

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**ROCHELLE SCHNEIDER DOS SANTOS**

**APLICAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO VISÍVEL E  
INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA AVALIAÇÃO NÃO-  
DESTRUTIVA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

Porto Alegre  
2014

**Rochelle Schneider dos Santos**

**APLICAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA  
AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Hepp Pulgati

Coorientadora: Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim

Porto Alegre  
2014

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por guiar o meu caminho de acordo com a Sua sabedoria.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pela oportunidade de estudar em um Pós Graduação de qualidade e gratuito.

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de Bolsa de mestrado.

Aos professores e colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico (LAB-SRGeo), e em especial ao orientador Fernando Hepp Pulgati e à coorientadora Silvia Beatriz Alves Rolim, pelo apoio e ensinamentos.

Agradeço às professoras Angela Borges Masuero e Denise Carpena Coitinho Dal Molin e aos doutorandos Abrahão Bernardo Rohden, Lucília Maria Silveira Bernardino da Silva e Simone Dornelles Venquiaruto, do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE-UFRGS).

A família e ao namorado, os quais forneceram o apoio necessário para a conclusão desta etapa.

*"Determinando tu algum negócio, ser-te-á firme,  
e a luz brilhará em teus caminhos." Jô 22.28*

## APLICAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

### RESUMO

O século 21 vem sendo caracterizado pela urbanização acelerada em países economicamente emergentes. O aumento das construções em áreas urbanas, quando mal planejado, ocasiona problemas estruturais e espaciais que afetam diretamente os cidadãos e seu entorno. Muitas pesquisas científicas propõem métodos para monitorar a qualidade dos materiais utilizados em obras de engenharia. As inspeções de qualidade mais aplicadas são feitas em materiais relacionados à estrutura, como o concreto. Todo o concreto utilizado em obra é obrigatoriamente submetido ao ensaio à compressão axial, que rompe os corpos-de-prova. Estes ensaios destrutivos não são realizados in loco e todo o material utilizado é descartado após análise. Neste sentido, o sensoriamento remoto pode ser utilizado no mapeamento e monitoramento de materiais de construção, permitindo investigar e identificar diversos componentes de forma não-destrutiva. Os materiais podem ser inspecionados diretamente no local da obra, de uma forma rápida, não-invasiva e de baixo custo, características imprescindíveis no processo contínuo da construção civil. Neste trabalho foi utilizado o equipamento espectrorradiômetro FieldSpec 3 para medir materiais cimentícios à base de cimento Portland (pasta de cimento, argamassa e concreto). Nas amostras de pasta de cimento e argamassa, analisou-se o comportamento espectral de quatro diferentes resistências mecânicas e nas amostras de concreto avaliou-se a diferença entre o comportamento espectral de concretos submetidos a carregamento precoce e concretos de referência. As curvas espectrais geradas pelo registro da radiação eletromagnética refletida e absorvida das amostras foram interpretadas com base na teoria de espectroscopia vibracional e eletrônica. Esta dissertação tem um caráter inovador e a técnica aplicada é extremamente promissora e praticável como um método alternativo. Na literatura não existem estudos que já fizeram esta investigação, nem trabalhos acadêmicos com o propósito de diferenciar resistências mecânicas a partir da análise e interpretação de assinaturas espectrais destes materiais. O objetivo deste trabalho é mostrar uma técnica auxiliar inédita para analisar corpos-de-prova sólidos, utilizando a espectroscopia no visível e infravermelho próximo. O resultado deste estudo constatou que as amostras de pasta e de argamassa apresentaram contraste espectral e detectou a presença e proporção de água nas amostras. Também identificaram-se diferenças entre o comportamento espectral dos concretos de referência e o dos pré-carregados, evidenciando-se a aplicabilidade desta ferramenta na identificação da microfissuração do concreto. Com auxílio da transformada de *wavelet* foi possível comprovar estatisticamente o contraste espectral e que a profundidade das feições de absorção da água é inversamente proporcional à resistência mecânica, para materiais cimentícios como a pasta e argamassa. A técnica apresentada foi considerada bastante promissora como ferramenta auxiliar na avaliação da qualidade de materiais cimentícios à base de cimento Portland.

**Palavras-chave:** Argamassa; Pasta de cimento; Concreto; Sensoriamento Remoto; Espectroscopia.

**APPLICATION OF VISIBLE AND NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY IN THE NON-DESTRUCTIVE  
EVALUATION OF CEMENT MATERIALS**

**ABSTRACT**

The 21st century has been characterized by rapid urbanization in economically emerging countries. The increase of constructions in urban areas, when not planned correctly, causes structural and spatial problems that directly affect citizens and their surroundings. Many scientific researches propose methods to monitor the quality of materials used in engineering works. The quality inspections more applied are made in materials related to the structure, like concrete. All the concrete used in the side work must be submitted to axial compression test, which breaks the samples. These destructive tests are not done in loco and all the material used is discarded after analysis. This way, the remote sensing can be used for mapping and monitoring of construction materials, allowing to investigate and to identify many components in a non-destructive way. The materials can be inspected directly inside the side work, in a quick way, non-invasive and low cost, indispensable characteristics in the ongoing process of civil construction. In this work a piece of equipment FieldSpec 3 spectroradiometer was used to measure cement materials based on Portland cement (cement paste, mortar and concrete). In the cement paste and mortar samples was analyzed the spectral behavior of four different compressive strengths and in the concrete samples was analyzed the difference between the spectral behavior of concretes submitted to early loading and concretes of reference. The spectral curves produced by register of electromagnetic radiation reflected and absorbed of the samples were interpreted based on the theory vibrational and electronic spectroscopy. This dissertation is an innovation and the technique applied is extremely promising and feasible as an alternative method. In the literature there are no studies that have already done this research or academic papers with the purpose of differentiate compressive strengths from the analysis and interpretation of their spectral signatures. The objective of this work is to show an original technique to analyze solid samples using the spectroscopy in the visible and near infrared. The result of this study found that the samples of cement past and mortar showed spectral contrast and detected the presence and proportion of water in the samples. Besides it identified differences between the spectral behavior of early loading and concretes of reference, highlighting the applicability of this tool in the identification of the concrete microcracking. With the help of wavelet transform was possible to prove statistically the spectral contrast and that the depth of water absorption features is inversely proportional to the compressive strength, for cement materials such as paste and mortar. The technique presented was considered very promising as an assistant technique in quality appraisal of cement material based on Portland cement, may complement information obtained by conventional techniques.

**Keywords:** Mortar; Cement paste; Concrete; Remote Sensing; Spectroscopy.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Cimento .....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Fabricação do Cimento Portland .....	19
2.1.2	Composição Química do Cimento Portland anidro .....	20
2.1.3	Hidratação do Cimento Portland.....	23
2.1.4	Tipos de estruturas formadas por cimento e água .....	25
2.1.5	Resistência à compressão .....	25
2.1.5.1	Relação água/cimento .....	26
2.1.5.2	Porosidade e tamanho dos cristais dos compostos hidratado .....	27
2.1.6	Microfissuras em concretos causadas pelo carregamento precoce .....	28
<b>2.2</b>	<b>Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>28</b>
2.2.1	A Radiação Eletromagnética.....	29
2.2.2	Interação da radiação eletromagnética com o alvo .....	30
2.2.3	Comportamento espectral .....	32
2.2.3.1	Radiação absorvida pelas moléculas .....	33
2.2.4	Uso de técnicas de sensoriamento remoto para avaliação não-destrutiva de materiais cimentícios à base de cimento Portland.....	37
2.2.4.1	Identificação de diferentes resistências mecânicas de um mesmo produto à base de cimento Portland .....	37
2.2.4.2	Detecção da presença e proporção de água nos produtos .....	38
2.2.4.3	Detecção de microfissuras ocasionadas pelo carregamento precoce do concreto.....	39
<b>2.3</b>	<b>Método estatístico: Análise <i>wavelet</i>.....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>43</b>
3.1.1	Amostras de Pasta de Cimento Portland.....	43
3.1.2	Amostras de Argamassa de Cimento Portland .....	44
3.1.3	Amostras de concreto de cimento Portland .....	44
3.1.4	Medidas de Radiância .....	45
<b>3.2</b>	<b>Método.....</b>	<b>47</b>
3.2.1	Pré-carregamento dos concretos .....	47

3.2.2	Medições em laboratório com o espectrorradiômetro.....	48
3.2.3	Montagem dos espectros eletromagnéticos dos três tipos: pasta de cimento, argamassa e concreto.....	49
3.2.4	Análise <i>Wavelet</i> .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>52</b>
4.1.1	Curvas Espectrais das Amostras de Pasta de cimento .....	52
4.1.2	Curvas Espectrais das Amostras de Argamassa.....	55
4.1.3	Curvas Espectrais das Amostras de Concreto .....	58
4.1.4	Transformada de <i>wavelet</i> para as amostras de pasta e argamassa.....	61
4.1.4.1	Análise das curvas espectrais resultante das amostras de pasta e argamassa no intervalo (iii).....	61
4.1.4.2	Análise das curvas espectrais resultante das amostras de pasta e argamassa nos intervalos (i) e (ii).....	76
4.1.4.3	Análise das réplicas das curvas espectrais das amostras de pasta no intervalo (iii).....	81
<b>4.2</b>	<b>Discussões.....</b>	<b>85</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Curvas Espectrais das Amostras de Pasta e Argamassa .....</b>	<b>85</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Curvas Espectrais das Amostras de Concreto .....</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Tipos de estruturas formadas com cimento e água.....	25
<b>Figura 2:</b> Onda eletromagnética composta pelos vetores elétrico e magnético. FONTE: JENSEN, 2009.....	29
<b>Figura 3:</b> Regiões do espectro eletromagnético. FONTE: Adaptado de EL-BAZ, 2008.....	30
<b>Figura 4:</b> Efeito da radiação na superfície dos materiais. ....	30
<b>Figura 5:</b> Comportamento espectral do mineral Hematita no visível e infravermelho próximo. ....	33
<b>Figura 6:</b> Esquema da interação do vetor elétrico com a molécula de H-Cl. Os símbolos $\delta^+$ e $\delta^-$ mostram as cargas positivas e negativas parciais no hidrogênio e no cloreto nas extremidades da molécula. FONTE: Adaptado de SMITH, 1999.....	34
<b>Figura 7:</b> Diagrama dos níveis de energia permitido pela molécula da água, onde no eixo X aparece a distância da ligação O-H (1 Angstrom = $1 \cdot 10^{-10}$ m) e no eixo Y a energia potencial molecular medida em comprimento de onda (Angstrom). FONTE: Adaptado de SMITH, 1999.....	35
<b>Figura 8:</b> Modos vibracionais da molécula de água: (a) $V_1$ Modo Estiramento Simétrico do OH, (b) $V_2$ OH Modo flexão ( <i>Bending Mode</i> ) e (c) $V_3$ Modo Estiramento Assimétrico do OH. FONTE: GHANDEHARI et al., 2012.....	38
<b>Figura 9:</b> Radiação incidente em superfícies com e sem fissuras. FONTE: Adaptado de SHAM et al., 2008.....	40
<b>Figura 10:</b> <i>Hi Brite Contact Probe</i> em operação.....	46

<b>Figura 11:</b> Comportamento Espectral das 4 amostras de resistência da pasta. ....	53
<b>Figura 12:</b> Variação da feição de absorção próxima a $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero. ....	54
<b>Figura 13:</b> Variação da feição de absorção próxima a $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero. ....	54
<b>Figura 14:</b> Comportamento Espectral das 4 amostras de resistência da argamassa.....	56
<b>Figura 15:</b> Variação da feição de absorção próxima a $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero. ....	56
<b>Figura 16:</b> Variação da feição de absorção próxima a $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero. ....	57
<b>Figura 17:</b> Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9 e 10. ....	58
<b>Figura 18:</b> Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 11 e 12. ....	59
<b>Figura 19:</b> Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9, 10, 11 e 12. ....	60
<b>Figura 20:</b> Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9 e 11. ....	60
<b>Figura 21:</b> Gráfico das curvas de Fator de reflectância para as amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. ....	61
<b>Figura 22:</b> Gráfico das curvas de Fator de reflectância para as amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.....	62
<b>Figura 23:</b> Decomposição das curvas de Fator de reflectância em sete níveis para as amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. Coeficientes maiores que 2X MAD, em módulo. ....	63

- Figura 24:** Decomposição das curvas de Fator de reflectância em sete níveis para as amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. Coeficientes maiores que 2X MAD, em módulo. .... 63
- Figura 25:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância das amostras de pasta, nível **s7**, expresso em cristais. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 65
- Figura 26:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância das amostras de argamassa, nível **s7**, expresso em cristais. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 66
- Figura 27:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d7**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 68
- Figura 28:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d7**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 69
- Figura 29:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d6**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 71
- Figura 30:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d6**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 72
- Figura 31:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d5**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 74

- Figura 32:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d5**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. .... 75
- Figura 33:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 76
- Figura 34:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 77
- Figura 35:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), no nível **s4**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 77
- Figura 36:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), no nível **s4**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 78
- Figura 37:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu$ m), amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 79
- Figura 38:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu$ m), amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 79
- Figura 39:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu$ m), no nível **s5**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 80
- Figura 40:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu$ m), no nível **s5**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50. .... 80
- Figura 41:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50. .... 82
- Figura 42:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **s7**. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03

relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50..... 83

**Figura 43:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **d7**. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50..... 83

**Figura 44:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **d6**. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50..... 84

**Figura 45:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **d5**. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50..... 84

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Tabela de classificação de cimentos Portland, conforme teor dos compostos presentes.....	20
<b>Tabela 2:</b> Simbologia dos compostos químicos do cimento.....	21
<b>Tabela 3:</b> Principais componentes presentes no cimento Portland.....	21
<b>Tabela 4:</b> Componentes da pasta de cimento Portland hidratado.....	23
<b>Tabela 5:</b> Feições de absorção da água.....	39
<b>Tabela 6:</b> Dosagem das amostras de pasta de cimento e resistência à compressão axial aos 28 dias.....	44
<b>Tabela 7:</b> Dosagem das amostras de Argamassa e resistência à compressão axial aos 28 dias.....	44
<b>Tabela 8:</b> Dosagem das amostras de concreto e a resistência mecânica, aos 28 dias, dos corpos-de-prova de referência.....	45
<b>Tabela 9:</b> Especificações técnicas do equipamento.....	46
<b>Tabela 10:</b> Parâmetros configuracionais do acessório <i>Contact Probe</i> .....	46
<b>Tabela 11:</b> Detalhamento e quantificação das leituras realizadas com o espectrorradiômetro.....	49
<b>Tabela 12:</b> Valores do Fator de reflectância da pasta.....	54
<b>Tabela 13:</b> Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.....	55
<b>Tabela 14:</b> Valores do Fator de reflectância da argamassa.....	57
<b>Tabela 15:</b> Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.....	57
<b>Tabela 16:</b> Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.....	59
<b>Tabela 17:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 25.....	65
<b>Tabela 18:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 26.....	66
<b>Tabela 19:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 27.....	68

<b>Tabela 20:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 27.....	68
<b>Tabela 21:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 28.....	69
<b>Tabela 22:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 28.....	69
<b>Tabela 23:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 29.....	71
<b>Tabela 24:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 29.....	71
<b>Tabela 25:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 30.....	72
<b>Tabela 26:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 30.....	72
<b>Tabela 27:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 31.....	74
<b>Tabela 28:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 31.....	74
<b>Tabela 29:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 32.....	75
<b>Tabela 30:</b> Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 32.....	75
<b>Tabela 31:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 35.....	78
<b>Tabela 32:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 36.....	78
<b>Tabela 33:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 39.....	80
<b>Tabela 34:</b> Valores referentes às amostras de pasta da Figura 40.....	81

## 1 INTRODUÇÃO

O século 21 vem sendo caracterizado pelo crescimento acelerado da urbanização em vários países economicamente emergentes. Esse crescente aumento das construções em áreas urbanas, quando mal planejado, ocasiona problemas estruturais e espaciais que afetam diretamente a população e o meio ambiente que a cerca (BEN-DOR, 2003; FRANÇA, 2005).

No que diz respeito às questões estruturais, vários estudos são realizados para monitorar a qualidade das obras de engenharia, como por exemplo, o controle da resistência de materiais estruturais. Materiais cimentícios à base de cimento, como pasta, argamassa e concreto são os materiais mais consumidos no mercado da construção civil e responsável pelo aquecimento da economia neste setor. O concreto, por exemplo, é utilizado em grande escala nas obras públicas e privadas do país devido a sua resistência, durabilidade, facilidade de execução e custo (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O uso intensivo destes produtos contribui para que, cada vez mais, se desenvolva pesquisas na área de tecnologia dos materiais cimentícios, favorecendo abordagens multidisciplinares e possibilitando uma avaliação mais ampla e eficiente (BENTUR e MITCHELL, 2008).

Nos últimos anos, apesar de todo o conhecimento disponível sobre o concreto, quanto às suas propriedades e recomendações de uso, ainda se observa no Brasil um considerável aumento na incidência de manifestações patológicas decorrentes de deformações excessivas em estruturas de concreto. Esse problema pode ser atribuído à remoção antecipada das escoras, submetendo os elementos estruturais a um carregamento precoce, sem que haja o tempo necessário, para que o concreto adquira a resistência necessária para absorver solicitações.

A maioria das inspeções de qualidade de estruturas de concreto está relacionada com ensaios destrutivos. Atualmente, a análise do desempenho do concreto recém-moldado em obra é feita através da retirada de uma amostra (corpos-de-prova), que é analisada posteriormente por meio do seu rompimento em laboratório. Já em com maiores idades, a inspeção pode ser feita por meio da extração de testemunhos da própria estrutura para avaliar a sua situação. Técnicas não-destrutivas são tecnologias que auxiliam métodos destrutivos na avaliação da edificação quanto à condição do material utilizado, em relação à presença de fissuras, de vazios e de corrosão na armadura.



Neste contexto, o sensoriamento remoto oferece vários recursos que coletam dados do objeto, sem necessidade de contato físico, por meio de equipamentos tecnologicamente avançados operados por profissionais altamente qualificados. É uma ferramenta utilizada para obter informações do alvo sem a necessidade de destruí-lo. O estudo de materiais de construção com técnicas de sensoriamento remoto proximal vem sendo desenvolvido para mapeamento e monitoramento da qualidade destes. Através dos equipamentos hiperspectrais, é possível identificar propriedades químicas e físicas do material (GOETZ et al., 1985). Dependendo do tipo de avaliação, esta inspeção pode ser aplicada diretamente in loco durante a construção da obra, de uma forma rápida e com baixo custo, sem causar danos para o acabamento da estrutura (PAROLI et al., 1996).

Muitos trabalhos relacionados com métodos não-destrutivos para a inspeção do concreto estrutural têm surgido na Europa, junto com a participação dos USA e do Extremo Oriente (ABDEL-QADER et al., 2003; BUNGEY, 2003). Métodos que utilizam radiação eletromagnética (radiômetros) apresentam princípios investigativos bem definidos e necessitam acessar somente a superfície do material (GHOSH, 2001; POTGIETER-VERMAAKA et al., 2006; YLMEN et al., 2009). O sensoriamento remoto envolve o registro da radiação eletromagnética refletida, absorvida, transmitida ou emitida por um alvo, relacionando a resposta obtida com as propriedades físico-químicas do mesmo (HUNT e SALISBURY, 1970; HUNT e SALISBURY, 1971). Os sensores, que variam desde orbitais até proximais, possuem diversas aplicações nas áreas de engenharias, medicina, recursos naturais, meio ambiente, planejamento urbano, entre outras (WELCH, 1982; GUINDON et al., 2004). Na área da Engenharia Civil, por exemplo, os materiais de construção podem ser inspecionados durante o desenvolvimento da obra, de forma rápida e com baixo custo (PAROLI et al., 1996).

Quando se trabalha com misturas complexas, como à base de cimento Portland, aumenta-se a complexidade do espectro. Considerando que as propriedades dos cimentos Portland são influenciadas pela proporção e tipo de compostos presentes, a adição ou retirada de porções de água e/ou cimento irão alterar, além da resistência final, a curva espectral da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Neste trabalho foi utilizado o equipamento espectrorradiômetro FieldSpec 3 para medir materiais cimentícios à base de cimento Portland (pasta de cimento, argamassa e concreto). Nas amostras de pasta de cimento e argamassa, analisou-se o comportamento espectral de quatro diferentes resistências mecânicas à compressão e nas amostras de concreto avaliou-se a diferença entre o comportamento espectral de concretos submetidos ao carregamento precoce

e concretos de referência. As feições de absorção das curvas espectrais foram interpretadas com base na teoria de espectroscopia vibracional e eletrônica.

Esta dissertação tem um caráter inovador e a técnica aplicada é extremamente promissora e praticável como método alternativo para minimizar tempo e custos das técnicas convencionais de controle de qualidade de materiais à base de cimento Portland. Na literatura não existem estudos que já tenham realizado esta investigação, nem trabalhos acadêmicos com o propósito de diferenciar resistências mecânicas a partir da análise e interpretação de assinaturas espectrais destes materiais. O objetivo deste trabalho é mostrar uma técnica auxiliar inédita, simples e não-invasiva para analisar corpos-de-prova sólidos, e futuramente elementos estruturais *in loco*, utilizando a espectroscopia no visível e infravermelho próximo.

A metodologia consiste em quatro etapas: (i) Medir com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 o Fator de reflectância (Fr) de todas as amostras; (ii) Identificar e diferenciar o comportamento espectral das curvas de todas as resistências mecânicas das amostras de pasta, assim como das amostras de argamassa; (iii) Identificar e diferenciar as amostras de concreto de acordo com a sua forma e condição física (referência ou pré-carregado); (iv) Detectar, através da análise wavelet, a presença e proporção de água em todos os materiais cimentícios à base de cimento estudados e a presença de microfissuras nas amostras de concreto.

