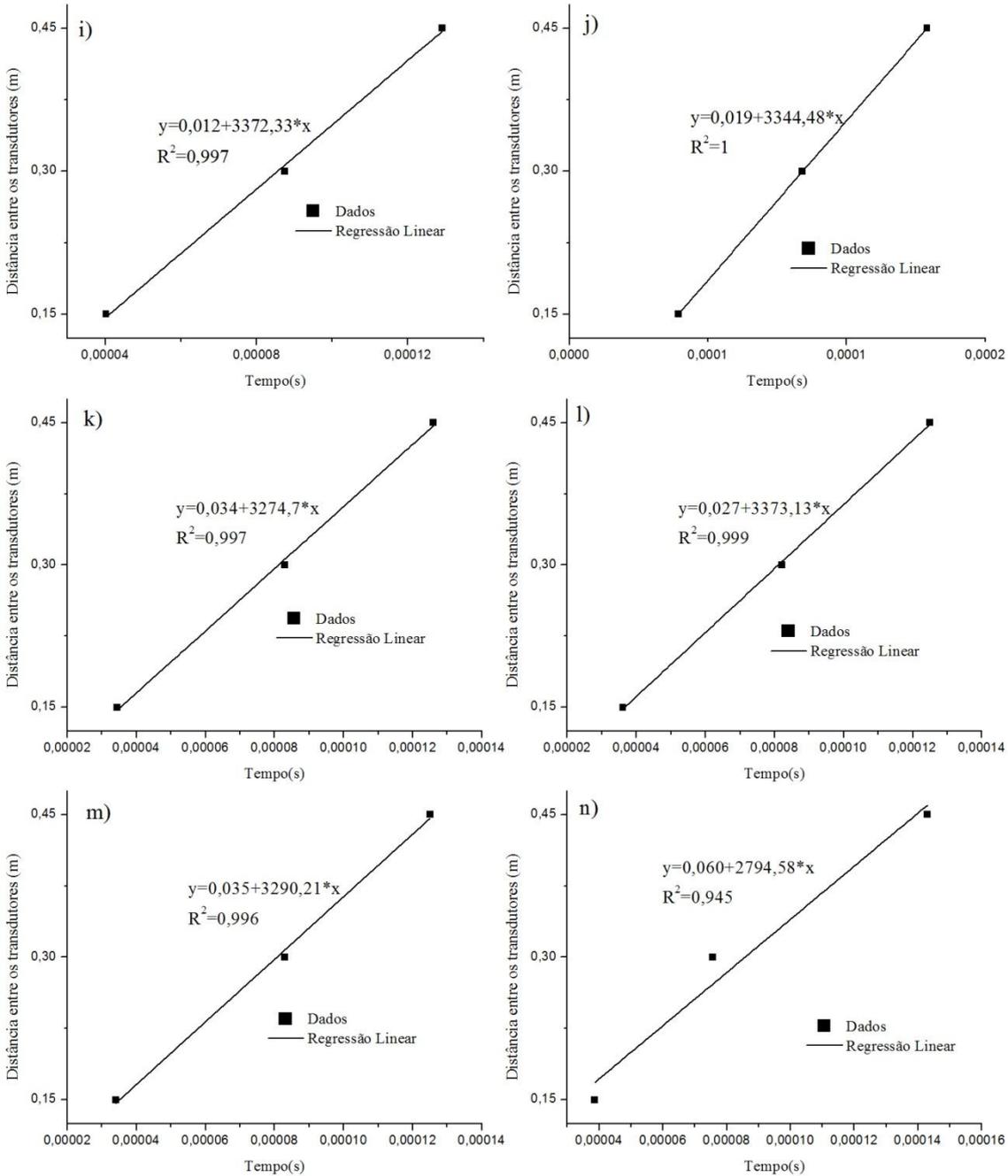
Fonte: Autora

Figura C.9- Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: c) Leitura realizada 12 horas após o ensaio; d) Leitura realizada 14 horas após o ensaio; e) Leitura realizada 15 horas após o ensaio; f) Leitura realizada 16 horas após o ensaio; g) Leitura realizada 17 horas após o ensaio; h) Leitura realizada 18 horas após o ensaio.



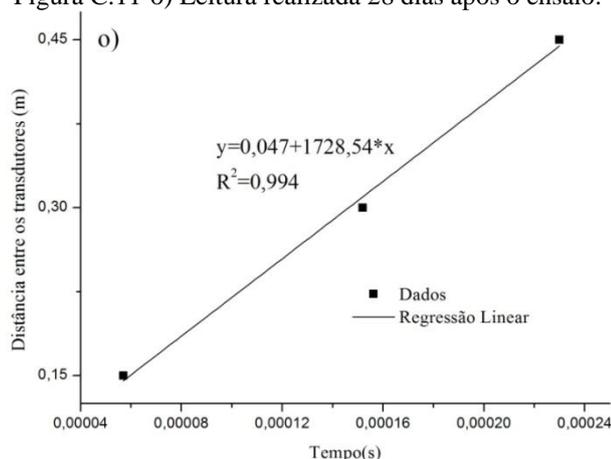
Fonte: Autora

Figura C.10 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: i) Leitura realizada 19 horas após o ensaio; j) Leitura realizada 20 horas após o ensaio; k) Leitura realizada 22 horas após o ensaio; l) Leitura realizada 23 horas após o ensaio; m) Leitura realizada 24 horas após o ensaio; n) Leitura realizada 7 dias após o ensaio.



Fonte: Autora

Figura C.11-o) Leitura realizada 28 dias após o ensaio.