No capítulo 2 da dissertação é feita uma revisão bibliográfica de artigos e livros relacionados com o conhecimento na área abrangida pelo trabalho. No capítulo 3 é apresentada a metodologia juntamente com as informações que servem de base para a análise das quatro etapas definidas. No capítulo 4 são apresentados, concomitantemente, os resultados e as discussões. Finalmente, no capítulo 5 é feita uma análise geral da proposta deste trabalho, onde são ressaltadas as principais conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

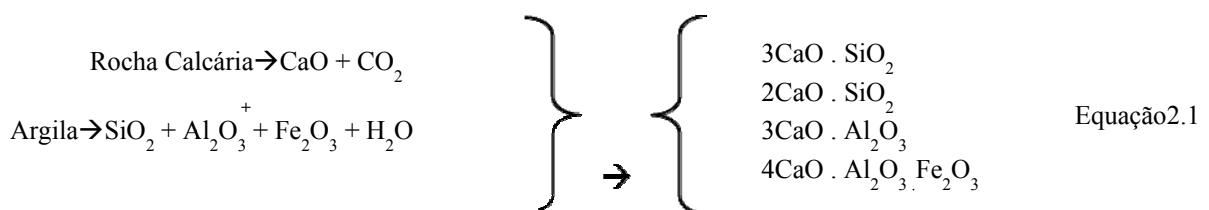
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cimento

De uma forma geral, o cimento é definido como um pó fino com propriedades ligantes capazes de unir fragmentos de rochas e areia formando uma massa compacta. Aqueles que, ao entrar em contato com água, sofrerem reações químicas que iniciam seu processo de endurecimento, são denominados cimentos hidráulicos. Os cimentos hidráulicos são classificados como: cimento natural, cimento Portland (ABNT, 2006) e cimento aluminoso (NEVILLE, 1997 e MEHTA e MONTEIRO, 2008).

#### 2.1.1 Fabricação do Cimento Portland

O processo de fabricação do cimento Portland pode ser resumido em 2 etapas. A primeira consiste em moer individualmente rocha calcária ( $\text{CaCO}_3$ ) e argila ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{O}$ ), juntá-las em proporções específicas e calcinar a mistura em fornos circulares com temperatura em torno de  $1450^\circ\text{C}$  (Equação 2.1). O produto gerado é denominado Clínquer, caracterizado por apresentar-se em pelotas com diâmetro entre 5 e 25mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A segunda etapa consiste em arrefecer o clínquer numa faixa entre  $50^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$  e moê-lo até formar um pó fino. Posteriormente, adiciona-se ao clínquer uma pequena quantidade de gipsita ( $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) com o objetivo de retardar a tendência à pega instantânea, gerando desta forma o cimento.



Equação 2.1

FONTE: MEHTA e MONTEIRO, 2008.

A mistura – “clínquer + gipsita” – é a fórmula básica do cimento Portland de onde derivam várias composições, dependendo da quantidade e do tipo das adições. As adições no cimento, além da gipsita (gesso) são: escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e carbonáticos.

Existem 5 tipos de cimentos Portland (CP), conforme os diferentes teores de compostos presentes: comum (CPI), composto (CPII), de alto-forno (CPIII), pozolânico (CPIV) e de alta resistência inicial (CPV-ARI), conforme Tabela 1. O cimento Portland CPV-ARI (alta resistência inicial) foi selecionado para a realização deste trabalho, pois é um cimento mais fino e contém menos compostos impuros, além de ser amplamente utilizado em obras de infraestrutura executadas atualmente no Brasil (ABCP, 2002).

**Tabela 1:** Tabela de classificação de cimentos Portland, conforme teor dos compostos presentes.

Cimento Portland	Teor de Composto, %				
	C <sub>3</sub> S (Silicato Tricálcico)	C <sub>2</sub> S (Silicato Dicálcico)	C <sub>3</sub> A (Aluminato Tricálcico)	C <sub>4</sub> AF (Ferroaluminato Tetracálcico)	CaSO <sub>4</sub> (Gipsita)
CPI	67-49	31-25	14-12	12-8	3,4-2,4
CPII	55-46	39-29	8-6	16-12	3,4-2,8
CPIII	70-56	38-15	17-12	10-8	4,6-3,9
CPIV	44-30	57-46	7-5	18-13	3,5-2,9
CPV-ARI	54-43	49-36	5-4	15-12	3,9-2,7

Fonte: Adaptado de NEVILLE, 1999.

### 2.1.2 Composição Química do Cimento Portland anidro

Os compostos utilizados na fabricação do cimento Portland, quando colocados no forno, sofrem uma forte interação formando uma série de produtos mais complexos. A Tabela 2 apresenta as notações químicas utilizadas para classificar os compostos do cimento enquanto que a Tabela 3 mostra os quatro principais tipos de compostos que formam o cimento Portland. O Silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) e o beta-Silicato dicálcico ( $\beta$  C<sub>2</sub>S) são os minerais silicatos mais importantes do cimento Portland (CEMENT RESEARCH INSTITUTE OF INDIA, 1976). Estes dois minerais juntos compõem 70 a 80% do material (RAMACHANDRAN et al., 1984; RICHARDSON, 1999; JENNINGS et al., 2004).

**Tabela 2:** Simbologia dos compostos químicos do cimento.

CCN	Fórmula	Nome
A	$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio ou Alumina
C	CaO	Óxido de Cálcio ou Calcário
C	$CO_2$	Dióxido de Carbono
F	$Fe_2O_3$	Óxido de Ferro
K	$K_2O$	Óxido de Potássio
H	$H_2O$	Água
M	MgO	Óxido de Magnésio ou Periclásio
N	$Na_2O$	Óxido de Sódio
S	$SiO_2$	Dióxido de Silício ou Sílica
S	$SO_3$	Trióxido de Enxofre
P	$P_2O_5$	Pentóxido de Fósforo
T	$TiO_2$	Dióxido de Titânio ou Titânia

FONTE: Adaptado de BOGUE, 1955.

**Tabela 3:** Principais componentes presentes no cimento Portland.

Nome do Componente	CCN
Silicato Tricálcico ( $3CaO \cdot SiO_2$ )	$C_3S$ (é um produto sintetizado)
Alita (ou $C_3S$ substituído)	$C_3S$ que contém Fe, Al, Mg, Cr e Zn. Uma vez hidratado produzirá força para o cimento
Silicato Dicálcico ( $2CaO \cdot SiO_2$ )	$C_2S$ (é originalmente o $\beta$ -dicálcico)
Belita (ou $C_2S$ substituído)	$C_2S$ onde o Ca é substituído por Na, Al, Mg, K, Cr e Mn
Aluminato Tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ )	$C_3A$
Ferroaluminato Tetracálcico ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ )	$C_4AF$ é uma solução da composição média de $C_2F$ para $C_6A_2F$ .
Outros Componentes	Sulfatos resultantes da adição de 4% de gesso $Ca_2SO_4 \cdot 2H_2O$ ( $CSH_2$ ) ao clínquer durante a moagem

FONTE: Adaptado de PAROLI et al., 1996.

Os silicatos hidráulicos Alita e Belita contêm pequenas quantidades de íons de magnésio, alumínio, ferro, potássio e enxofre, e são classificados como as formas impuras dos  $C_3S$  e  $\beta C_2S$ , respectivamente. A presença de poucas impurezas em solução sólida pode não ocasionar muitas mudanças na natureza cristalográfica e na reatividade de um composto com água, porém a presença de uma maior quantidade sim. As estruturas cristalinas dos compostos apresentam imperfeições que causam sua instabilidade em meio aquoso. Os vazios gerados por essa irregularidade estrutural são responsáveis pela alta energia e reatividade da estrutura. Por isso, a Alita é muito mais reativa que a Belita, pois os vazios intersticiais formados são muito maiores. Essa característica, posteriormente explicará porque a Alita ( $C_3S$  impuro) é o primeiro composto a reagir no processo de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Assim como os silicatos de cálcio, os aluminatos de cálcio também apresentam impurezas na sua estrutura, como o magnésio, o sódio, o potássio e sílica. O Aluminato tricálcico (Celita ou somente Aluminato) e o Ferroaluminato cálcico (Ferrita) também possuem estrutura cristalina bastante complexa apresentando grandes vazios intersticiais, responsáveis pelas suas altas reatividades.

A presença do óxido de magnésio (até 2%) no cimento normalmente provém da dolomita que está contida na maioria dos calcários. Uma parte desse óxido pode entrar em solução sólida com a maioria dos compostos citados acima, porém uma pequena parte se transforma em MgO cristalino (Periclásio). O óxido de cálcio livre ou não combinado (CaO cristalino) assim como o óxido de magnésio possui uma reação de hidratação lenta sendo capaz de provocar danos no concreto já endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os álcalis (sódio e potássio) estão presentes no cimento Portland em uma quantidade muito pequena, que pode variar de 0,3 a 1,5%, expressa na forma de  $[Na_2O + 0,64K_2O]$ . São compostos normalmente provenientes da argila ou do carvão. Os sulfatos ( $SO_3$ ) provêm da gipsita adicionada ao clínquer e tem por objetivo retardar a tendência à pega instantânea devido à reatividade elevada do  $C_3A$ . Quando a concentração de sulfato no processo não é grande, são os  $C_3A$  e  $C_2S$  que consomem os álcalis (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

### 2.1.3 Hidratação do Cimento Portland

A formação do concreto é essencialmente uma reação química do cimento com a água. Os produtos formados pela hidratação do cimento Portland são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio, a etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Tabela 4). Esses produtos são considerados ainda mais complexos do que aqueles presentes no clínquer (PAROLI et al., 1996).

**Tabela 4:** Componentes da pasta de cimento Portland hidratado.

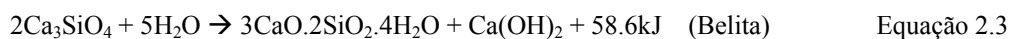
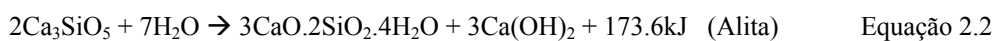
Nome do Componente	Fórmula Química	CCN
Hidróxido de Cálcio	$\text{Ca(OH)}_2$	CH
Silicato de Cálcio Hidratado	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	C-S-H
Etringita ou Trissulfoaluminato de Cálcio Hidratado	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ (AFt)
Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_4\text{ASH}_{18}$ (AFm)
Água	$\text{H}_2\text{O}$	H

FONTE: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008.

Na pasta de cimento, os silicatos compõem 70 a 80% do material e são responsáveis pelo endurecimento do sistema, enquanto que os aluminatos são responsáveis pelo enrijecimento e pega “instantâneos” da pasta, uma vez que possuem velocidade de reação de hidratação muito maior que os silicatos. Entretanto, somente os silicatos de cálcio contribuem para a força do concreto. O silicato tricálcico é responsável pela resistência inicial, o silicato dicálcico, que reage mais devagar, contribui mais adiante para a resistência da pasta (BREWER, 2014).

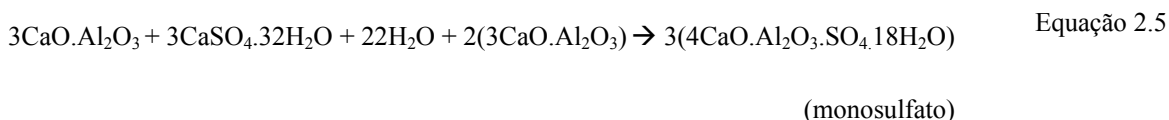
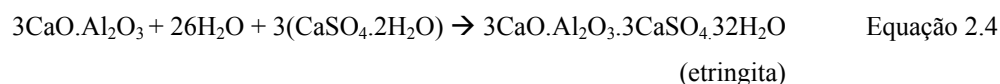
O cimento é uma mistura heterogênea, onde cada composto possui uma velocidade de reação diferente, e por este motivo, é importante conhecer o processo de hidratação de cada um separadamente. Segundo Borgue e Lerch (1934) o comportamento das reações de hidratação permanece o mesmo e por isso é possível analisar as reações dos silicatos e dos aluminatos.

O silicato de cálcio hidratado é um dos produtos da hidratação da Alita e da Belita (BREWER, 2014). Sua estrutura é similar nos dois compostos, embora a relação cálcio/sílica e o teor de água quimicamente combinada variem. Segundo Metha e Monteiro (2008) a proporção de C-H-S e CH produzida pelo C<sub>3</sub>S são de 61% e 39%, respectivamente enquanto pelo βC<sub>2</sub>S são 82% (C-H-S) e 18% (CH). Verifica-se que a quantidade de silicato de cálcio hidratado formado por βC<sub>2</sub>S é muito maior que a do C<sub>3</sub>S, resultando em uma resistência final maior para os tipos de cimentos Portland que possuem alto teor de βC<sub>2</sub>S. A partir da Equação 2.2 e da Equação 2.3, é possível verificar que a Alita, quando comparada com a Belita, exige mais água para uma hidratação completa.



FONTE: Adaptado de BREWER, 2014.

Juntamente ao C-S-H e CH, ambos presentes na microestrutura da pasta endurecida de cimento Portland, encontra-se outros dois compostos, a Etringita e o Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado. São produzidos pela reação de hidratação do Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) e do Ferroaluminato Tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) (Equação 2.4 e Equação 2.5). A mistura do Aluminato Tricálcico com a água não pode acontecer sem a presença da gipsita, pois a reação seria imediata, inviabilizando a aplicação da pasta de cimento na indústria da construção civil (RICHARDSON, 1999 e MEHTA e MONTEIRO, 2008).

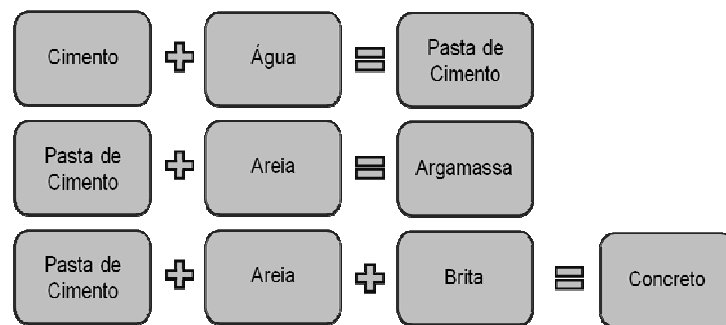


FONTE: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008.



### 2.1.4 Tipos de estruturas formadas por cimento e água

Diversos materiais são gerados a partir do cimento, conforme a quantidade e qualidade dos compostos acrescentados na mistura. Tais materiais possuem propriedades distintas que permitem a criação de diferentes tipos de estrutura, dependendo da finalidade da construção. A partir da pasta, outros materiais são formados, como a argamassa, que é um material constituído de pasta mais areia, e o concreto, que é formado de argamassa mais brita (Figura 1). Considerando que os diferentes materiais e quantidades que serão adicionados à mistura irão influenciar totalmente na finalidade da estrutura (ABCP, 2002).



**Figura 1:** Tipos de estruturas formadas com cimento e água.

### 2.1.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais valorizada no controle de qualidade dos concretos e pode ser definida como a capacidade de suportar sem ruptura as forças atuantes de compressão sobre a estrutura. A resistência indica a qualidade do concreto, pois está relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida. No Brasil a avaliação da resistência à compressão é realizada através de ensaio normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Outras características importantes são a durabilidade e a baixa permeabilidade, embora a resistência à compressão axial seja o elemento indispensável para a aprovação de um projeto estrutural. Vários fatores podem influenciar na diminuição da resistência como a relação água/cimento, a porosidade e o tamanho dos cristais dos compostos hidratado (REDA et al., 1999; PANZERA et al., 2010).

### 2.1.5.1 Relação água/cimento

A Relação água/cimento (relação a/c) é conhecida como a quantidade de água na mistura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) em relação à quantidade de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). A relação a/c é um dos fatores que mais influencia na resistência, pois altera a porosidade de várias regiões internas do sistema (porosidade da matriz e da zona de transição, em concretos). As características e propriedades dos materiais cimentícios vão depender da proporção e da qualidade dos compostos presentes. Dentre estes, o cimento é o elemento mais ativo quimicamente e o principal responsável pelo surgimento de novos materiais como pasta, argamassa e concreto. (NEVILLE, 1997; ABCP, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2008; ABNT, 2014).

Segundo Abrams (1918) foi estabelecida uma relação inversamente proporcional entre a relação água/cimento e a resistência do concreto (quanto mais água na mistura, menor será a rigidez do material). O aumento da relação água/cimento enfraquece a matriz devido ao aumento de poros. As reações da água com o cimento no sistema persistem por muitos anos, tornando o concreto ainda mais resistente (MEHTA e MONTEIRO, 2008; VIEIRA et al., 2011). No entanto, para determinar a resistência de uma estrutura de concreto, definiu-se um prazo de 28 dias para considerar a resistência final, mesmo que o concreto possa se tornar ainda mais resistente com o tempo, devido às reações que ainda estão acontecendo internamente. Esta é a idade de ensaio e parâmetro de referência da maioria dos projetos estruturais (ABNT, 2014).

A variação de tonalidade entre as resistências mecânicas é uma propriedade importante para a análise das curvas espectrais. Esta característica é captada pelos sensores do equipamento, produzindo um contraste espectral entre as curvas. Para relações água/cimento altas, como 0,50, todos os grãos de cimento são hidratados e uma porcentagem de água permanece não combinada na estrutura. À medida que a relação a/c reduz, de 0,50 para 0,17, menor é a quantidade de água e conseqüentemente maior é a proporção de cimento anidro por metro cúbico, transformando o conjunto em uma mistura mais densa e escura (NEVILLE, 1997). A relação a/c 0,17, com superfície mais escura, apresentará menor intensidade de Fator de reflectância e a curva de relação a/c 0,50, com superfície mais clara, demonstrará maior intensidade. Esta característica auxiliará na identificação de um padrão no comportamento espectral das amostras, onde existe uma relação inversamente proporcional entre a relação a/c e a intensidade de Fator de reflectância de toda a curva espectral.

### 2.1.5.2 Porosidade e tamanho dos cristais dos compostos hidratado

A porosidade para pastas e argamassas pode ser relacionada à resistência, ou seja, quanto mais poros na estrutura destes produtos, menor é a resistência. Entretanto, para concretos, a zona de transição, que é a camada de pasta em contato com os agregados graúdos, apresenta características diferentes do restante da pasta e por isso esta relação é mais complexa e com diagnóstico mais difícil para todo o produto. É importante considerar que, para todos os materiais cimentícios à base de cimento Portland, existem vários tipos de vazios na estrutura que podem influenciar na capacidade de suportar tensões. Além da presença dos poros, sua forma, dimensão, volume e distribuição podem amenizar ou intensificar o efeito de ruptura (NEVILLE, 1997; AÏCTIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Segundo Winslow e Liu (1990) uma amostra de pasta, de argamassa e de concreto com a mesma relação água/cimento, apresentam níveis de porosidade diferentes. À medida que se acrescenta à pasta, mais quantidade de agregado miúdo (areia) ocasiona, conseqüentemente, um aumento de porosidade. O efeito será intensificado se for adicionado à mistura o agregado graúdo (brita).

Os compostos formados com a hidratação do cimento Portland desenvolvem-se em diferentes estruturas cristalinas. Os cristais de Hidróxido de Sódio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  compõe 20 a 25% do volume da pasta de cimento e geralmente formam cristais grandes, dependendo do espaço disponível, da temperatura de hidratação e etc. Além dos cristais formados no processo de hidratação do cimento, observa-se concomitantemente o aparecimento de diferentes tipos de vazios (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A diminuição da relação água/cimento deixa a pasta hidratada de cimento Portland mais compacta (livre de poros grandes), impedindo o crescimento dos cristais provenientes dos produtos da hidratação como, por exemplo, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . A expansão dos cristais na estrutura do material prejudica a sua resistência mecânica, já que estruturas cristalinas maiores são menos eficientes para suportar tensões (AÏCTIN, 2000).

### **2.1.6 Microfissuras em concretos causadas pelo carregamento precoce**

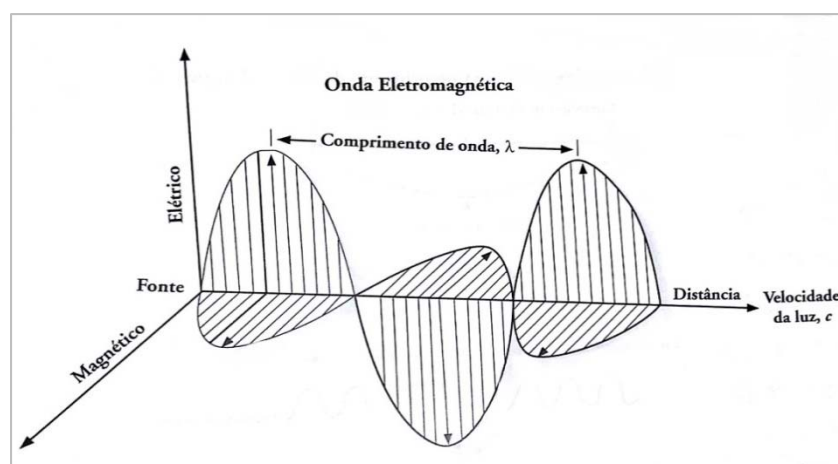
Apesar de muitas pesquisas realizadas sobre as propriedades e recomendações de uso do concreto, testemunha-se no Brasil o aumento da ocorrência de manifestações patológicas ocasionadas por deformações excessivas em estruturas de concreto (LAM, 2005). Esse problema pode ser atribuído a casos como a remoção antecipada das escoras, resultando em uma sobrecarga precoce na estrutura, sem que tenha havido tempo suficiente para que as reações de hidratação do cimento ocorressem e sem que o concreto tenha adquirido a resistência necessária para absorver essas solicitações (ABNT, 2003). As propriedades mecânicas do concreto começam a se desenvolver já nas idades iniciais, embora o material ainda se encontre vulnerável e suscetível a deformações (SILVA, 2007). Portanto, a remoção antecipada do escoramento para acelerar o ritmo das obras pode submeter as estruturas a um carregamento precoce ocasionando, conseqüentemente, a microfissuração (VIEIRA, 2008).

## **2.2 Sensoriamento Remoto**

As características físicas e químicas de um objeto podem ser identificadas por equipamentos especializados a quilômetros de distância, pois captam as informações por meio da radiação que este objeto reflete, absorve, transmite ou emite. Este alvo pode estar localizado tanto na Terra como no Espaço, pois os sensores estão localizados, quase que na totalidade, em satélites que orbitam ao redor da Terra. Esta capacidade de conseguir estudar materiais sem a necessidade de contato físico é chamado de Sensoriamento Remoto (JENSEN, 2009).