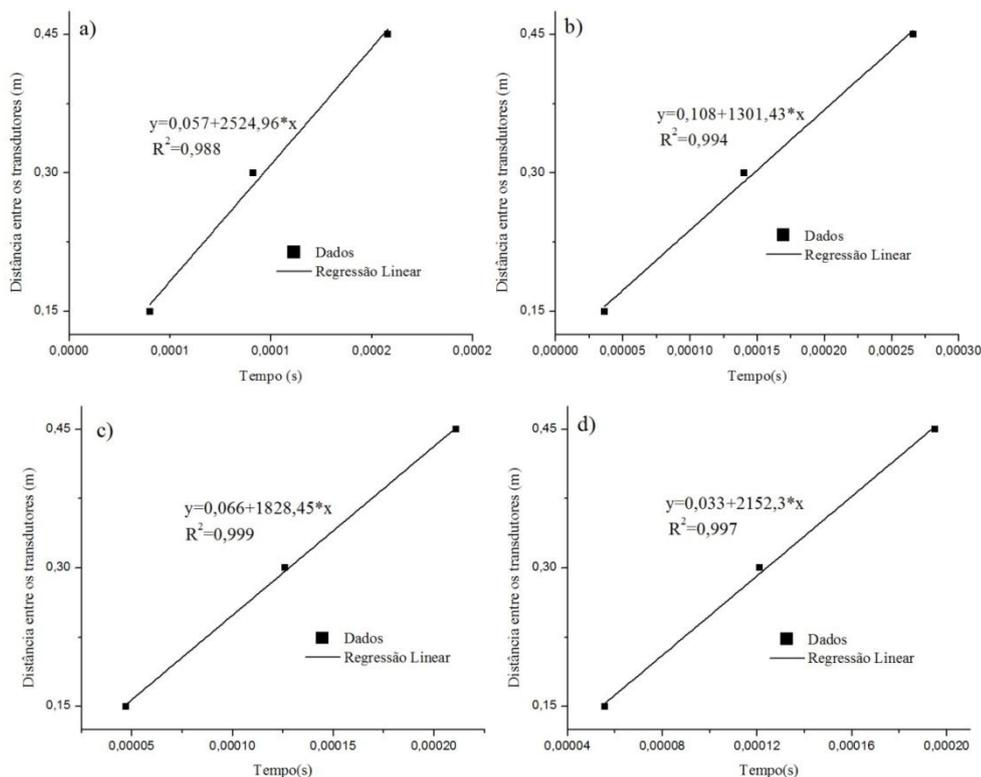


Fonte: Autora

#### C.4. Ensaio na laje Alveolar com armadura

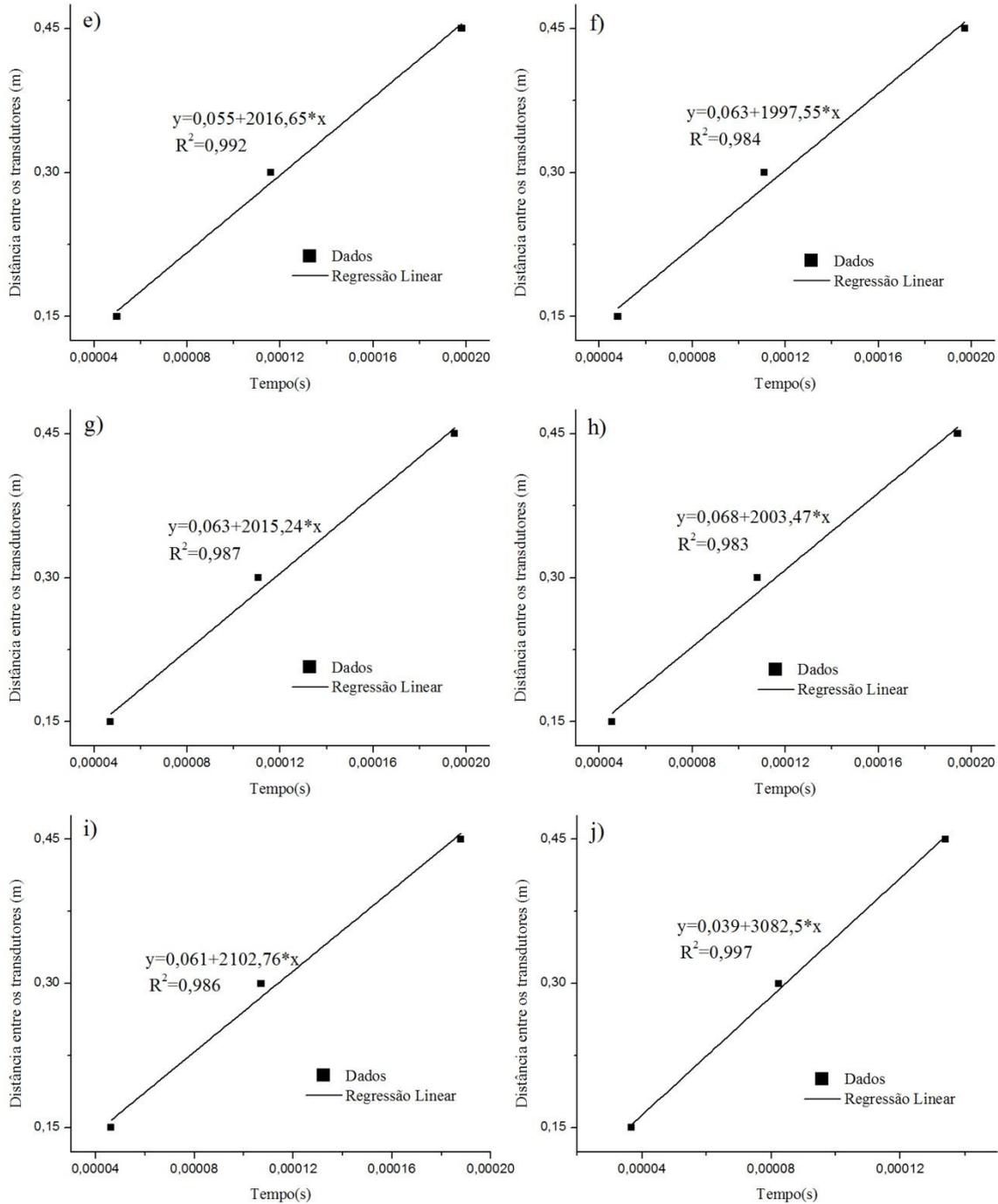
Os gráficos apresentados nas Figuras C.12 e C.13 foram gerados a partir do ensaio na laje alveolar com a presença da armadura para o cálculo da velocidade do pulso ultrassônico para as leituras indiretas.

Figura C.12 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: a) Leitura realizada 8 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 10 horas após o ensaio; c) Leitura realizada 13 horas após o ensaio; d) Leitura realizada 15 horas após o ensaio.



Fonte: Autora

Figura C. 13 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio com baixo consumo de cimento: e) Leitura realizada 17 horas após o ensaio; f) Leitura realizada 19 horas após o ensaio; g) Leitura realizada 22 horas após o ensaio; h) Leitura realizada 24 horas após o ensaio; i) Leitura realizada 7 dias após o ensaio; j) Leitura realizada 28 dias após o ensaio.

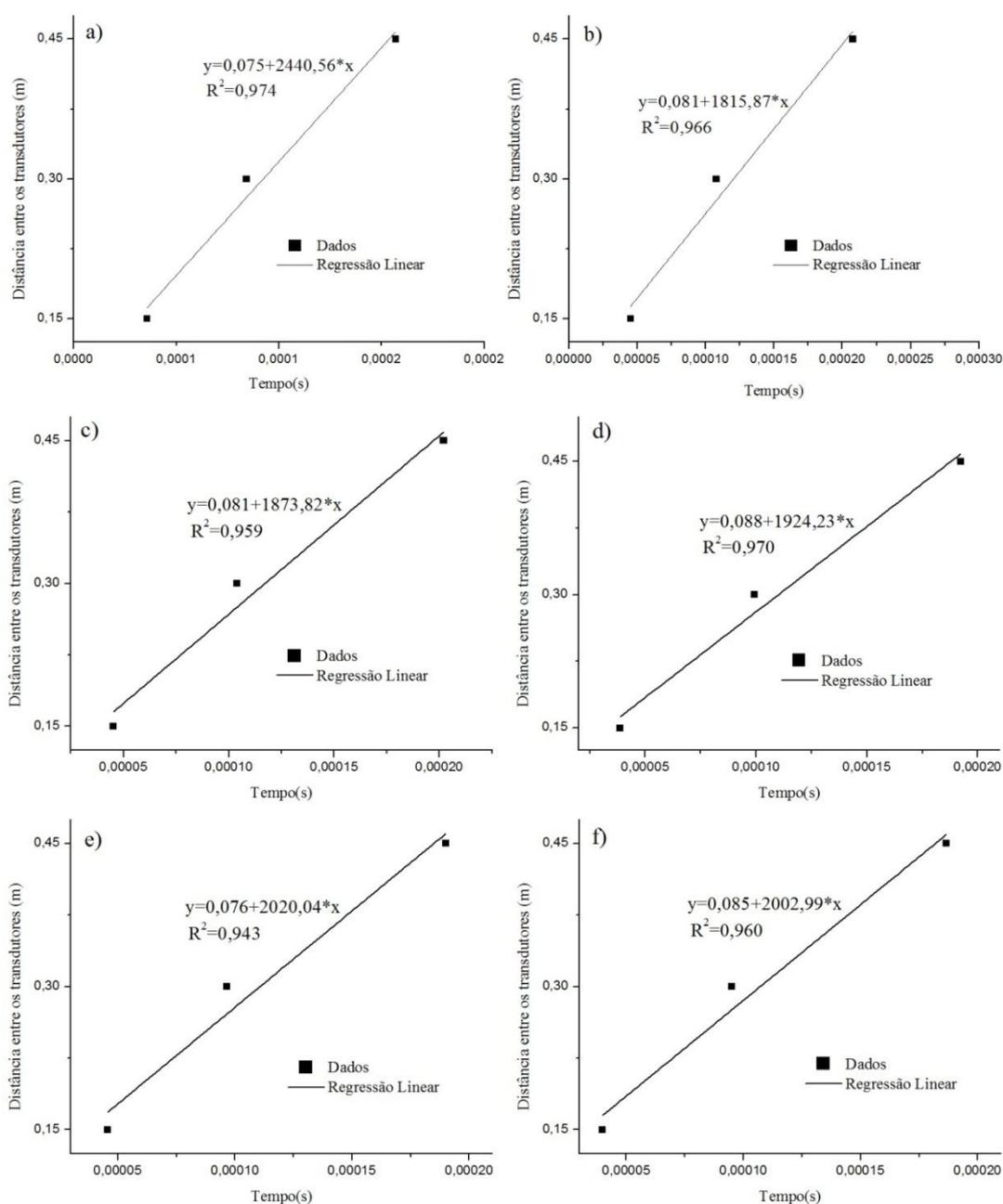


Fonte: Autora

### C.5. Ensaio na laje Alveolar sem armadura

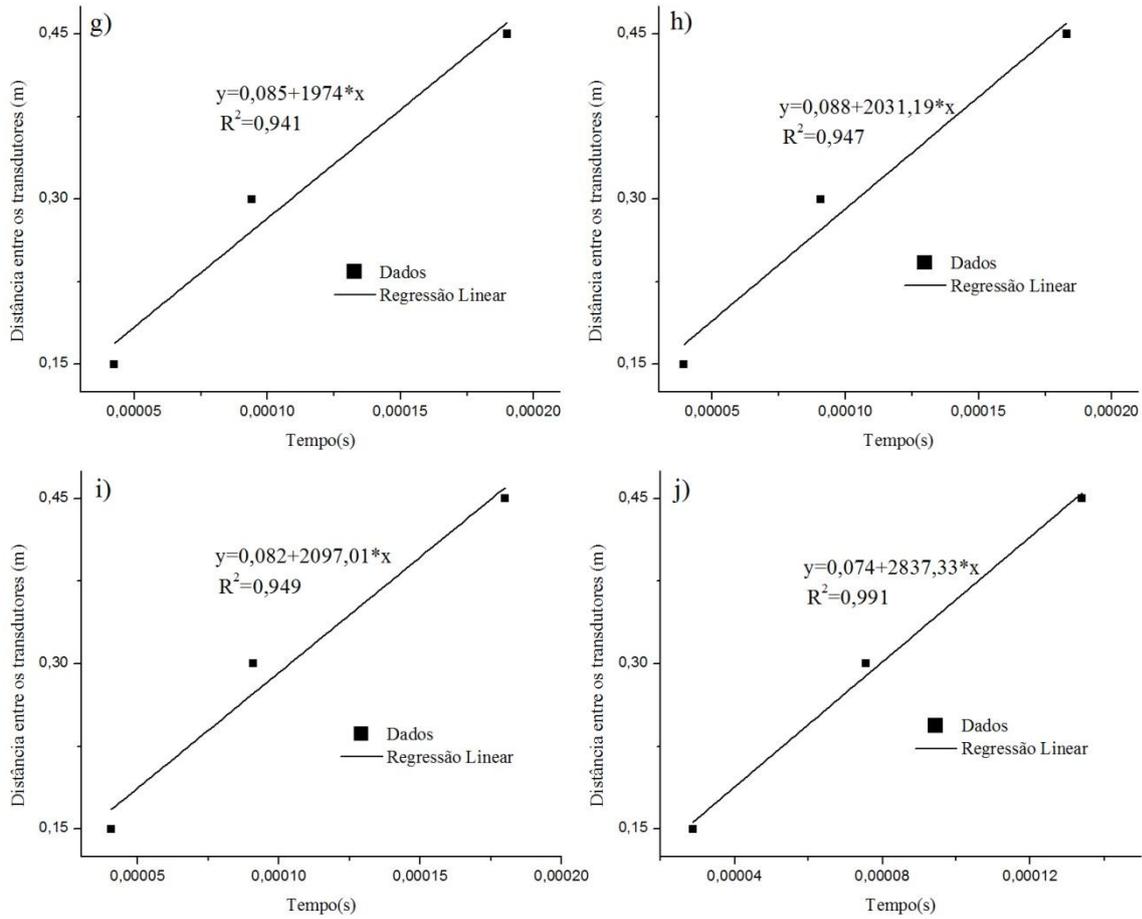
Para o cálculo da velocidade do pulso ultrassônico das leituras indiretas no ensaio na laje alveolar sem a presença da armadura foram gerados os gráficos das Figuras C.14 e C.15.

Figura C.14 - Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio sem baixo consumo de cimento: a) Leitura realizada 8 horas após o ensaio; b) Leitura realizada 10 horas após o ensaio; c) Leitura realizada 13 horas após o ensaio; d) Leitura realizada 15 horas após o ensaio; e) Leitura realizada 17 horas após o ensaio; f) Leitura realizada 19 horas após o ensaio.



Fonte: Autora

Figura C.15- Gráficos utilizados para a obtenção das velocidades das leituras indiretas ensaio sem baixo consumo de cimento: g) Leitura realizada 22 horas após o ensaio; h) Leitura realizada 24 horas após o ensaio; i) Leitura realizada 7 dias após o ensaio; j) Leitura realizada 28 dias após o ensaio.



Fonte: Autora