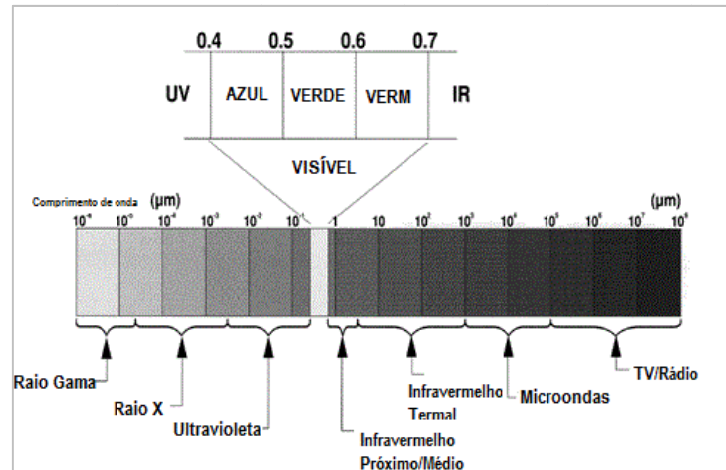
## 2.2.1 A Radiação Eletromagnética

A propagação de energia por meio de radiação é a ferramenta física fundamental do Sensoriamento Remoto. De acordo com a teoria ondulatória de Maxwell, uma onda eletromagnética se desloca com a velocidade da luz em dois campos de força ortogonais entre si (campo magnético e elétrico). Três grandezas são usadas para descrever as ondas eletromagnéticas: comprimento de onda ( $\lambda$ ), frequência ( $\nu$ ) e a velocidade de propagação da onda ( $c$ ), sendo esta uma constante universal  $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  (no vácuo) (Figura 2).



**Figura 2:** Onda eletromagnética composta pelos vetores elétrico e magnético. FONTE: JENSEN, 2009.

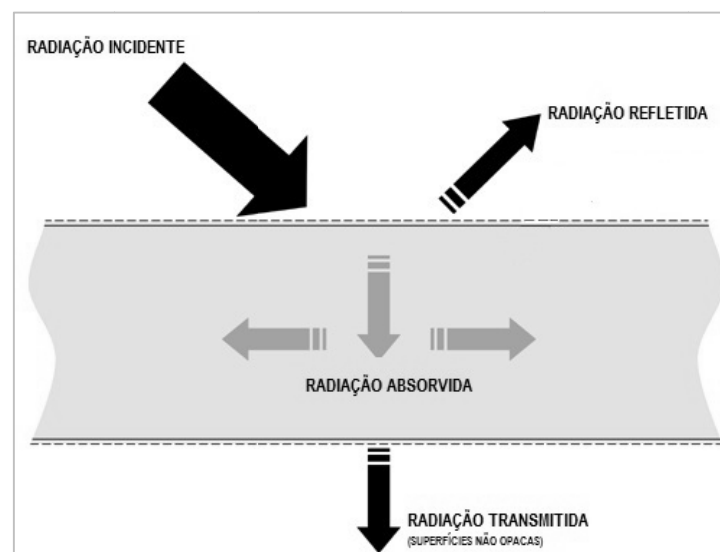
A radiação eletromagnética é a energia emitida através das ondas eletromagnéticas. Essa energia abrange um espectro desde raios gama (ondas curtas), até ondas de rádio (ondas longas), e se propaga através da onda eletromagnética com uma velocidade, a partir da fonte, de  $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ . A radiação pode alcançar o sensor remoto diretamente ou indiretamente, por meio de reflexão ou emissão da energia. A velocidade de propagação da onda quando a mesma encontra o alvo irá depender das propriedades do material (REEVES, 1975). As regiões de maior interesse para o sensoriamento remoto terrestre são: visível ( $0,4 - 0,7 \mu\text{m}$ ), infravermelho próximo ( $0,7-1,1 \mu\text{m}$ ), infravermelho médio ( $3,3-5,0 \mu\text{m}$ ) e o infravermelho termal ( $8-15 \mu\text{m}$ ).



**Figura 3:** Regiões do espectro eletromagnético. FONTE: Adaptado de EL-BAZ, 2008.

### 2.2.2 Interação da radiação eletromagnética com o alvo

A radiação, quando atinge a superfície dos materiais, provoca agitações moleculares e atômicas. Conforme mostra a Figura 4, essa energia que incide sobre o material pode ser refletida, absorvida e/ou transmitida.



**Figura 4:** Efeito da radiação na superfície dos materiais.

O processo de Reflectância ocorre quando a energia incidente é rebatida no alvo. A reflectância não depende somente do ângulo em que a energia incidente atinge a superfície, mas também da direção resultante na energia refletida (SIEGEL et al., 1968). A reflectância espectral hemisférica ( $\rho$ ), Equação 2.6, é definida pela razão adimensional da exitância refletida ( $M_{\text{refletida}}$ ) no plano do material, pela irradiância ( $E$ ) do mesmo plano (REEVES et al., 1975).

$$\rho(\lambda) = M_{\lambda\text{refletida}}/E \quad \text{Equação 2.6}$$

O processo de Transmitância ocorre quando uma fração da energia incidente passa através do alvo, sem acontecer reflexão nem espalhamento dessa radiação (SIEGEL et al., 1972). A transmitância espectral hemisférica ( $\tau$ ), Equação 2.7, é definida pela razão adimensional da exitância transmitida ( $M_{\text{transmitida}}$ ), deixando o lado oposto do plano do material, pela irradiância ( $E$ ) (REEVES et al., 1975).

$$\tau(\lambda) = M_{\lambda\text{transmitida}}/E_{\lambda} \quad \text{Equação 2.7}$$

O processo de Absorção ocorre quando a energia incidente apresenta mesma frequência que a frequência ressonante de um átomo ou molécula do material, produzindo um estado excitado. Se ao invés de rerradiar um fóton do mesmo comprimento de onda, a energia for transformada em calor e, posteriormente, rerradiada em um comprimento de onda maior, ocorrerá o processo de absorção (JENSEN, 2009). A absorptância espectral hemisférica ( $\alpha$ ), dada pela Equação 2.8, segue o princípio da conservação de energia (REEVES et al., 1975; SLATER, 1980).

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) + \tau(\lambda) \quad \text{Equação 2.8}$$

Os efeitos da radiação nos materiais dependem de muitos fatores, como composição, acabamento da superfície, temperatura, comprimento de onda da radiação, ângulo em que a radiação é emitida ou interceptada pela superfície e a distribuição espectral da radiação incidente na superfície (SIEGEL et al., 1968). Por exemplo, a superfície de um corpo quando lisa e polida apresenta uma quantidade de energia refletida maior do que a absorvida, enquanto que uma superfície rugosa apresentará comportamento inverso.

### **2.2.3 Comportamento espectral**

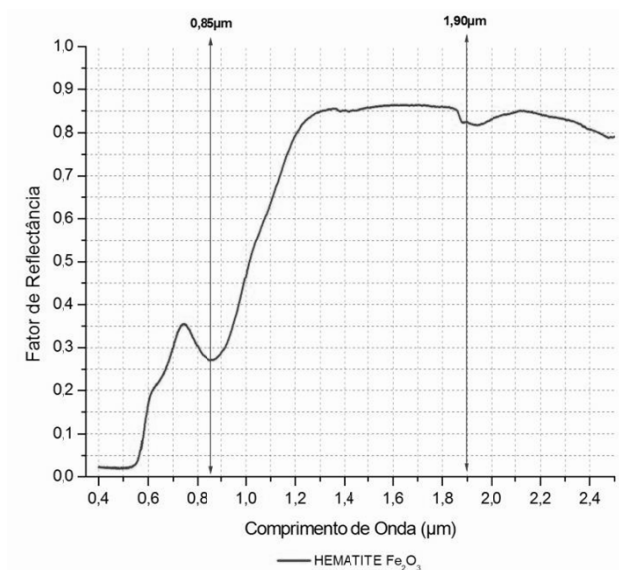
A curva espectral, também conhecida como assinatura espectral, traz informações importantes da composição do material analisado, como por exemplo, a presença e quantidade de água, a presença de fissuras, a composição química entre outras. O estudo que analisa estas interações da radiação com a matéria é conhecido como Espectroscopia (SMITH, 1999).

Segundo Robert Green (2014) a luz possui muito mais informações do que os nossos olhos são capazes de detectar. Essa energia contém informações específicas do material, consideradas como a impressão digital do alvo. Por isso os sensores são importantes, pois captam um intervalo específico de comprimento de onda refletido pelo material, identificando informações contidas na energia que não são percebidas visualmente.

Esta interação entre a radiação e a matéria é chamada de Espectroscopia e pode ser mensurada através do espectro eletromagnético (SMITH, 1999). A absorção da radiação em comprimentos de onda específicos pelas moléculas do material identifica a presença de compostos químicos na amostra em estudo (GHANDEHARI et al., 2012). Com esta técnica, é possível detectar, entre inúmeras aplicações, minerais presentes no solo, gases na atmosfera e composição química dos outros planetas.

O motivo mais importante para se utilizar esta técnica é que a espectroscopia é capaz de identificar materiais específicos em uma mistura. Isto pode ser usado para detectar a presença de grupos funcionais em várias amostras ou confirmar a identidade de uma amostra. A Figura 5 mostra o espectro eletromagnético da hematita no intervalo espectral de 0,35 a 2,5 $\mu$ m. A intensidade dos picos de absorção (por exemplo: 0,85 e 1,9  $\mu$ m) é uma ferramenta útil para analisar o nível de concentração dos elementos que compõe o material.





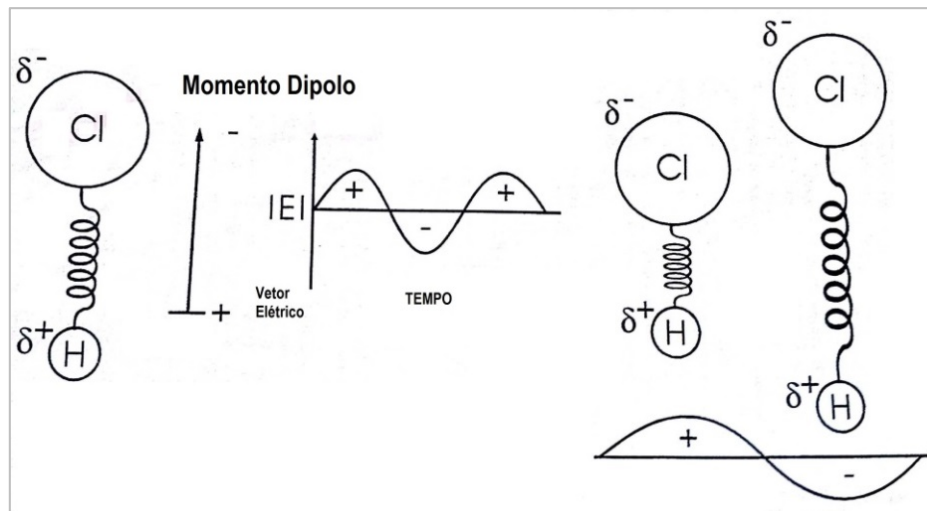
**Figura 5:** Comportamento espectral do mineral Hematita no visível e infravermelho próximo.

O uso da espectroscopia apresenta muitas vantagens como ferramenta de análise química. É uma técnica multidisciplinar, que produz informações importantes em poucos minutos, sobre materiais sólidos, líquidos e gasosos (GHOSH, 2001; JENSEN, 2009). Uma pequena quantidade do material já é suficiente para se obter uma resposta sobre as características físicas e químicas da amostra.

### 2.2.3.1 Radiação absorvida pelas moléculas

Existe uma forte correlação entre a posição do pico de absorção da molécula e a estrutura química, este fato faz com que a espectroscopia seja uma ferramenta de análise importante. Quando a molécula absorve a radiação, suas ligações químicas vibram, podendo esticar (*stretch*), encolher (*contract*) e torcer (*bend*). Isso acontece em comprimentos de onda (ou frequências) específicos, pois a molécula somente absorve energia quantizada. Quando a molécula absorve energia e começa a vibrar, exatamente na região do espectro eletromagnético onde esta energia está localizada, haverá um pico de absorção na curva espectral do material. Essa banda de absorção será a feição que irá auxiliar na identificação dos compostos químicos. Porém, não são todas as vibrações calculadas que poderão ser excitadas pela radiação e, por consequência, não aparecerão como bandas de absorção na curva espectral.

Existem algumas condições para que a vibração da molécula se transforme em uma feição no seu espectro. Os átomos presentes na molécula devem apresentar eletronegatividade diferentes, assim criam-se duas cargas separadas pela distância. A medida desta carga assimétrica na molécula é conhecida como *Momento Dipolo*. Quando a onda eletromagnética passa pela molécula, com polaridade alternada do vetor elétrico, causa um movimento de atração e repulsão na mesma frequência transmitida pela onda (Figura 6). Se a molécula não apresentar momento dipolo diferente de zero, não ocorrerá absorção da radiação. As vibrações moleculares que satisfazem as condições acima são denominadas *Infravermelhas Ativa* e podem ser visualizadas como bandas de absorção no espectro eletromagnético. As *Infravermelhas Inativas*, como o modo vibracional estiramento simétrico (*symmetric stretch*) do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), apresenta momento dipolo igual a zero, pois o distanciamento dos dois oxigênios em relação ao carbono será sempre igual (constante) e em sentidos contrários, por este motivo sempre se cancelam (FARMER, 1964; GHOSH, 2001).

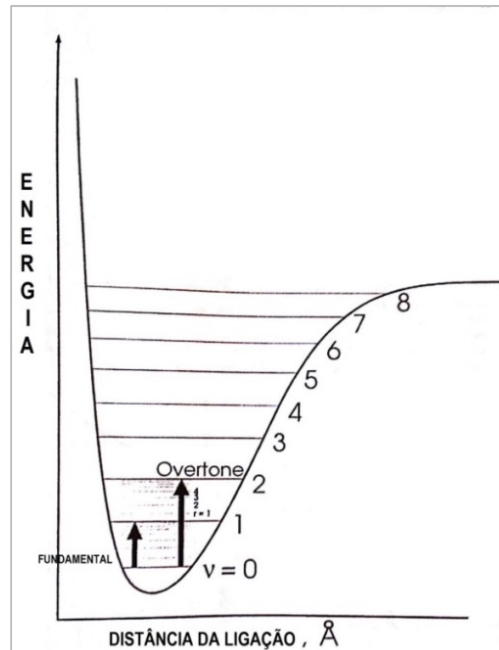


**Figura 6:** Esquema da interação do vetor elétrico com a molécula de H-Cl. Os símbolos  $\delta^+$  e  $\delta^-$  mostram as cargas positivas e negativas parciais no hidrogênio e no cloro nas extremidades da molécula. FONTE:

Adaptado de SMITH, 1999.

A segunda condição necessária para a absorção da radiação pela molécula será quando a luz incidente apresentar uma energia igual à diferença entre os níveis de energia vibracional da molécula. Conforme Smith (1999), as moléculas só se relacionam com energias quantizadas, por isso ela irá absorver a energia do fóton que seguir os critérios acima

mencionados. Na temperatura ambiente, a maioria das moléculas está no Nível Vibracional Base (*Ground Vibrational State*),  $v=0$ . A Figura 7 mostra o diagrama dos níveis de energia permitido pela molécula da água.



**Figura 7:** Diagrama dos níveis de energia permitido pela molécula da água, onde no eixo X aparece a distância da ligação O-H (1 Angstrom =  $1.10^{-10}$ m) e no eixo Y a energia potencial molecular medida em comprimento de onda (Angstrom). FONTE: Adaptado de SMITH, 1999.

Quando a molécula absorve energia e pula para o primeiro nível vibracional, é dito que ela passou para uma Transição Fundamental (*Fundamental Transition*), de  $v=0$  para  $v=1$ . As moléculas também podem saltar  $v=0$  para os níveis mais altos, como  $v=2$ ,  $v=3$  e  $v=4$ , este tipo de transição é chamado de *Sobretom (Overtone)*. A maioria das moléculas tem o seu nível de energia  $v=1$  no intervalo de número de onda<sup>1</sup> (W),  $4000-400\text{cm}^{-1}$  ( $2,5 - 25\mu\text{m}$ ), isso significa que suas bandas de absorção aparecerão na região do infravermelho médio e distante. Segundo Swyler et al. (1975) o nível fundamental do cimento Portland apresenta feições na região entre  $9,5-22 \mu\text{m}$ .

<sup>1</sup> Na espectroscopia usa-se a unidade número de onda (W) ao invés de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) para diferenciar tipos de energia eletromagnética. O número de onda é definido como o inverso do  $\lambda$  e medido em  $\text{cm}^{-1}$ .

Os níveis vibracionais de energia são igualmente espaçados, ou seja, uma molécula de água no nível  $v=1$  apresenta a sua banda de absorção em  $3750\text{ cm}^{-1}$  ( $2,66\mu\text{m}$ ), enquanto que o nível  $v=2$  estará localizado por volta de  $5380\text{ cm}^{-1}$  ( $1,33\mu\text{m}$ ). Isso significa que absorveu mais energia, logo a banda de absorção se deslocou para a esquerda na curva espectral, direção onde os comprimentos de onda diminuem e a energia aumenta no espectro eletromagnético. As regiões do espectro onde estão localizadas as bandas ocasionadas pelos *sobretons* (*Overtones*) podem ser identificadas a partir do nível fundamental de uma molécula, por exemplo, se no nível  $v=1$  o material possui uma feição em  $2500\text{ cm}^{-1}$  ( $4\mu\text{m}$ ), então  $v=2$  aparecerá por volta de  $5000\text{ cm}^{-1}$  ( $2\mu\text{m}$ ),  $v=3$  próximo de  $10000\text{ cm}^{-1}$  ( $1\mu\text{m}$ ) e assim por diante.

No entanto, os picos de absorção vão se tornando cada vez mais fracos à medida que se aumenta o nível de energia absorvido:  $v=0$  para  $v=2$  a feição torna-se 10 vezes mais fraca,  $v=0$  para  $v=3$  e 100 vezes mais fraca e etc. Desta forma, recomenda-se trabalhar em regiões do espectro que absorvam menos energia e apresentem bandas mais intensas.

É possível ativar vários modos vibracionais ao mesmo tempo, através de uma única energia, principalmente para moléculas compostas por muitos átomos. Segundo Smith (1999) é denominado Combinação de Bandas quando a quantidade de energia incidente em uma molécula for capaz de conciliar mais de um modo de absorção. Isto é, quando apresentar energia igual à necessária para ocorrer um *sobretom* (*overtone*) e um *estiramento assimétrico* (*asymmetric stretch*). Por exemplo, na molécula de água uma energia de  $5380\text{ cm}^{-1}$  ( $1,85\mu\text{m}$ ) pode ocasionar um *estiramento assimétrico* (*asymmetric stretch*) (infravermelha ativa) que aparecerá em  $3750\text{ cm}^{-1}$  ( $2,66\mu\text{m}$ ) e uma deformação angular (*bending vibrational*) em  $1630\text{ cm}^{-1}$  ( $6,13\mu\text{m}$ ). Esses dois modos vibracionais foram possíveis porque  $5380\text{ cm}^{-1}$  é a soma de  $3750 + 1630\text{ cm}^{-1}$  e por isso foi possível conciliar mais de uma banda de absorção.

Segundo Hunt (1977) são com estes *sobretons* (*overtones*) e combinações de bandas que podemos identificar a presença dos grupos funcionais na região do infravermelho próximo. As bandas de absorção encontradas nesta região do espectro eletromagnético são feições causadas pelos níveis vibracionais acima do fundamental, junto com combinações de grupos funcionais que tem alta frequência no nível fundamental. Porém são poucos os que possuem essa frequência e, de longe, a mais importante delas é o grupo OH.

## **2.2.4 Uso de técnicas de sensoriamento remoto para avaliação não-destrutiva de materiais cimentícios à base de cimento Portland**

### **2.2.4.1 Identificação de diferentes resistências mecânicas de um mesmo produto à base de cimento Portland**

A maioria dos compostos inorgânicos aparece no estado cristalino e o modo como os átomos estão dispostos no cristal afetam o espectro do material (SMITH, 1999). O tamanho de alguns cristais formados nos materiais cimentícios à base de cimento Portland muda de acordo com a resistência mecânica, pois quanto mais poros e vazios capilares surgem, mais espaço livre aparece para o desenvolvimento dos produtos do processo de hidratação. Essa variação estrutural ocorre devido à diferente dosagem dos materiais, uma vez que quanto maior for a relação a/c, maior será o tamanho dos cristais e conseqüentemente menor será a resistência mecânica (WINSLOW e LIU, 1990; NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Técnicas de sensoriamento remoto proximal são sensíveis na percepção dos espaços livres, localizados na superfície do alvo analisado. Quanto menor os cristais, maior é a quantidade de espaços superficiais entre os compostos e com isto maior será a quantidade de radiação incidente transmitida.

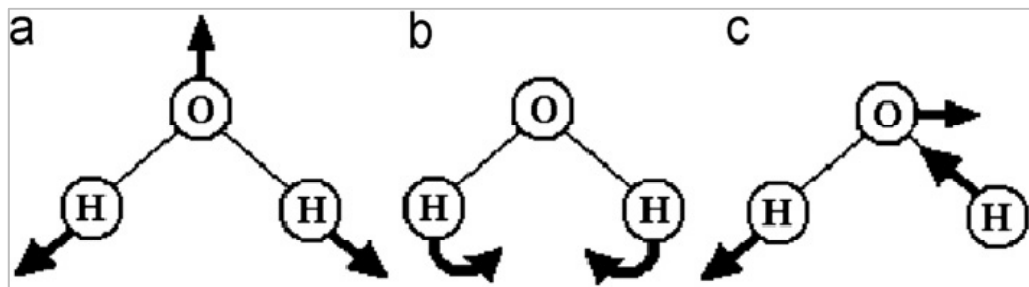
Conforme mencionado no item 2.1.5.1, à medida que se diminui a relação a/c dos materiais cimentícios à base de cimento Portland, a quantidade de cimento/m<sup>3</sup> aumenta resultando em misturas mais densas e com uma aparência mais escura. Esta mudança de tonalidade auxiliará na diferenciação das amostras, visto que é uma característica capaz de ser detectada pelas técnicas utilizadas.

### 2.2.4.2 Detecção da presença e proporção de água nos produtos

A água líquida possui três modos vibracionais que são observados, quando excitados, nas regiões  $V_1= 3.106 \mu\text{m}$ ;  $V_2= 6.08 \mu\text{m}$  e  $V_3= 2.903 \mu\text{m}$  (Figura 8 e Tabela 5). Na região do infravermelho próximo podem aparecer cinco feições de absorção, classificadas como sobretons (overtones) e combinações de bandas. As duas feições de interesse neste estudo são as feições localizadas próximas a  $1,454 \mu\text{m}$  ( $2V_1 + V_3$ ) e  $1,875 \mu\text{m}$  ( $V_2 + V_3$ ) (HUNT e SALISBURY, 1970; HUNT, 1977).

Através da curva espectral é possível identificar a presença da água em um material. Isto é possível quando as duas bandas de absorções localizadas próximas a  $1,4$  e  $1,9\mu\text{m}$ , aparecerem juntas na assinatura espectral da amostra. Estas duas feições, quando possuírem bandas com largura em um intervalo acima de 100 comprimentos de onda, indicam que a molécula de água não se encontra em uma posição bem definida ou que a molécula ocupa mais de uma posição dentro do material. A presença conjunta destas duas feições também sugere que as moléculas de água não estão dissolvidas no material e podem estar presas entre a estrutura cristalina.

A variação da quantidade de água pode ser detectada, através destas duas bandas ( $1,4$  e  $1,9\mu\text{m}$ ), pela profundidade da feição de absorção. A intensidade do pico está associada com a quantidade desse material na amostra (HUNT e SALISBURY, 1970; HUNT, 1977; GHANDEHARI et al., 2012).



**Figura 8:** Modos vibracionais da molécula de água: (a)  $V_1$  Modo Estiramento Simétrico do OH, (b)  $V_2$  OH Modo flexão (*Bending Mode*) e (c)  $V_3$  Modo Estiramento Assimétrico do OH. FONTE: GHANDEHARI et al., 2012.

**Tabela 5:** Feições de absorção da água.

Água (H <sub>2</sub> O)		
	Micrômetros (μm)	Número de Onda (cm <sup>-1</sup> )
Modos vibracionais H <sub>2</sub> O <sub>líquida</sub>		
V <sub>1</sub> Estiramento Simétrico do OH	3.106	3.219
V <sub>2</sub> OHO flexão ( <i>bend</i> )	6.08	1.644
V <sub>3</sub> Estiramento Assimétrico do OH	2.903	3.444
Sobretom (Overtones) + Combinações		
V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub>	+/- 1.875	5.333
2V <sub>1</sub> + V <sub>3</sub>	+/- 1.454	6.877
V <sub>1</sub> + V <sub>3</sub>	+/- 1.38	7.246
V <sub>1</sub> + V <sub>2</sub> + V <sub>3</sub>	+/- 1.135	8.810
2V <sub>1</sub> + V <sub>3</sub>	+/- 0.942	10.615

FONTE: Adaptado de HUNT, 1977.

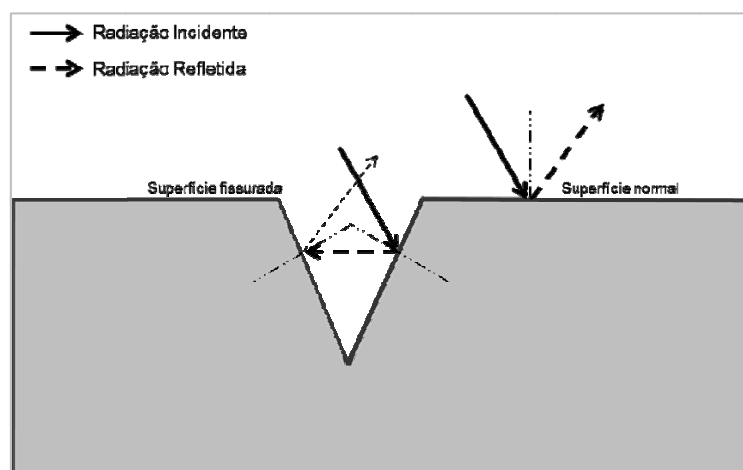
#### 2.2.4.3 Detecção de microfissuras ocasionadas pelo carregamento precoce do concreto

O concreto é um material heterogêneo e poroso composto por três constituintes principais: a pasta de cimento endurecida, as partículas de agregado (brita) e a zona de transição. Tanto a matriz da pasta como a zona de transição (camada de pasta em contato com os agregados graúdos) apresentam uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras. Essas fases sofrem modificações em função do tempo, da umidade e da temperatura do ambiente (METHA e MONTEIRO, 1994).

Independentemente da origem das microfissuras (química, física ou mecânica), sua propagação pode influenciar as propriedades mecânicas e de transporte de massa do concreto (FERREIRA et al., 2002). O emprego de técnicas de sensoriamento remoto constitui-se em uma boa alternativa para a identificação de heterogeneidades em matrizes cimentícias tais como, porosidade e microfissuras.

Quando a radiação incide sobre um alvo, de acordo com a sua interação com a superfície do material, a energia pode ser fracionada em três partes: absorvida, refletida e transmitida. A radiação que não foi absorvida pelo material, nem transmitida, é imediatamente refletida, sendo capturada pelos sensores que irão imprimir esta informação na forma de uma curva espectral. Esta curva será a assinatura espectral (impressão digital) do alvo, onde irá mostrar informações do concreto referentes à região do espectro eletromagnético em que o sensor está habilitado (HUNT, 1977).

Nas amostras de concreto, por exemplo, o objetivo é identificar o efeito da presença de microfissuras. A radiação incidente penetra nestas microfendas sendo rebatida inúmeras vezes no seu interior. Ao longo do tempo, pode retornar para o meio com uma intensidade de reflectância menor, ou, muitas vezes, ser impreterivelmente transmitida no interior do material (SHAM et al., 2008). A Figura 9 apresenta o comportamento da radiação ao incidir em um alvo sob duas circunstâncias distintas: uma superfície normal e uma fissurada.



**Figura 9:** Radiação incidente em superfícies com e sem fissuras. FONTE: Adaptado de SHAM et al., 2008.

### 2.3 Método estatístico: Análise *wavelet*

O uso da ferramenta *wavelet* na matemática aplicada surgiu em torno dos anos 80 e desde lá vem trazendo resultados favoráveis. Denomina-se *wavelet* uma função ondulatória cuidadosamente estruturada por propriedades matemáticas e seu método pode ser considerado um aprimoramento da Análise de *Fourier*.

A Transformada de *Fourier* (TF) é uma técnica que permite a representação de um sinal temporal no domínio da frequência, mas é totalmente incapaz de tratar com sinais de natureza não-estacionária<sup>2</sup>. A Transformada de *Wavelet* (TW), entretanto, é aplicável em qualquer tipo de sinal (estacionário e não-estacionário), que contenha informações interessantes extraídas tanto no domínio do tempo quanto no da frequência.

<sup>2</sup> Natureza estacionária: são fenômenos que apresentam tendências no seu conteúdo frequencial ao longo de um período de tempo relativamente curto (BONALDO, 1991).



A TW é capaz de decompor um sinal em diferentes níveis de resolução, através da variação da largura das bandas (janelas) que percorrem o sinal. Isso significa que é possível detectar diferentes feições no material, e conseqüentemente diferentes componentes químicos, de acordo com o nível de decomposição da onda (OGDEN, 1997; ROBERTSON et al., 1996).

Dessa forma, as áreas de aplicação desta ferramenta estatística estão crescendo, estendendo-se desde medições de grandeza mecânica (vibrações), mecânica dos fluidos (acústica) até a medicina (tratamento da voz) (BONALDO, 1991). Os materiais cimentícios à base de cimento Portland são formados por diversos materiais que formam o seu sinal resultante. As curvas espectrais desses materiais cimentícios são classificadas como não-estacionárias e por isso a análise estatística será executada através da aplicação da transformada de *wavelet*.

O objetivo, nesta análise dos dados, é aplicar métodos matemáticos e probabilísticos que permitam decompor os sinais (espectro) em suas partes constituintes com o objetivo de analisar os dados em diferentes domínios e empregar estes resultados no estudo dos efeitos da adição de água na argamassa e na pasta.

A estratégia será pautada na aplicação de modelos que permitam identificar segundo o fator água, as singularidades e as diferenças, nos padrões que identifiquem a parcela da assinatura original relacionada à origem da amostra, que deverá servir de base para identificações futuras da resistência do material segundo a adição de água e a resposta observada por meio de sensoriamento Remoto.

A ideia é transformar cada espectro em um conjunto de cristais e/ou coeficientes *wavelets* em dimensão suficiente para reconstruir o sinal original. Existem boas razões para acreditar que esta abordagem pode ter vantagens sobre a escolha de variáveis originais, visto que estarão isentas de ruídos aleatórios.

Sabe-se que *wavelets* podem ser empregadas com sucesso para compressão de curvas, como por exemplo, de um espectro, e é conhecido que as curvas podem ser reconstruídas exatamente a partir de uma parte do conjunto total de coeficientes. Além disto, se a informação relevante para o nosso problema de identificação está contida em uma parte particular ou em partes da curva, como tipicamente acontece, esta informação será alocada, integralmente, por um número muito pequeno de coeficientes *wavelets*. A habilidade das *wavelets* em modelar a curva em diferentes níveis de resolução, oferece a possibilidade de selecionar a curva em diferentes faixas de amplitude. Em algumas situações isto pode ser vantajoso para selecionar uma banda de picos, como é feito muitas vezes com as variáveis

originais. De outra forma, uma banda mais suave obtida sobre muitos pontos adjacentes, pode ser preferível. A seleção a partir dos coeficientes *wavelets* proporciona toda esta flexibilidade.

Não surpreende que a análise de *Fourier* tenha sido empregada com sucesso para a compressão de dados e remoção de ruídos de dados espectrais. Para esta proposta (compressão) não há diferenças entre as metodologias, *Fourier* e *Wavelets*. No entanto, quando o objetivo é selecionar um pequeno número de coeficientes para a identificação e/ou predição, a escolha da abordagem *wavelets* é indiscutível, como por exemplo, na predição dos percentuais de águas e a resistência esperada. A seleção de alguns coeficientes *wavelets* não se dá porque eles permitem uma boa reconstrução da curva, ou porque removem ruídos, mas porque os coeficientes são hábeis para a predição de alguma outra quantidade de interesse intrínseca ao espectro. A consequência disto é que não necessariamente o coeficiente *wavelet* grande será importante para a predição, mas coeficientes pequenos, em regiões críticas do espectro, podem conter importantes informações para a predição de um determinado cenário.

## **3 MATERIAIS E MÉTODO**

### **3.1 Materiais**

As amostras analisadas provêm de três trabalhos de doutorado em andamento no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Corpos-de-prova com quatro relações a/c (0,17; 0,21; 0,30 e 0,50) de amostras de pasta de cimento e quatro relações a/c de argamassa foram selecionadas para este trabalho para determinar se existe uma distinção no comportamento espectral de diferentes resistências mecânicas. Corpos-de-prova de concreto, com mesma relação a/c, porém com formas geométricos (cilíndrica e prismática) e situações de deformação estrutural diferentes também foram avaliadas.

#### **3.1.1 Amostras de Pasta de Cimento Portland**

A análise do comportamento espectral de pasta de cimento foi feita com 3 corpos de prova para cada uma das 4 resistências à compressão axial (relação água/cimento: 0,17; 0,21; 0,30 e 0,50), totalizando 12 exemplares com dimensões de 5x10cm (LxA) cada. A dosagem de cada corpo-de-prova pode ser analisada através da Tabela 6. Todos os traços são produzidos com os mesmos materiais (mesmo lote inclusive) e todos contêm água, cimento Portland, sílica ativa e aditivo superplastificante.

**Tabela 6:** Dosagem das amostras de pasta de cimento e resistência à compressão axial aos 28 dias.

	<b>Cimento Portland – CPV-ARI (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Sílica Ativa (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Água (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Aditivo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Aditivo (%)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Resistência (MPa)</b>
<b>CURVA 01</b>	827	92	449	0	0,00%	<b>0,50</b>	47,4
<b>CURVA 02</b>	1081	120	359	7,4	0,62%	<b>0,30</b>	83,1
<b>CURVA 03</b>	1272	141	292	16,7	1,18%	<b>0,21</b>	116,7
<b>CURVA 04</b>	1368	152	258	21,5	1,42%	<b>0,17</b>	128

### 3.1.2 Amostras de Argamassa de Cimento Portland

A análise do comportamento espectral da argamassa foi feita também com 3 corpos de prova para cada uma das 4 resistências à compressão axial (relação água/cimento: 0,17; 0,21; 0,30 e 0,50), totalizando 12 exemplares. As amostras de argamassa provem do mesmo processo de fabricação das pastas de cimento, com dimensões de 5x10cm (LxA) cada. A dosagem de cada corpo-de-prova pode ser analisada através da Tabela 7. Todos os traços são produzidos com os mesmos materiais (mesmo lote inclusive) e todos contêm água, cimento Portland, areia do rio Jacuí (ABNT, 2012), sílica ativa e aditivo superplastificante.

**Tabela 7:** Dosagem das amostras de Argamassa e resistência à compressão axial aos 28 dias.

	<b>Cimento Portland – CPV-ARI (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Sílica Ativa (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Água (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Aditivo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Aditivo (%)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Resistência (MPa)</b>
<b>CURVA 05</b>	414	46	224	863	0	0,00%	<b>0,50</b>	44,5
<b>CURVA 06</b>	541	60	180	786	5	0,85%	<b>0,30</b>	84,8
<b>CURVA 07</b>	636	71	146	690	10	1,46%	<b>0,21</b>	109,3
<b>CURVA 08</b>	684	76	129	671	21,5	2,83%	<b>0,17</b>	136

### 3.1.3 Amostras de concreto de cimento Portland

A análise do comportamento espectral do concreto foi feita também com 3 corpos de prova para cada uma das 4 amostras, referente aos corpos-de-prova CR (cilíndrico de

referência), CPC (cilíndrico pré-carregado), PR (prismático de referência) e PPC (prismático pré-carregado). A dosagem de cada corpo-de-prova pode ser analisada através da Tabela 8. Todos os traços são produzidos com os mesmos materiais (mesmo lote inclusive) e todos contêm: cimento Portland, água, areia do rio Jacuí (ABNT, 2012) e brita.

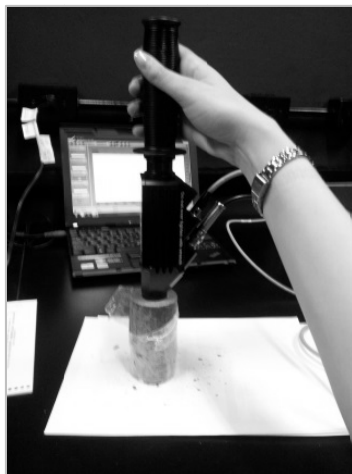
Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20) cm e prismáticos (7,5 x 7,5 x 28,5) cm, utilizando-se cimento Portland de alta resistência inicial - CP V ARI (ABNT, 1991) e relação água/cimento (rel. a/c) 0,50. Os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos a um carregamento por compressão axial (ABNT, 2007) e os prismáticos, à tração na flexão (ABNT, 1991), para simular o efeito do pré-carregamento causado pela remoção antecipada do escoramento da estrutura. Foram moldados, também, corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de referência, isto é, não submetidos ao carregamento.

**Tabela 8:** Dosagem das amostras de concreto e a resistência mecânica, aos 28 dias, dos corpos-de-prova de referência.

		Cimento Portland – CPV-ARI (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/c	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração na flexão (kN)
<b>CURVA 09</b>	<b>CR</b>	381	190,5	830,58	1120,14	<b>0,50</b>	42,61	-
<b>CURVA 10</b>	<b>CPC</b>	381	190,5	830,58	1120,14	<b>0,50</b>	-	-
<b>CURVA 11</b>	<b>PR</b>	381	190,5	830,58	1120,14	<b>0,50</b>	-	10 kN
<b>CURVA 12</b>	<b>PPC</b>	381	190,5	830,58	1120,14	<b>0,50</b>	-	-

### 3.1.4 Medidas de Radiância

As medidas de radiância dos materiais cimentícios à base de cimento Portland foram realizadas com o Espectrorradiômetro FieldSpec 3, fabricado pela *Analytical Spectral Devices* (ASD, *Incorporated*, Boulder, Colorado), que contém três sensores não-fotográficos que detectam a radiação eletromagnética refletida dos alvos na região do visível ao infravermelho próximo (0,35 µm e 2,5 µm). Foi utilizado o *Hi-Brite Contact Probe* (Figura 10), indicado para medições de contato não-destrutivo em amostras sólidas, evitando erros de medição associados à radiação difusa (ASD, 1999; LAU, et al., 2003). A Tabela 9 apresenta algumas especificações técnicas sobre o espectrorradiômetro FieldSpec® 3 e a Tabela 10 informações do o acessório utilizado.



**Figura 10:** *Hi Brite Contact Probe* em operação.

**Tabela 9:** Especificações técnicas do equipamento.

<b>Espectrorradiômetro FieldSpec® 3</b>	
Número de canais:	2151
Intervalo espectral:	350-2.500 nm ou 0,35-2,5µm
Resolução espectral:	3 nm a 700 nm; 8.5 nm a 1.400 nm e 6.5 a 2.100 nm
Taxa de varredura:	0,1s para aquisição de espectros individuais e 1,5s para a média de 10 espectros
Intervalo de amostragem:	1,4 nm para 350 - 1000 nm e 2 nm para 1000 - 2500 nm
Dimensão aproximada:	12,7 x 35,6 x 29,2cm
Peso:	5,6 kg

FONTE: Adaptado de ASD, 1999.

**Tabela 10:** Parâmetros configuracionais do acessório *Contact Probe*.

<b>Parâmetro</b>	<b><i>Contact Probe</i></b>
Comprimento	10" (25.4cm)
Peso	1.5 lbs (0.7 kg)
Requisitos de energia	12-18 VDC, 6.5W
Fonte de iluminação tipo/vida (aprox..)	Lâmpada Halógena/ 1500 horas
Lâmpada Halógena temperatura da cor	2901 +/- 10% K
Tamanho da lente	10mm

FONTE: Adaptado de ASD, 1999.

## 3.2 Método

Todas as amostras de materiais cimentícios produzidas pelo Laboratório LAMTAC/NORIE da UFRGS, posteriormente foram medidas com o espectrorradiômetro no Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico (LAB-SRGEO) da UFRGS. Ensaio de resistência à compressão axial foram realizados nas amostras de pasta e de argamassa, após os 28 dias de moldagem, para a obtenção do valor da resistência mecânica dos corpos-de-prova. Lembrando que 28 dias é a idade de ensaio e parâmetro de referência da maioria dos projetos estruturais (ABNT, 2014). Cada amostra de concreto foi submetida a um ensaio de resistência diferente. Os corpos-de-prova cilíndricos (CPC) foram submetidos ao carregamento por compressão axial e os prismáticos (PPC) à tração na flexão, com objetivo de simular o efeito do carregamento precoce.

### 3.2.1 Pré-carregamento dos concretos

O pré-carregamento dos dois tipos de concreto foi realizado na idade de 3 dias após a moldagem. Para os concretos cilíndricos foram rompidos 3 corpos-de-prova à compressão axial para se obter a resistência à compressão na idade de 3 dias. Após, aplicou-se o valor correspondente a 75% da carga média de ruptura em 8 corpos-de-prova cilíndricos, destinados à realização de vários ensaios correlacionados com os trabalhos dos alunos de doutorado do NORIE. Destes corpos-de-prova pré-carregados, 3 foram utilizados no LAB-SRGEO para medir a radiância. Para os concretos prismáticos, 3 corpos-de-prova foram rompidos à tração na flexão. Posteriormente, aplicou-se em 6 corpos-de-prova prismáticos 75% da carga média de ruptura. Destes corpos-de-prova pré-carregados, 3 foram utilizados no LAB-SRGEO para medir a radiância.

Todos os corpos-de-prova, após o pré-carregamento, retornaram ao ambiente de cura, onde permaneceram armazenados juntamente com os respectivos corpos-de-prova de referência (CR e PR). Os valores de resistência à compressão axial e à tração na flexão, Tabela 8, foram adquiridos através do rompimento dos corpos-de-prova de referência no 28º dia. As medições de radiância foram realizadas após os 28 dias de cura.

### 3.2.2 Medições em laboratório com o espectrorradiômetro

Técnicas de sensoriamento remoto proximal são utilizadas quando o alvo analisado precisa de informações mais detalhadas ou sua dimensão não consegue ser detectada pela resolução dos sensores orbitais ou apresentam grande heterogeneidade espacial e espectral (WELCH, 1982; CHEN E HEPNER, 2001; HEROLD et al., 2004; NETZBAND et al., 2011). Nesta pesquisa foi utilizado um sensor não-fotográfico que detecta a radiação eletromagnética refletida dos alvos na região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (ASD, 1999).

Uma parte da radiação incidente (irradiância) sobre a superfície do alvo é refletida (radiância), sendo captada pelos sensores (radiômetros). Essa radiância é transformada em sinal elétrico pelo equipamento que é convertido em uma curva espectral de intensidade de radiação refletida, chamada reflectância espectral  $\rho_\lambda$  (LILLESAND et al., 2008).

As medições de radiância dos três tipos de materiais cimentícios à base de cimento Portland foram realizadas após os 28 dias de cura. Os valores de radiância foram convertidos para Fator de reflectância (Fr), que é a razão entre a radiância espectral da amostra e uma superfície de referência Lambertiana, considerando-se as mesmas condições de observação e iluminação (NICODEMUS et al., 1977). Como pode ser visto na Equação 3.1, o Fator de reflectância é o valor de reflectância da própria amostra (Equação 3.2), pois a Irradiância (densidade de fluxo radiante incidente pela área da superfície plana) será a mesma e a reflectância de uma superfície lambertiana é, por definição, igual a 1 (MILTON et al., 2009).

A interpretação dos espectros dos três materiais cimentícios foi efetuada com base na análise das feições de absorção da água e na intensidade de Fator de reflectância de cada curva. Nas amostras de concreto pré-carregados (CPC e PPC) não foi realizada análise experimental prévia das microfissuras para a realização das medições com o espectrorradiômetro, pois este estudo foi feito pelos doutorandos do NORIE.

$$Fr = \frac{\frac{\rho_{amostra} \cdot E_i}{\pi}}{\frac{\rho_{Lambertiana} \cdot E_i}{\pi}} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$Fr = \rho_{amostra} \quad \text{Equação 3.2}$$



A referência branca foi medida sempre antes de uma nova amostra para o software poder calcular o Fator de reflectância individual de cada amostra sob as mesmas condições de observação e iluminação. A Tabela 11 mostra quantas amostras diferentes foram medidas.

**Tabela 11:** Detalhamento e quantificação das leituras realizadas com o espectrorradiômetro.

Identificação das amostras	Produto à base de cimento Portland		Relação a/c	Número de amostras	Total de curvas espectrais	Número final de curvas espectrais
Curva 01	Pasta de cimento		0,50	3	9	1
Curva 02			0,30	3	9	1
Curva 03			0,21	3	9	1
Curva 04			0,17	3	9	1
Curva 05	Argamassa		0,50	3	9	1
Curva 06			0,30	3	9	1
Curva 07			0,21	3	9	1
Curva 08			0,17	3	9	1
Curva 09	Concreto	Cilíndrico de referência (CR)	0,50	3	9	1
Curva 10		Cilíndrico pré-carregado (CPC)	0,50	3	9	1
Curva 11		Prismático de referência (PR)	0,50	3	9	1
Curva 12		Prismático pré-carregado (PPC)	0,50	3	9	1

### 3.2.3 Montagem dos espectros eletromagnéticos dos três tipos: pasta de cimento, argamassa e concreto

A análise exploratória dos espectros foi realizada por meio de diagrama de Fator de reflectância espectral com cada tipo de produto. Os eixos do gráfico estão representados pelo Fator de reflectância ( $\rho$ ) em Y e pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) em X.

### 3.2.4 Análise *Wavelet*

A estratégia para a análise dos dados inclui as análises estatísticas tradicionais como técnicas exploratórias e a decomposição do sinal (*wavelets*). A transformação *Wavelet* é aplicável a qualquer tipo de sinal cujo objetivo é observar intensidades em evolução no tempo e no espaço, como por exemplo, na análise de um cromatograma caracterizado por muitos picos (intensidades) que correspondem às diferentes composições constituintes das pastas e das argamassas. No presente estudo a técnica foi empregada para identificar às características próprias e singulares de cada material. Para isto, serão avaliadas diferentes funções *wavelet*.

Na análise do sinal ou parte dele, inicialmente será necessário isolar a linha base, e se necessário eliminar ruídos de leitura, expressando, desta forma, na mesma escala, a intensidade dos picos das diferentes amostras. A adequação dos modelos será avaliada estatisticamente.

O objetivo do uso da análise de *wavelet* neste trabalho foi decompor cada curva de cada relação a/c em vários níveis de resolução para buscar alguma feição mascarada pela soma das curvas que compõe a assinatura espectral final de cada resistência mecânica. Este método também é importante para comprovar estatisticamente a variação da amplitude nas feições de absorção da água entre relações a/c e identificar se as curvas das réplicas, com mesma relação a/c e da mesma amostra são iguais.

No processamento dos sinais, analisou-se cada curva espectral em três intervalos diferentes de comprimento de onda: (i) entre 1,3-1,5 $\mu\text{m}$ , (ii) entre 1,8-2,2  $\mu\text{m}$  e (iii) entre 0,35-2,5  $\mu\text{m}$ . As assinaturas espectrais estudadas foram as curvas referente às amostras de pasta e de argamassa. Os intervalos (i) e (ii) foram selecionados para visualizar com maior precisão a forma e amplitude das feições de absorção localizadas em torno de 1,4 e 1,9  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Os gráficos referentes aos intervalos (i) e (ii), mostrarão as curvas decompostas em 4 e 5 níveis, respectivamente. O intervalo (iii) foi selecionado para diferenciar as resistências mecânicas das amostras.

O número de níveis de decomposição ou cristais é determinado pela capacidade de adequação da função ao tamanho da amostra (comprimento de onda). No caso das amostras de pasta e argamassa no intervalo (iii), por exemplo, no sétimo nível de resolução o modelo atingiu 99,99% da variabilidade, de modo que um oitavo nível não adicionaria informações relevantes, somente ruídos do sinal. Aplicou-se às curvas a função *wavelet* bs2.8 e cada nível

de decomposição foi expresso somente com valores significativos maiores que duas vezes o estimador robusto do desvio padrão (2x MAD) (BRUCE e GAO, 1996.)

A transformação *Wavelet* discreta produz como resultado um vetor de coeficientes *wavelets*. Os coeficientes estão ordenados a partir de uma escala mais grosseira a uma escala mais fina em um vetor  $W$ , expresso pela Equação 3.3.

$$W = \begin{pmatrix} s_j \\ d_j \\ s_{j-1} \\ \vdots \\ s_1 \end{pmatrix} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde,

$$\begin{aligned} s_j &= (s_{j,1}, s_{j,2}, \dots, s_{j,\frac{n}{2^j}})' \\ d_j &= (d_{j,1}, d_{j,2}, \dots, d_{j,\frac{n}{2^j}})' \\ d_{j-1} &= (d_{j-1,1}, d_{j-1,2}, \dots, d_{j-1,\frac{n}{2^{j-1}}})' \\ &\vdots \\ d_1 &= (d_{1,1}, d_{1,2}, \dots, d_{1,\frac{n}{2}})' \end{aligned} \quad \text{Equação 3.4}$$

Na Equação 3.4, cada conjunto de coeficientes  $s_j, d_j, d_{j-1}, \dots, d_1$  é denominado de Cristal. O conjunto de coeficientes *wavelets* que formam um cristal corresponde a um conjunto de transformações *wavelets* organizadas em uma malha regular. O cristal é comumente referenciado como uma sub-banda, um termo que se origina de uma estreita ligação entre *wavelets* e a filtragem em diferentes sub-bandas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados

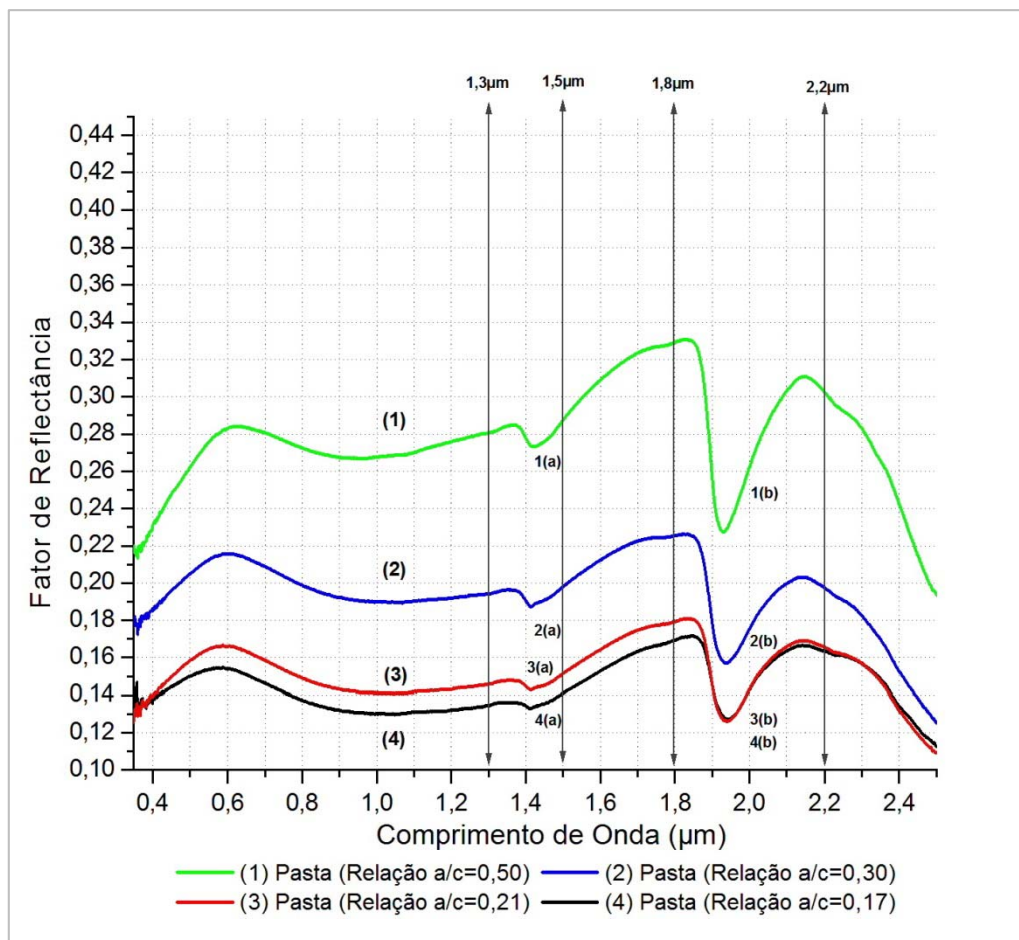
Serão descritos individualmente os gráficos das curvas espectrais das amostras dos três materiais cimentícios à base de cimento Portland (pasta, argamassa e concreto). Posteriormente, foi utilizado um modelo estatístico, fundamentado no método Transformada *Wavelet*, para validar os resultados encontrados.

#### 4.1.1 Curvas Espectrais das Amostras de Pasta de cimento

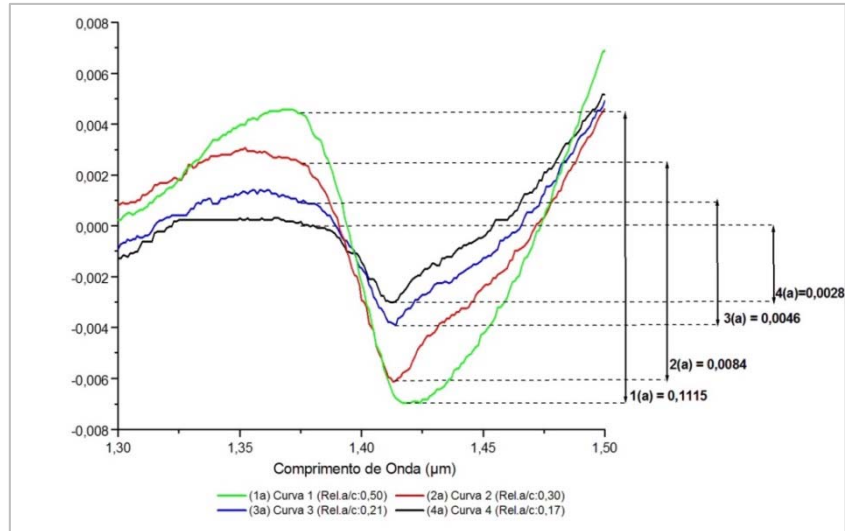
A análise exploratória dos espectros foi realizada por meio de um diagrama de Fator de reflectância espectral com as quatro resistências mecânicas da amostra de pasta: (1) Relação a/c 0,50; (2) Relação a/c 0,30; (3) Relação a/c 0,21 e (4) Relação a/c 0,17. Os eixos do gráfico estão representados pelo Fator de reflectância ( $\rho$ ) em Y e pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) em X (Figura 11).

De uma forma geral, sem uma análise estatística aprofundada, as assinaturas espectrais apresentam um comportamento similar, com diferenças em termos de contraste, intensidade de Fator de reflectância, profundidade de feições de absorção e inclinação. Observam-se curvas com contraste espectral não homogêneo, dispostas em ordem crescente de Fator de reflectância à medida que a resistência mecânica diminui (Tabela 12). Somente as curvas 3 e 4 se interceptam em 3 pontos, apresentando valores idênticos de Fator de reflectância em torno de 1,90  $\mu\text{m}$ , 1,98  $\mu\text{m}$  e 2,30  $\mu\text{m}$ , ao longo de todo o intervalo analisado. A curva que apresenta maior Fator de reflectância em todo o intervalo espectral (0,35-2,5  $\mu\text{m}$ ) é correspondente à amostra de pasta com menor resistência (Relação a/c 0,50). Em todas as assinaturas observam-se duas feições com picos mais acentuados próximos a  $\lambda=1,4 \mu\text{m}$  e  $\lambda=1,9 \mu\text{m}$ .

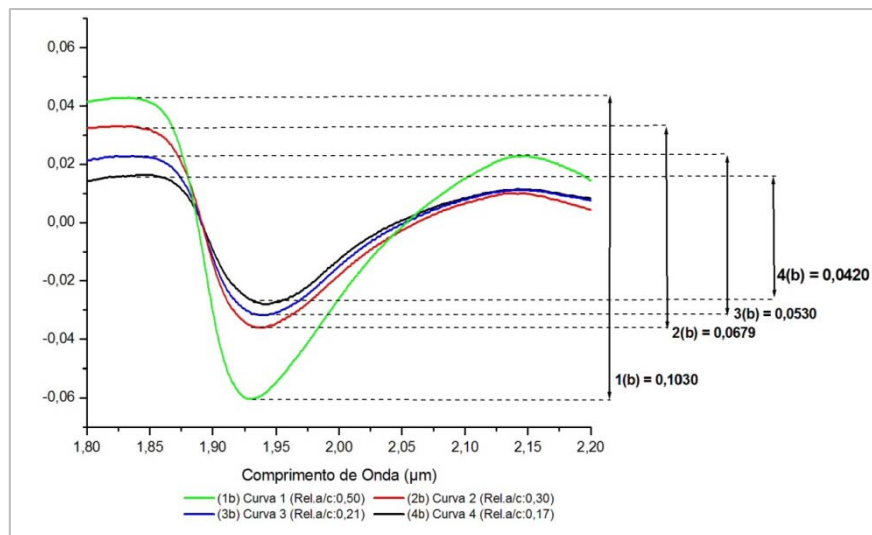
A Tabela 13 mostra a inclinação de cada curva na região do visível, entre 0,35-0,60  $\mu\text{m}$ , e a variação da profundidade das feições de absorção  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$ . Estas duas feições encontram-se na região do infravermelho próximo, entre 0,70-2,5  $\mu\text{m}$ , e enfraquecem em direção a curva 4, assinatura espectral com maior resistência mecânica. As Figura 12 e Figura 13 mostram os intervalos da feição de absorção  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  (entre 1,3-1,5 $\mu\text{m}$ ) e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$  (entre 1,8-2,2 $\mu\text{m}$ ), respectivamente. Os valores foram padronizados (o Fator de reflectância de cada comprimento de onda foi descontado da média do Fator de reflectância do intervalo analisado) com objetivo de analisar as curvas somente nas regiões das duas feições de absorção da água para avaliar o seu comportamento sem o efeito da amplitude total da curva. Assim, é possível verificar se a profundidade da feição realmente cresceu com o aumento da relação a/c. Na amostra de pasta, observa-se que as feições  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$ , com o auxílio da Tabela 13, apresentam um aumento da amplitude total de cada uma das duas feições proporcional ao aumento da relação a/c.



**Figura 11:** Comportamento Espectral das 4 amostras de resistência da pasta.



**Figura 12:** Variação da feição de absorção próxima a  $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero.



**Figura 13:** Variação da feição de absorção próxima a  $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero.

**Tabela 12:** Valores do Fator de reflectância da pasta.

Contraste entre as amostras de PASTA			
	FR (Ra/c 0,50) – FR (Ra/c 0,30)	FR (Ra/c 0,30) – FR (Ra/c 0,21)	FR (Ra/c 0,21) – FR (Ra/c 0,17)
<b>0,35<math>\mu\text{m}</math></b>	0,04080	0,05060	-0,00533
<b>0,60<math>\mu\text{m}</math></b>	0,06726	0,04960	0,01200
<b>1,372<math>\mu\text{m}</math></b>	0,08886	0,04834	0,01160
<b>1,417<math>\mu\text{m}</math></b>	0,08573	0,04454	0,00980
<b>1,834<math>\mu\text{m}</math></b>	0,10446	0,04554	0,00953
<b>1,928<math>\mu\text{m}</math></b>	0,06934	0,03060	-0,00147
<b>2,50<math>\mu\text{m}</math></b>	0,06800	0,01620	-0,00340

**Tabela 13:** Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.

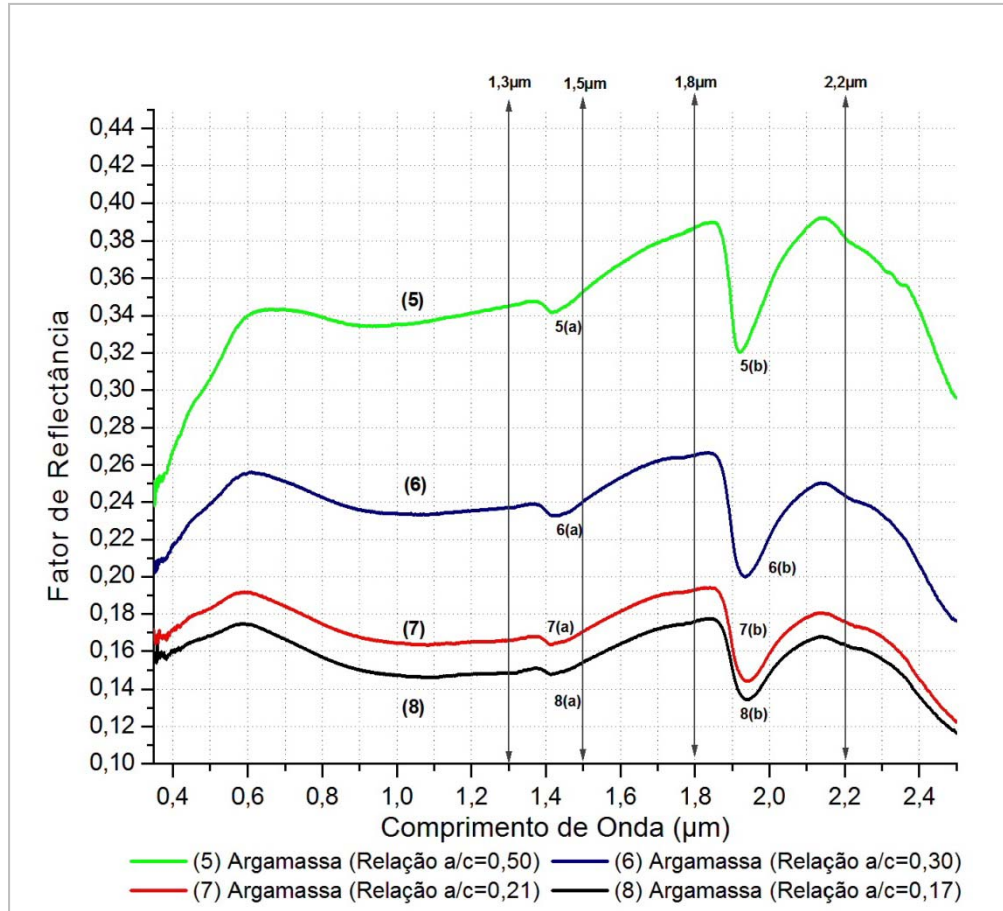
	Inclinação ( $\alpha$ ) entre 0,35-0,60 $\mu\text{m}$	$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1,4\mu\text{m}} =$		$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1,9\mu\text{m}} =$	
		$\text{FR}_{1,372\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,417\mu\text{m}}$		$\text{FR}_{1,834\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,928\mu\text{m}}$	
<b>Curva 1</b>	15°	<b>1a)</b>	0,0115	<b>1b)</b>	0,1030
<b>Curva 2</b>	8,91°	<b>2a)</b>	0,0084	<b>2b)</b>	0,0679
<b>Curva 3</b>	9,14°	<b>3a)</b>	0,0046	<b>3b)</b>	0,0530
<b>Curva 4</b>	5,23°	<b>4a)</b>	0,0028	<b>4b)</b>	0,0420

#### 4.1.2 Curvas Espectrais das Amostras de Argamassa

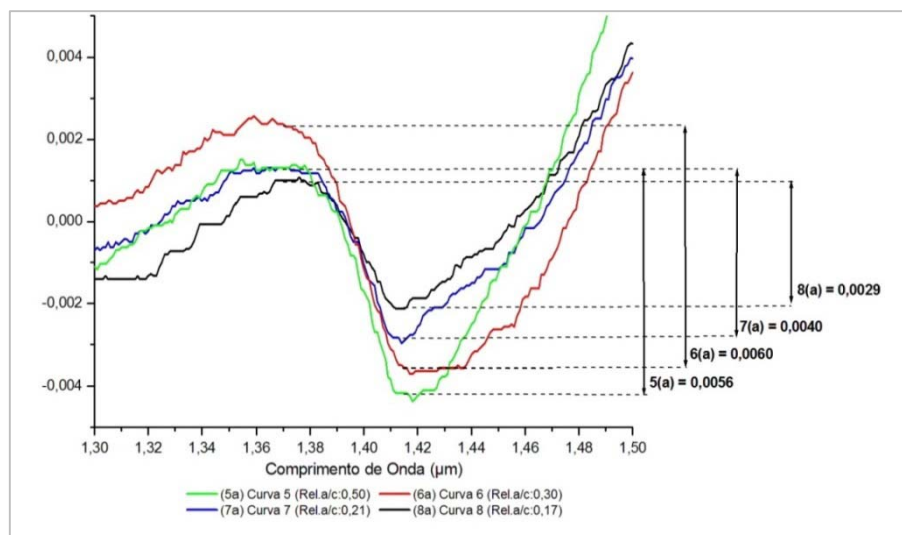
A análise exploratória dos espectros foi realizada por meio de um diagrama de Fator de reflectância espectral com as quatro amostras de argamassa: (5) Relação a/c 0,50; (6) Relação a/c 0,30; (7) Relação a/c 0,21 e (8) Relação a/c 0,17 (Figura 14).

Assim como as assinaturas espectrais da pasta, as curvas de argamassa apresentam um comportamento similar, com diferenças em termos de contraste, intensidade de Fator de reflectância, profundidade de feições de absorção e inclinação. Observam-se curvas com contraste espectral melhor discriminado, não ocorrendo sobreposição de pontos (Tabela 14). Estão dispostas em ordem crescente de Fator de reflectância à medida que a resistência mecânica diminui. A curva que apresenta maior Fator de reflectância em todo o intervalo espectral (0,35-2,5  $\mu\text{m}$ ) é correspondente à amostra de argamassa com menor resistência (Relação a/c 0,50). Em todas as assinaturas observam-se duas feições de absorção com picos mais acentuados, próximos a  $\lambda=1,4\mu\text{m}$  e  $\lambda=1,9\mu\text{m}$ .

A Tabela 15 mostra a inclinação de cada curva na região do visível, entre 0,35-0,60  $\mu\text{m}$ , e a profundidade das feições de absorção de  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$ . Estas duas feições encontram-se na região do infravermelho próximo (1,4  $\mu\text{m}$  e 1,9  $\mu\text{m}$ ) e diminuem em profundidade à medida que a resistência mecânica aumenta entre as curvas. As Figura 15 e Figura 16 mostram os intervalo da feição de absorção  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  (entre 1,3-1,5 $\mu\text{m}$ ) e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$  (entre 1,8-2,2 $\mu\text{m}$ ), respectivamente. Os valores foram padronizados pelo mesmo objetivo mencionado na amostra de pasta. Na amostra de argamassa, visualiza-se que as feições  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$ , com o auxílio da Tabela 15, não apresentam a amplitude total de cada uma das duas feições proporcional com o aumento da relação a/c, devido à relação a/c 0,30 apresentar valores maiores que a relação a/c 0,50.

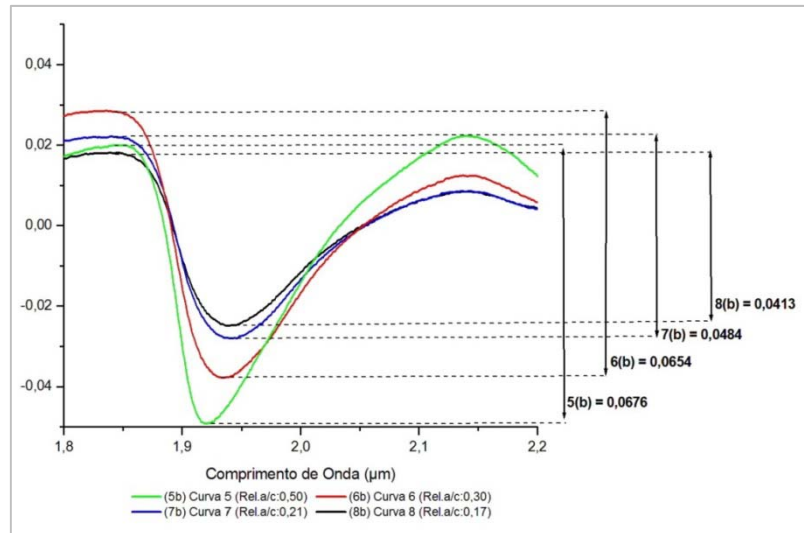


**Figura 14:** Comportamento Espectral das 4 amostras de resistência da argamassa.



**Figura 15:** Variação da feição de absorção próxima a  $\lambda=1,4 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero.





**Figura 16:** Variação da feição de absorção próxima a  $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ . Valores de Fator de reflectância centrados em zero.

**Tabela 14:** Valores do Fator de reflectância da argamassa.

Contraste entre as amostras de ARGAMASSA			
	FR (Ra/c 0,50) – FR (Ra/c 0,30)	FR (Ra/c 0,30) – FR (Ra/c 0,21)	FR (Ra/c 0,21) – FR (Ra/c 0,17)
<b>0,35<math>\mu\text{m}</math></b>	0,04387	0,03560	0,01373
<b>0,60<math>\mu\text{m}</math></b>	0,08453	0,06394	0,01700
<b>1,372<math>\mu\text{m}</math></b>	0,10860	0,07100	0,01700
<b>1,417<math>\mu\text{m}</math></b>	0,10906	0,06907	0,01587
<b>1,834<math>\mu\text{m}</math></b>	0,12294	0,07233	0,01673
<b>1,928<math>\mu\text{m}</math></b>	0,12073	0,05534	0,00960
<b>2,50<math>\mu\text{m}</math></b>	0,11967	0,05353	0,00620

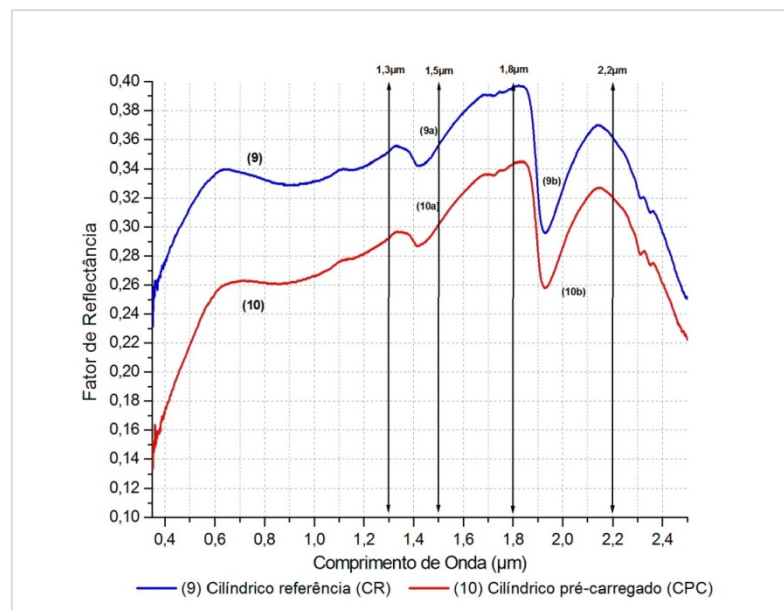
**Tabela 15:** Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.

	Inclinação ( $\alpha$ ) entre 0,35-0,6 $\mu\text{m}$	$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1.4\mu\text{m}} =$ $\text{FR}_{1,372\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,417\mu\text{m}}$		$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1.9\mu\text{m}} =$ $\text{FR}_{1,834\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,928\mu\text{m}}$	
<b>Curva 5</b>	19,6°	<b>5a)</b>	0,0056	<b>5b)</b>	0,0676
<b>Curva 6</b>	10,93°	<b>6a)</b>	0,0060	<b>6b)</b>	0,0654
<b>Curva 7</b>	4,56°	<b>7a)</b>	0,0040	<b>7b)</b>	0,0484
<b>Curva 8</b>	3,81°	<b>8a)</b>	0,0029	<b>8b)</b>	0,0413

### 4.1.3 Curvas Espectrais das Amostras de Concreto

A análise exploratória dos espectros foi realizada por meio de quatro diagramas de reflectância espectral: (I) curvas 9 e 10 (CR e CPC), (II) curvas 11 e 12 (PR e PPC), (III) curvas 9, 10, 11 e 12 e (IV) curvas 9 e 11 (CR e PR). Os eixos dos quatro gráficos [y: Fator de reflectância ( $\rho$ ) e x: Comprimento de Onda ( $\lambda$ )] contêm os mesmos espaçamentos, possibilitando a observação do comportamento de todas as amostras, na mesma escala.

A Figura 17 apresenta a assinatura espectral das amostras dos corpos-de-prova cilíndricos, curvas 9 e 10. Observa-se que não ocorreu justaposição espectral e que as duas curvas apresentaram um contraste espectral bem discriminado. Porém, ao longo de todo o intervalo espectral analisado, este contraste não é homogêneo e pode ser observado, através da diferença do Fator de reflectância entre 9 e 10, em dois comprimentos de onda principais:  $\Delta(\rho_{CR} - \rho_{CPC})_{(\lambda=1,4)} = 0,0556$  e  $\Delta(\rho_{CR} - \rho_{CPC})_{(\lambda=1,9)} = 0,041$ . A curva que apresenta maior reflectância em todo o intervalo espectral (0,35-2,5  $\mu\text{m}$ ) é a correspondente aos concretos de referência. Nota-se que as duas curvas apresentam mesmo comportamento espectral, inclusive as mesmas feições de absorção. Observam-se as duas feições de absorção referentes à presença de água na amostra ( $\lambda=1,4 \mu\text{m}$  e  $\lambda=1,9 \mu\text{m}$ ). A Tabela 16 mostra a inclinação de cada curva na região do visível, entre 0,35-0,60  $\mu\text{m}$ , e a profundidade das feições de absorção de  $FR_{1,4\mu\text{m}}$  e  $FR_{1,9\mu\text{m}}$ .



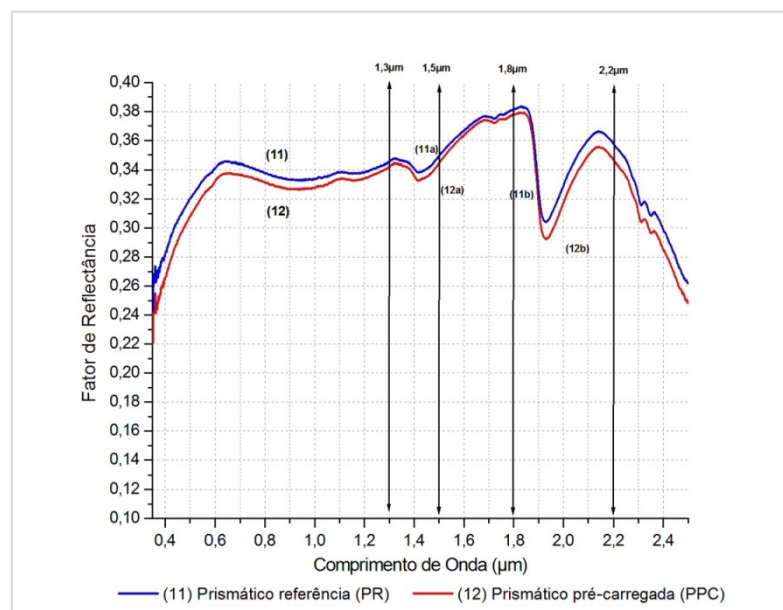
**Figura 17:** Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9 e 10.

$$\Delta(\rho_{CR} - \rho_{CPC})_{(\lambda=1,4)} = 0,0556 \text{ e } \Delta(\rho_{CR} - \rho_{CPC})_{(\lambda=1,9)} = 0,041.$$

**Tabela 16:** Variação da profundidade das feições de absorção e inclinação da curva.

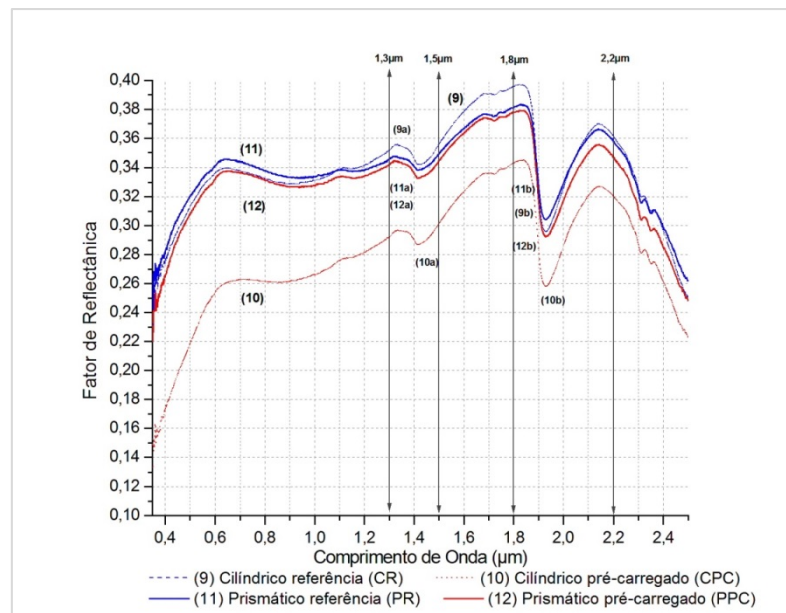
	Inclinação ( $\alpha$ ) entre 0,35-0,6 $\mu\text{m}$	$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1,4\mu\text{m}} =$ $\text{FR}_{1,372\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,417\mu\text{m}}$		$\Delta\text{FR}_{\text{Feição } 1,9\mu\text{m}} =$ $\text{FR}_{1,834\mu\text{m}} - \text{FR}_{1,928\mu\text{m}}$	
		9a)		9b)	
Curva 9	20,40°		0,0107		0,1007
Curva 10	16,70°	10a)	0,0087	10b)	0,0867
Curva 11	22,59°	11a)	0,0070	11b)	0,0789
Curva 12	17,74°	12a)	0,0093	12b)	0,0863

A Figura 18 apresenta o Fator de reflectância em função do comprimento de onda para as amostras dos corpos-de-prova prismáticos, curvas 11 e 12. A curva que apresenta maior reflectância em todo o intervalo espectral (0,35-2,5  $\mu\text{m}$ ) é a correspondente aos concretos de referência (PR). O gráfico mostra que não ocorreu sobreposição espectral e que as curvas não tiveram um espaçamento idêntico, porém com valores muito próximos. Nota-se que o contraste espectral entre os espectros 11 e 12,  $\Delta(\rho\text{PR} - \rho\text{PPC})_{(\lambda=1,4)} = 0,0046$  e  $\Delta(\rho\text{PR} - \rho\text{PPC})_{(\lambda=1,9)} = 0,0103$ , é menor que o contraste observado entre os 9 e 10 (CPC e CR). Este resultado é claramente identificado pela redução expressiva da intensidade de reflectância da assinatura espectral da curva 10 (Figura 17). A Tabela 16 mostra a inclinação de cada curva na região do visível, entre 0,35-0,60  $\mu\text{m}$ , e a profundidade das feições de absorção de  $\text{FR}_{1,4\mu\text{m}}$  e  $\text{FR}_{1,9\mu\text{m}}$ .

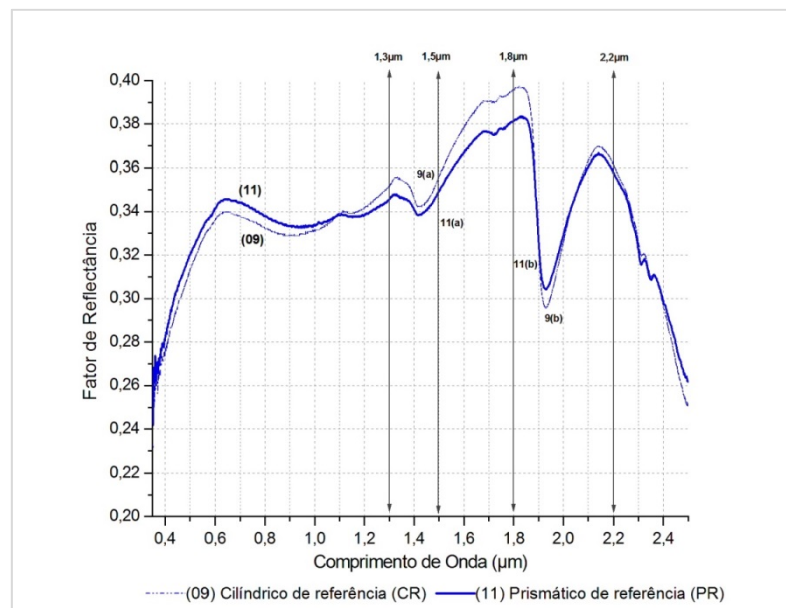
**Figura 18:** Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 11 e 12.

$$\Delta(\rho\text{PR} - \rho\text{PPC})_{(\lambda=1,4)} = 0,0046 \text{ e } \Delta(\rho\text{PR} - \rho\text{PPC})_{(\lambda=1,9)} = 0,0103.$$

A Figura 19 exibe as quatro curvas (9, 10, 11 e 12), com a discriminação individual não tão evidente, à exceção da curva 10, que apresenta um maior contraste espectral. Mesmo que a curva obtida para a amostra 12 esteja muito próxima das curvas das amostras 9 e 11, mantém-se ao longo de todo o espectro, com valores de reflectância um pouco menores, não se justapondo a nenhuma das curvas ao longo de todo o espectro. Observa-se uma sobreposição das curvas das duas amostras de referência (CR e PR) em quatro pontos ( $\lambda=1,1; 1,9; 2,1$  e  $2,36 \mu\text{m}$ ), conforme mostra a Figura 20.



**Figura 19:** Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9, 10, 11 e 12.



**Figura 20:** Fator de reflectância em função do comprimento de onda das curvas 9 e 11.

#### 4.1.4 Transformada de *wavelet* para as amostras de pasta e argamassa

##### 4.1.4.1 Análise das curvas espectrais resultante das amostras de pasta e argamassa no intervalo (iii)

Após o processamento das curvas, realizou-se uma análise exploratória dos dados mais detalhada. As assinaturas espectrais estudadas foram as curvas referente às amostras de pasta e de argamassa. As Figura 21 e Figura 22 mostram as curvas espectrais das duas amostras representadas pelos seus valores pontuais de Fator de reflectância com quatro diferentes percentuais de água na mistura, e por consequência, 4 resistências mecânicas: (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50; respectivamente.

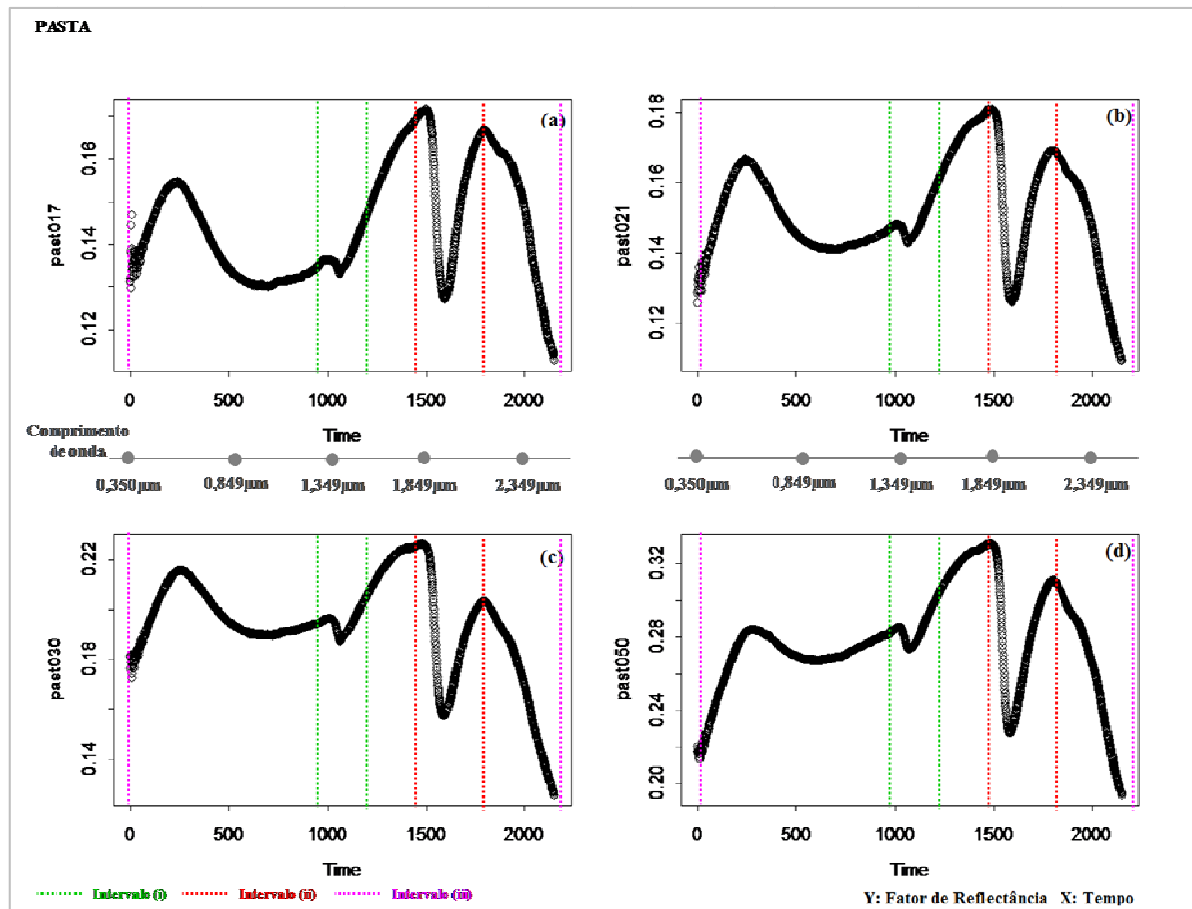
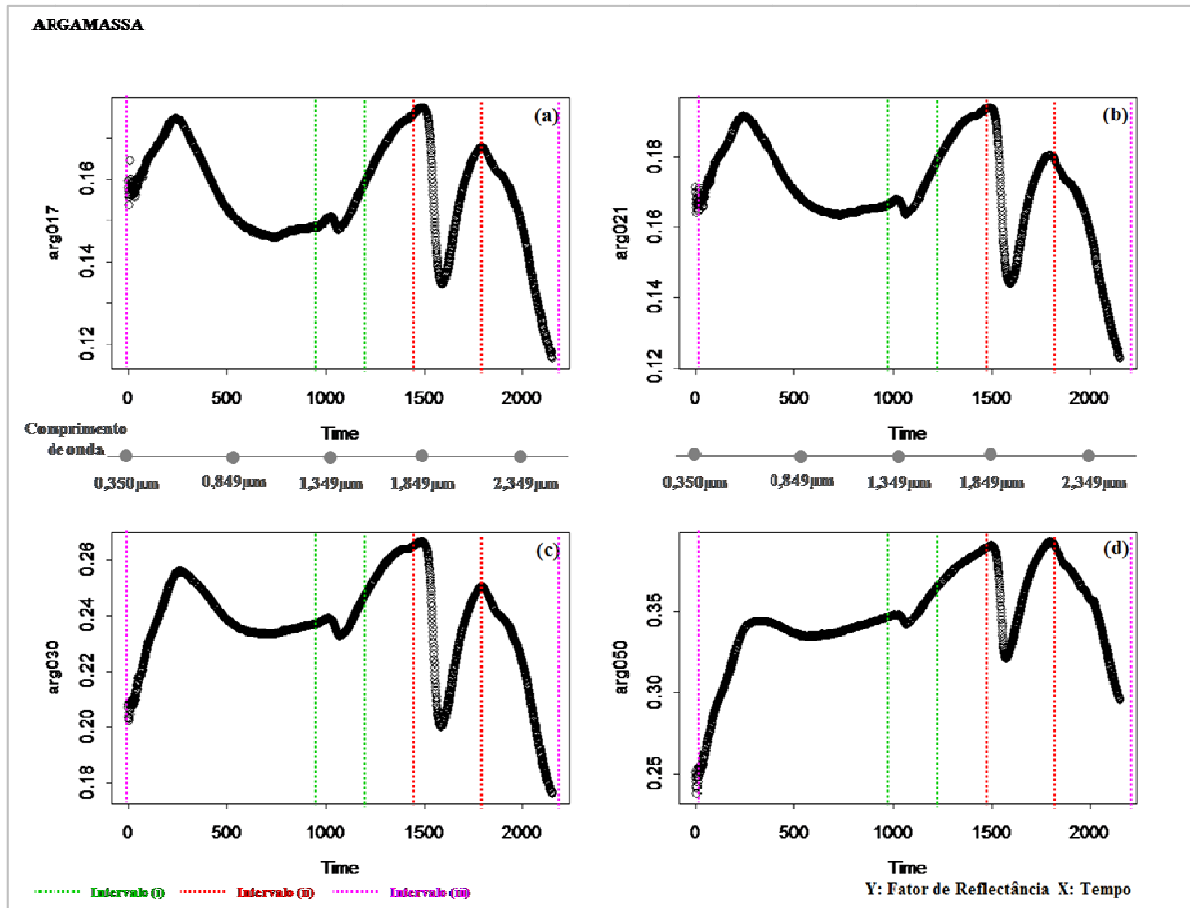
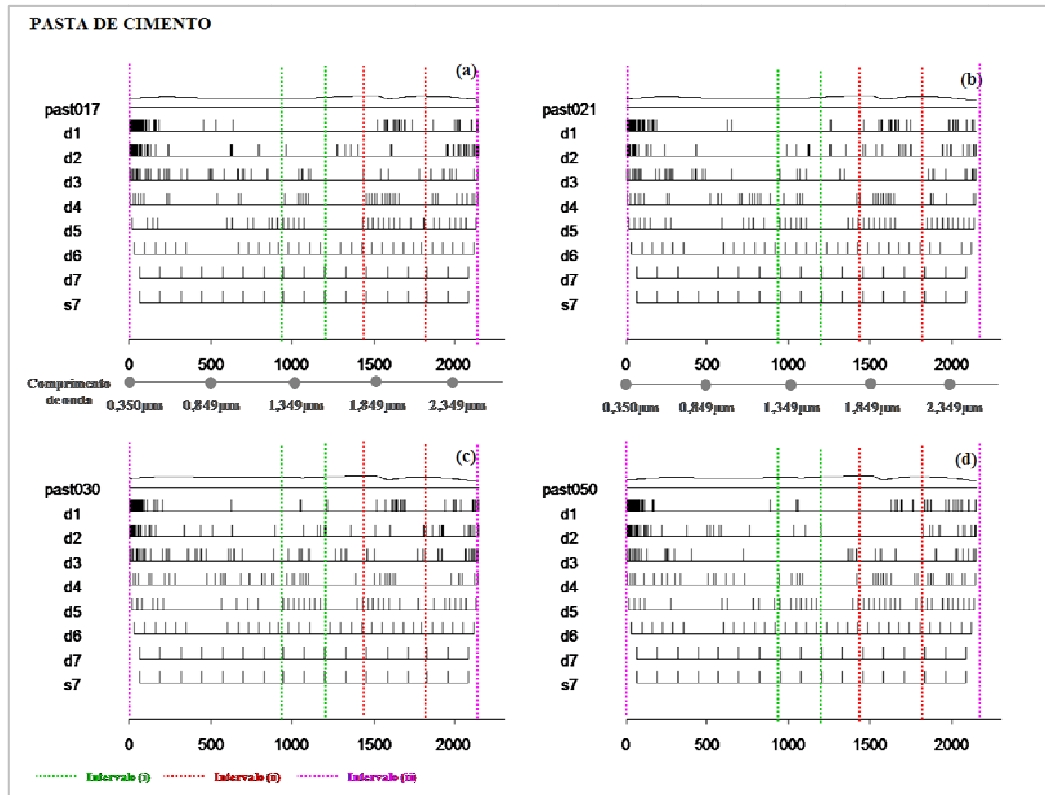


Figura 21: Gráfico das curvas de Fator de reflectância para as amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

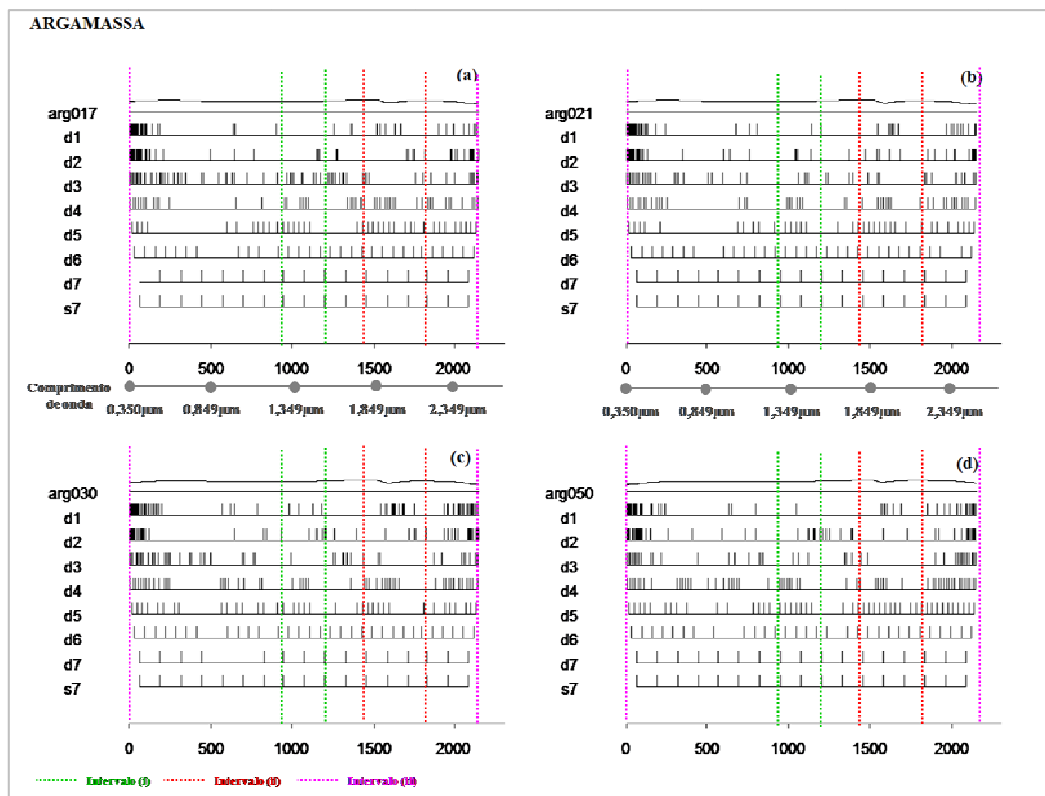


**Figura 22:** Gráfico das curvas de Fator de reflectância para as amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

Na análise para a decomposição do sinal, foram testadas diferentes funções optando-se ao final por aquela que apresentou a melhor decomposição, neste caso, aplicou-se a função *wavelet* bs2.8. O sinal foi decomposto em 7 cristais. Cada cristal foi apresentado preservando os coeficientes significativos considerando o critério 2X MAD, em módulo. As Figura 23 e Figura 24 mostram as curvas espectrais de cada material individualmente decomposto. Nota-se que todos os cristais apresentaram valores significativos. No entanto, análise será concentrada nos quatro últimos cristais **d5**, **d6**, **d7** e **s7**, onde as feições principais deste estudo se manifestam. Cada cristal será observado separadamente, através de uma representação gráfica expressa pelos coeficientes *wavelets*. A Tabela 17 até Tabela 30 mostram os dados estatísticos relevantes como, valores máximos e mínimos, mediana, média e amplitude encontrados em cada curva espectral para todos os níveis de decomposição investigado.



**Figura 23:** Decomposição das curvas de Fator de reflectância em sete níveis para as amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. Coeficientes maiores que  $2X$  MAD, em módulo.



**Figura 24:** Decomposição das curvas de Fator de reflectância em sete níveis para as amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50. Coeficientes maiores que  $2X$  MAD, em módulo.

As Figura 25 e Figura 26 são os diagramas do cristal s7 para as amostras de pasta e argamassa, respectivamente. Este nível apresenta uma janela com resolução mais baixa dentre os sete níveis apresentados, sendo incapaz de detectar informações mais sutis da curva espectral. No entanto, por não realizar uma análise mais acurada da curva, esta camada é adequada para demonstrar o contraste espectral entre as curvas das quatro relações a/c dos dois materiais, já que este nível reproduz a forma da curva. Os eixos dos gráficos referentes ao nível s estão representados, na análise de wavelet, pela intensidade do sinal de fator de reflectância, no eixo Y e pelo domínio do tempo, no eixo X, que representa o comprimento de onda ( $\lambda$ ).

A grande vantagem da aplicação deste método para analisar as curvas é que todos os coeficientes apresentados podem ser comparados entre todos os dados expostos, independente de qual amostra (pasta ou argamassa) ou resistência mecânica está sendo analisada. Por exemplo, na Tabela 17, visualizam-se os valores da mediana da relação a/c 0,50 (3.148) e da relação a/c 0,17 (1.621). Pode-se dizer que a mediana da relação a/c 0,50 é quase duas vezes maior que da relação a/c 0,17. Esta informação tem uma relação direta com a proporção do dado original de Fator de reflectância. Na Tabela 18 é possível analisar os mesmos dados referentes à amostra de argamassa.

Nota-se que cada resistência mecânica apresenta um valor de amplitude, referente à magnitude individual de cada curva espectral. Como os dados são comparáveis, observa-se que a amplitude total encontrada na relação a/c 0,50 é 2,7 vezes maior que a relação a/c 0,17, para amostras de pasta, com o crescimento proporcional nas relações a/c intermediárias. Os valores de máximo e mínimo aumentam à medida que a relação a/c (0,17  $\rightarrow$  0,50) aumenta, evidenciando que a curva de menor resistência, além de apresentar maior amplitude total, também se encontra muito mais acima das demais curvas. Com estes dados é possível comprovar o contraste espectral assinalado, pois está bem definido no nível s7. Assim como as diferenças no padrão e na forma de cada curva espectral.



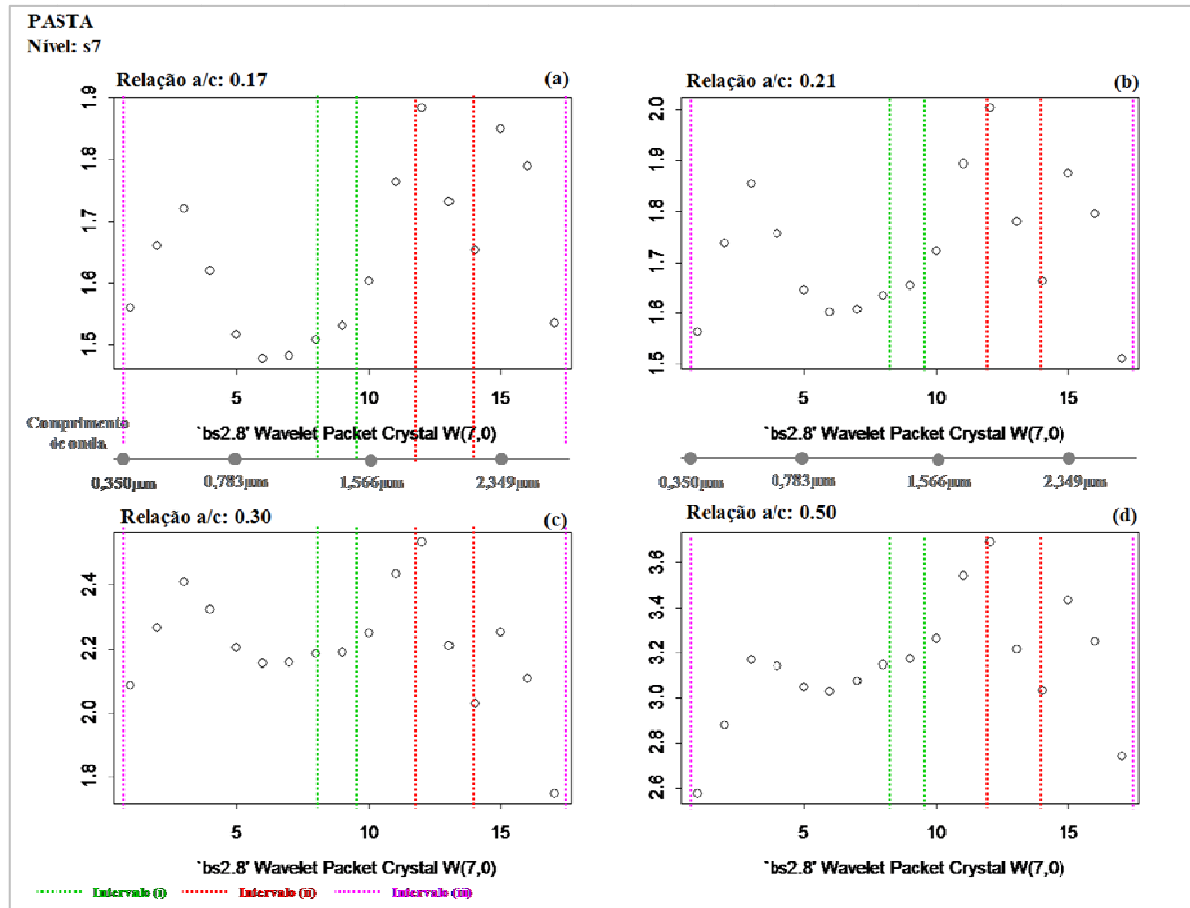
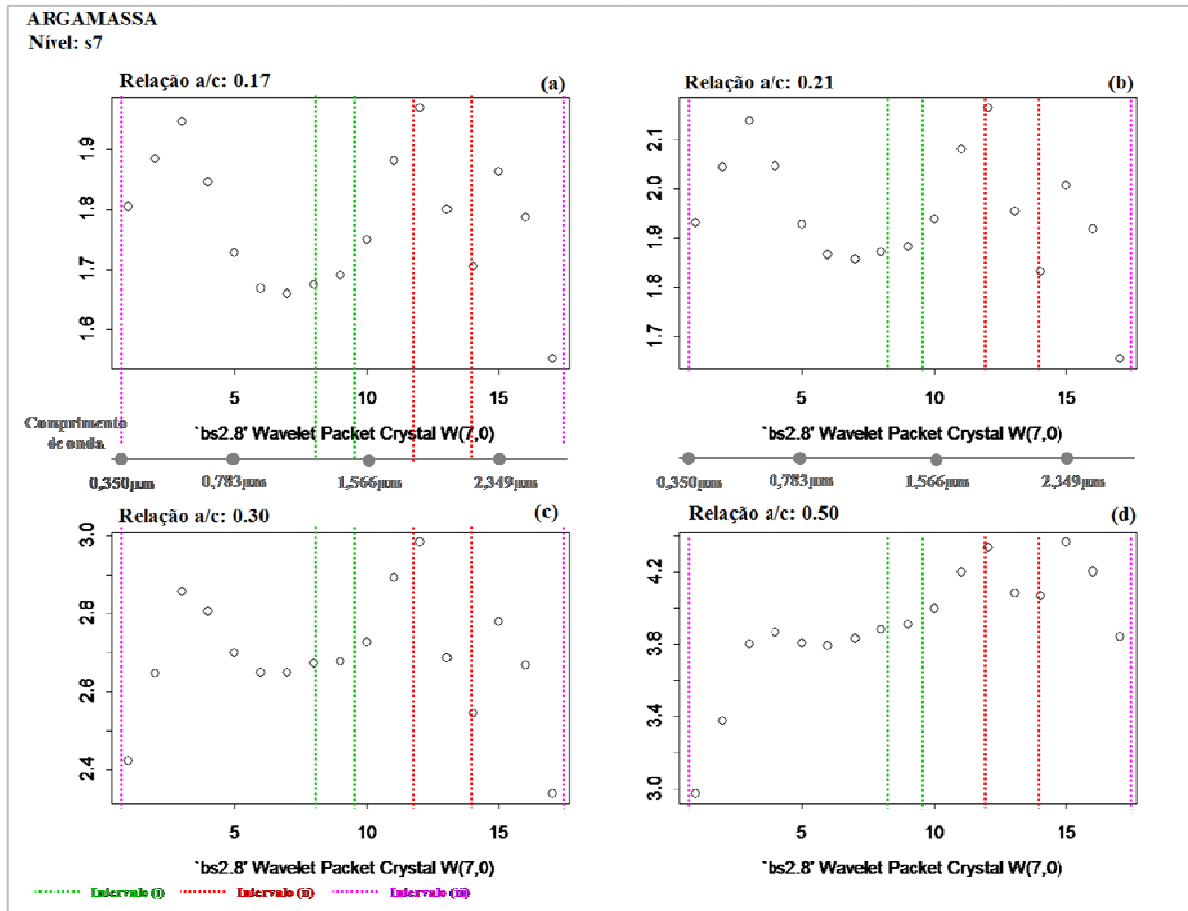


Figura 25: Gráficos das curvas de Fator de reflectância das amostras de pasta, nível s7, expresso em cristais. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

Tabela 17: Valores referentes às amostras de pasta da Figura 25.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	s7	1,477	1,621	1,641	1,885	0,154	0,408
PASTA - relação a/c 0,21	s7	1,510	1,722	1,723	2,004	0,128	0,494
PASTA - relação a/c 0,30	s7	1,747	2,204	2,208	2,533	0,089	0,786
PASTA - relação a/c 0,50	s7	2,575	3,148	3,141	3,691	0,170	1,116



**Figura 26:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância das amostras de argamassa, nível s7, expresso em cristais. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

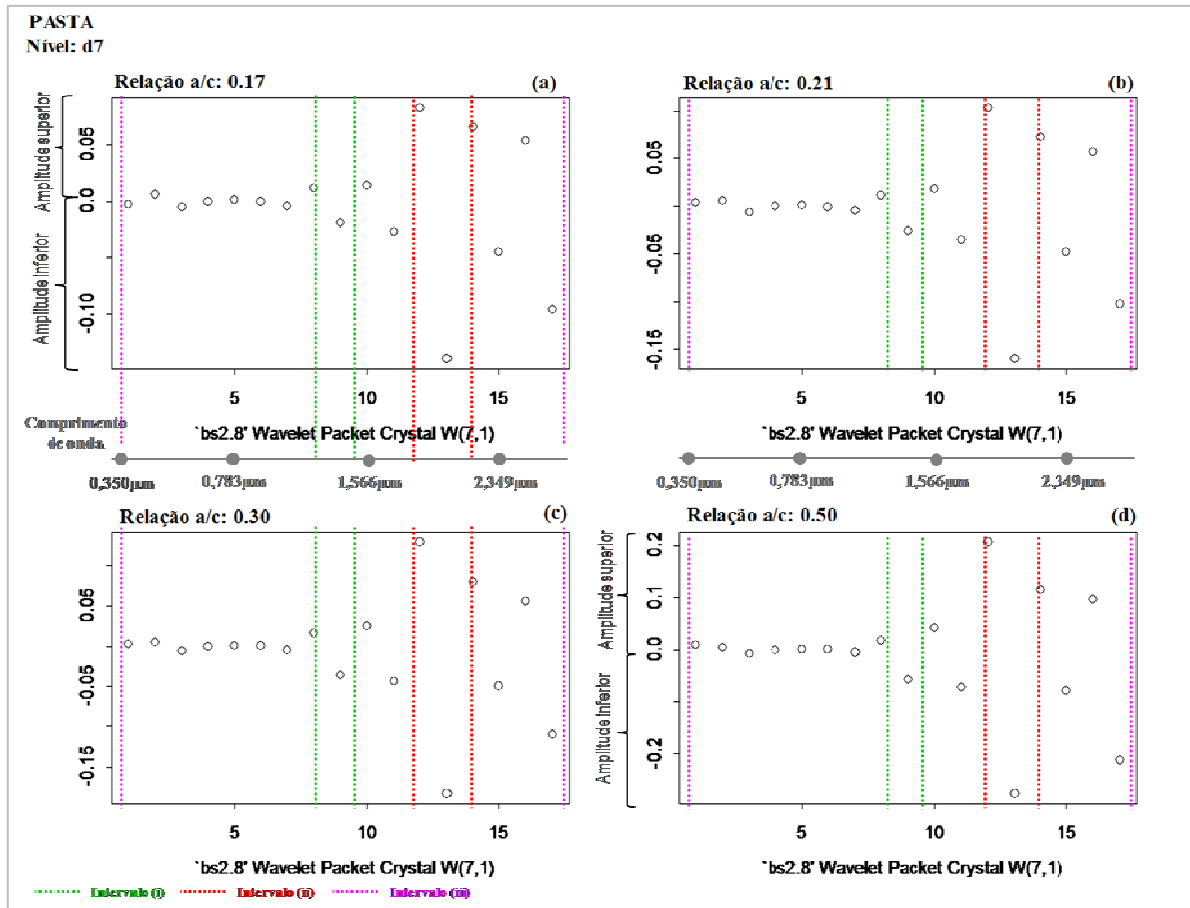
**Tabela 18:** Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 26.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	s7	1,551	1,786	1,777	1,970	0,141	0,419
ARGAMASSA - relação a/c 0,21	s7	1,654	1,931	1,948	2,165	0,110	0,511
ARGAMASSA - relação a/c 0,30	s7	2,338	2,677	2,688	2,982	0,074	0,644
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	s7	2,974	3,881	3,900	4,362	0,174	1,388

As Figura 27 até Figura 32 estão representadas por valores significativos centrados em zero e o grau de resolução dos cristais aumenta do d7 para o d5. Os gráficos dos coeficientes irão apresentar o resultado da aplicação da função *wavelet* escolhida com o grau de resolução da janela de cada nível. Cada nível de decomposição terá duas figuras consecutivas, a primeira irá descrever o comportamento da pasta e segunda o da argamassa, com as suas respectivas resistências.

No nível **d7**, representado pelas Figura 27 e Figura 28, é possível afirmar que todas as curvas são similares. Visto que apresentam um padrão de comportamento muito semelhante entre as relações a/c das duas amostras, constatado através dos valores muito próximos das medianas (Tabela 19 e Tabela 21). O que difere a atuação entre as curvas espectrais é a variação dos valores de amplitude, que estão localizados justamente nos dois intervalos correspondentes às feições de absorção da água, próximos de 1,4 e 1,9 $\mu$ m (próximas a  $X_1=9$  e  $X_2=13$ , respectivamente). O efeito da água sobre cada relação a/c será mostrado mais adiante, por meio da análise de dois intervalos menores, (i) e (ii), cada um concentrado em cada feição de absorção da água (Figura 33 até Figura 40).

As Tabela 20 e Tabela 22 apresentam os valores de amplitude inferior, superior e total para as relações a/c 0,17 e 0,50 das amostras de pasta e argamassa, respectivamente. Através destes gráficos, é possível constatar que, em cada relação a/c, o valor da amplitude inferior é maior que o da superior, em módulo. Entretanto, ao verificar a razão da intensidade destas amplitudes entre as duas relações a/c, detectou-se que a amplitude superior foi a que mais cresceu da relação 0,17 para a 0,50. Logo, os coeficientes deste cristal (nível) indicaram que, nas amostras de pasta, a variação de Fator de reflectância, no intervalo (ii) aumentou 2,5 vezes para cima enquanto que 2,0 vezes para baixo. Para a amostra de argamassa, as amplitudes superior e inferior cresceram 1,88 vezes e 1,61 vezes, respectivamente.



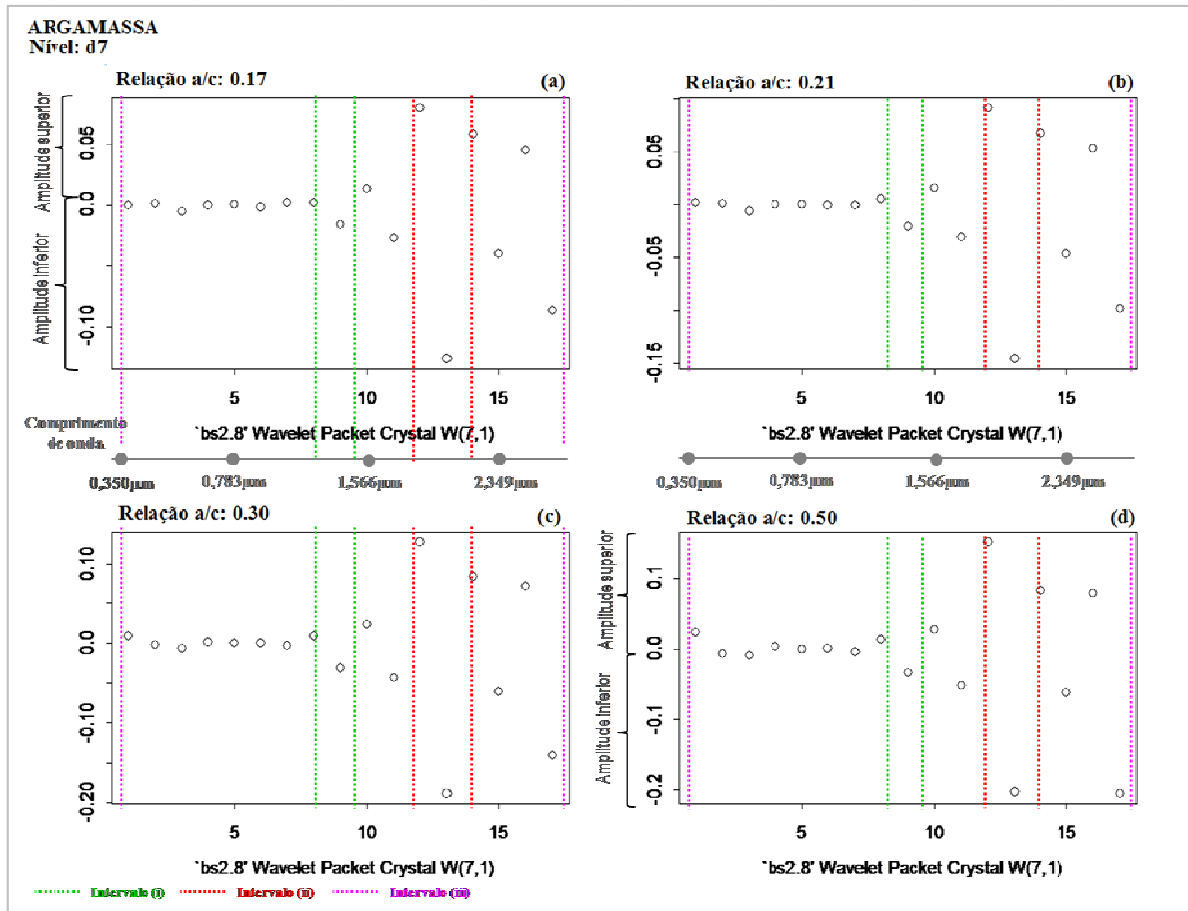
**Figura 27:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d7**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

**Tabela 19:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 27.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	d7	-0,140	-0,001	-0,006	0,083	0,021	0,223
PASTA - relação a/c 0,21	d7	-0,160	0,000	-0,006	0,103	0,027	0,263
PASTA - relação a/c 0,30	d7	-0,183	0,000	-0,007	0,129	0,036	0,312
PASTA - relação a/c 0,50	d7	-0,276	0,001	-0,013	0,206	0,061	0,482

**Tabela 20:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 27.

Amostra PASTA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d7	d7	
Amplitude Inferior	-0,140	-0,276	1,97
Amplitude Superior	0,083	0,206	2,48
Amplitude Total (módulo)	0,223	0,482	



**Figura 28:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível d7, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

**Tabela 21:** Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 28.

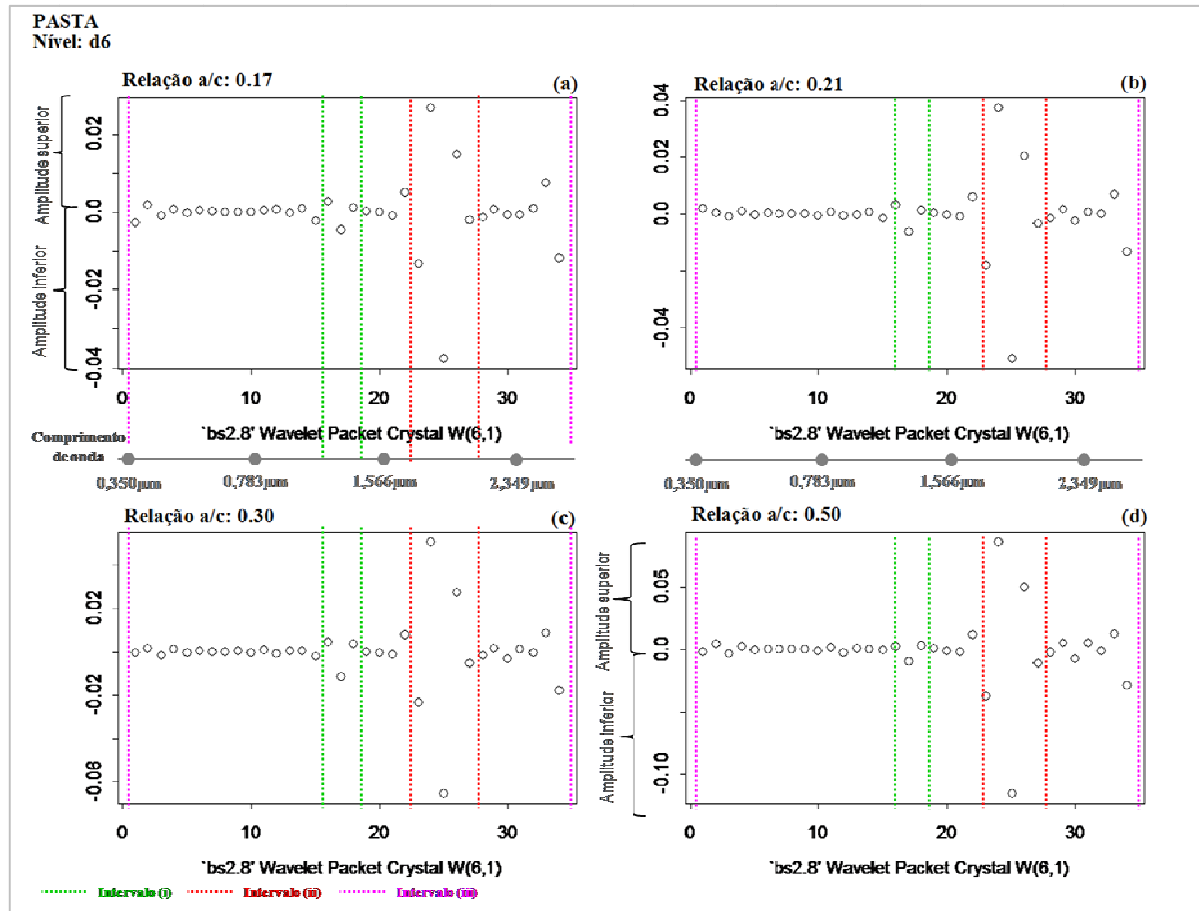
Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	d7	-0,127	0,000	-0,006	0,080	0,019	0,207
ARGAMASSA - relação a/c 0,21	d7	-0,146	0,000	-0,007	0,092	0,023	0,238
ARGAMASSA - relação a/c 0,30	d7	-0,189	0,000	-0,009	0,127	0,034	0,316
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	d7	-0,205	-0,001	-0,012	0,151	0,041	0,356

**Tabela 22:** Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 28.

Amostra ARGAMASSA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d7	d7	
Amplitude Inferior	-0,127	-0,205	1,61
Amplitude Superior	0,080	0,151	1,88
Amplitude Total (módulo)	0,207	0,356	

Nas Figura 29 e Figura 30, que representam o nível **d6**, é possível visualizar que todas as relações a/c da amostra de pasta são similares entre si, assim como as relações a/c da argamassa. No entanto, neste nível foi constatado um comportamento diferente entre amostras, considerando o nível d6 determinante para validar a distinção das amostras. Esta constatação será mostrada mais adiante por meio da análise de *wavelet* das réplicas das relações a/c 0,17 e 0,50 da amostra de pasta (Figura 41 à Figura 45). Para este nível o intervalo (i) não é detectado, no entanto o intervalo (ii), referente à feição  $\lambda=1,9 \mu\text{m}$  aparece, sendo responsável pela variação da amplitude em cada curva.

As Tabela 23 e Tabela 25 mostram os valores referentes ao nível **d6** para as quatro resistências mecânicas. A Tabela 24 e Tabela 26 apresentam os valores de amplitude inferior, superior e total para as relações a/c 0,17 e 0,50 das amostras de pasta e argamassa, respectivamente. Através destes dados visualiza-se que, em cada relação a/c, o valor da amplitude inferior é maior que o da superior, em módulo. Entretanto, ao verificar a razão da intensidade destas amplitudes entre as duas relações a/c, detectou-se, para a pasta, que tanto a superior quanto a inferior tiveram um crescimento parecido, sendo 3,18 vezes e 3,05 respectivamente. Na amostra de argamassa, a razão da intensidade da amplitude inferior entre as duas relações a/c, foi a que mais aumentou (2,60 vezes) em comparação com a superior (2,35 vezes).



**Figura 29:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d6**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

**Tabela 23:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 29.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	d6	-0,038	0,000	-0,001	0,027	0,001	0,065
PASTA - relação a/c 0,21	d6	-0,051	0,000	-0,001	0,037	0,001	0,088
PASTA - relação a/c 0,30	d6	-0,065	0,000	-0,001	0,051	0,002	0,116
PASTA - relação a/c 0,50	d6	-0,116	0,000	-0,001	0,086	0,004	0,202

**Tabela 24:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 29.

Amostra PASTA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d6	d6	-
Amplitude Inferior	-0,038	-0,116	3,05
Amplitude Superior	0,027	0,086	3,18
Amplitude Total (módulo)	0,065	0,202	-

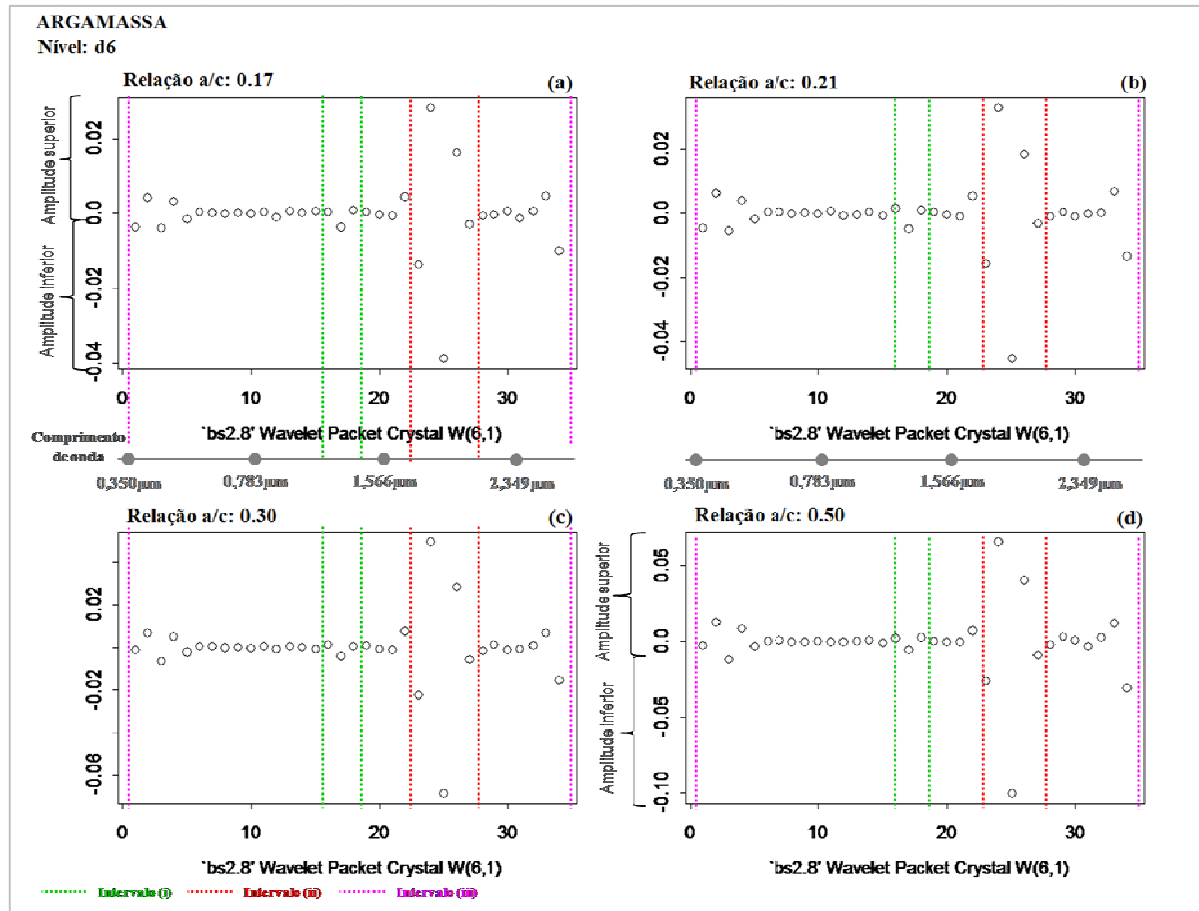


Figura 30: Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível d6, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

Tabela 25: Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 30.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	d6	-0,039	0,000	-0,001	0,028	0,001	0,067
ARGAMASSA - relação a/c 0,21	d6	-0,045	0,000	-0,001	0,033	0,001	0,078
ARGAMASSA - relação a/c 0,30	d6	-0,069	0,000	-0,001	0,050	0,002	0,119
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	d6	-0,101	0,000	-0,001	0,066	0,004	0,167

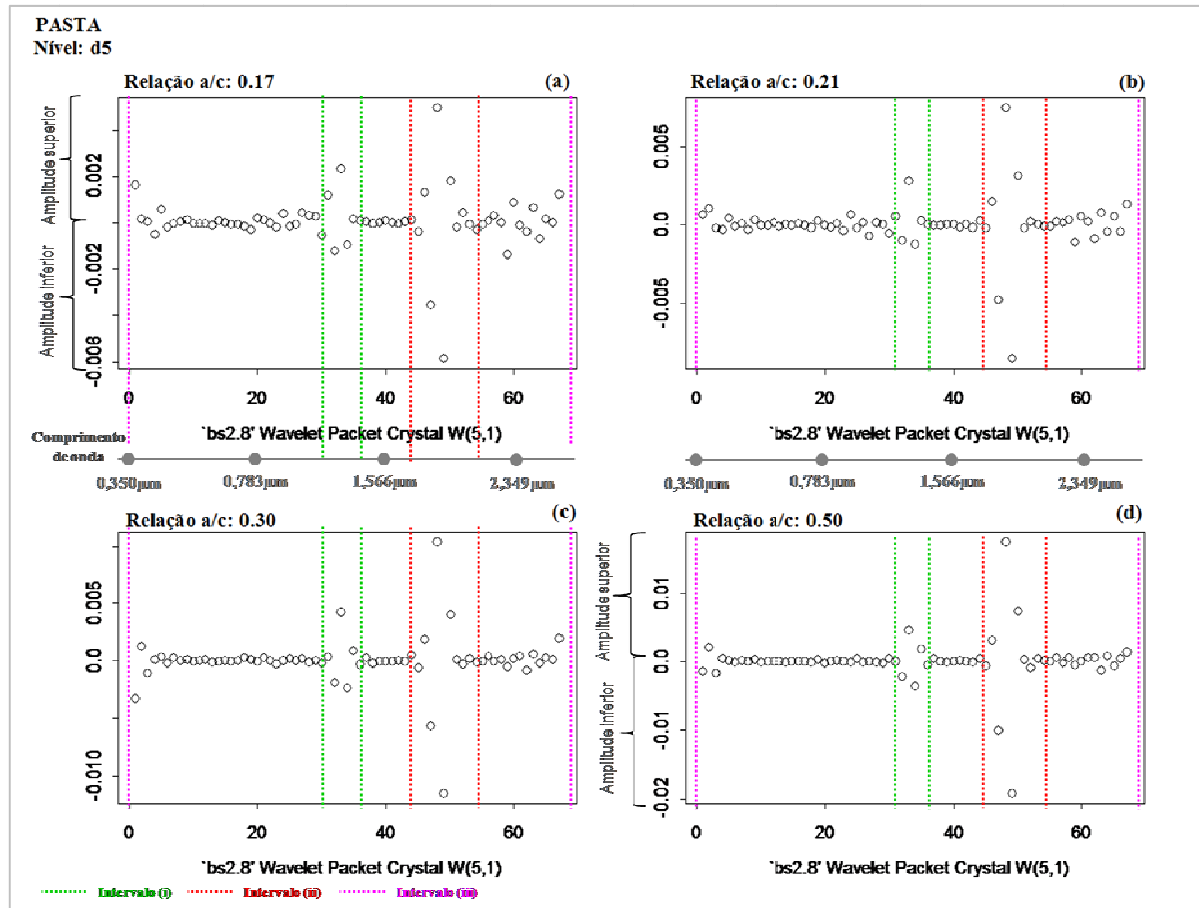
Tabela 26: Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 30.

Amostra ARGAMASSA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d6	d6	-
Amplitude Inferior	-0,039	-0,101	2,60
Amplitude Superior	0,028	0,066	2,36
Amplitude Total (módulo)	0,067	0,202	-



Por último, no nível **d5** as curvas não possuem um padrão semelhante em todo o espectro, tanto entre as relações a/c da mesma amostra quanto entre amostras, como foi visualizado nos outros níveis de decomposição. Entretanto, é o nível que melhor identifica e diferencia as amplitudes dos intervalos (i) e (ii), que representam as duas feições de absorção, localizados próximos a  $X_1=33$  e  $X_2=50$  (Figura 31 e Figura 32).

As Tabela 27 e Tabela 29 mostram os valores referentes ao nível **d5** para as quatro resistências mecânicas. As Tabela 28 e Tabela 30 apresentam os valores de amplitude inferior, superior e total para as relações a/c 0,17 e 0,50 das amostras de pasta e argamassa, respectivamente. Conforme foi mencionado nos outros níveis, para a região do espectro referente ao intervalo (ii), o d5 também apresenta, para cada relação a/c, o valor da amplitude inferior maior que o superior, em módulo. Entretanto, ao verificar a razão da intensidade destas amplitudes entre as duas relações a/c, detectou-se que a amplitude superior foi a que mais cresceu, 3,4 vezes, na amostra de pasta. Na amostra de argamassa, foi a amplitude inferior que mais aumentou, 3,0 vezes.



**Figura 31:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível **d5**, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

**Tabela 27:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 31.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	d5	-0,006	0,000	0,000	0,005	0,000	0,011
PASTA - relação a/c 0,21	d5	-0,009	0,000	0,000	0,008	0,000	0,017
PASTA - relação a/c 0,30	d5	-0,012	0,000	0,000	0,010	0,000	0,022
PASTA - relação a/c 0,50	d5	-0,019	0,000	0,000	0,017	0,000	0,036

**Tabela 28:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 31.

Amostra PASTA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d5	d5	-
Amplitude Inferior	-0,006	-0,019	3,16
Amplitude Superior	0,005	0,017	3,4
Amplitude Total (módulo)	0,011	0,202	-

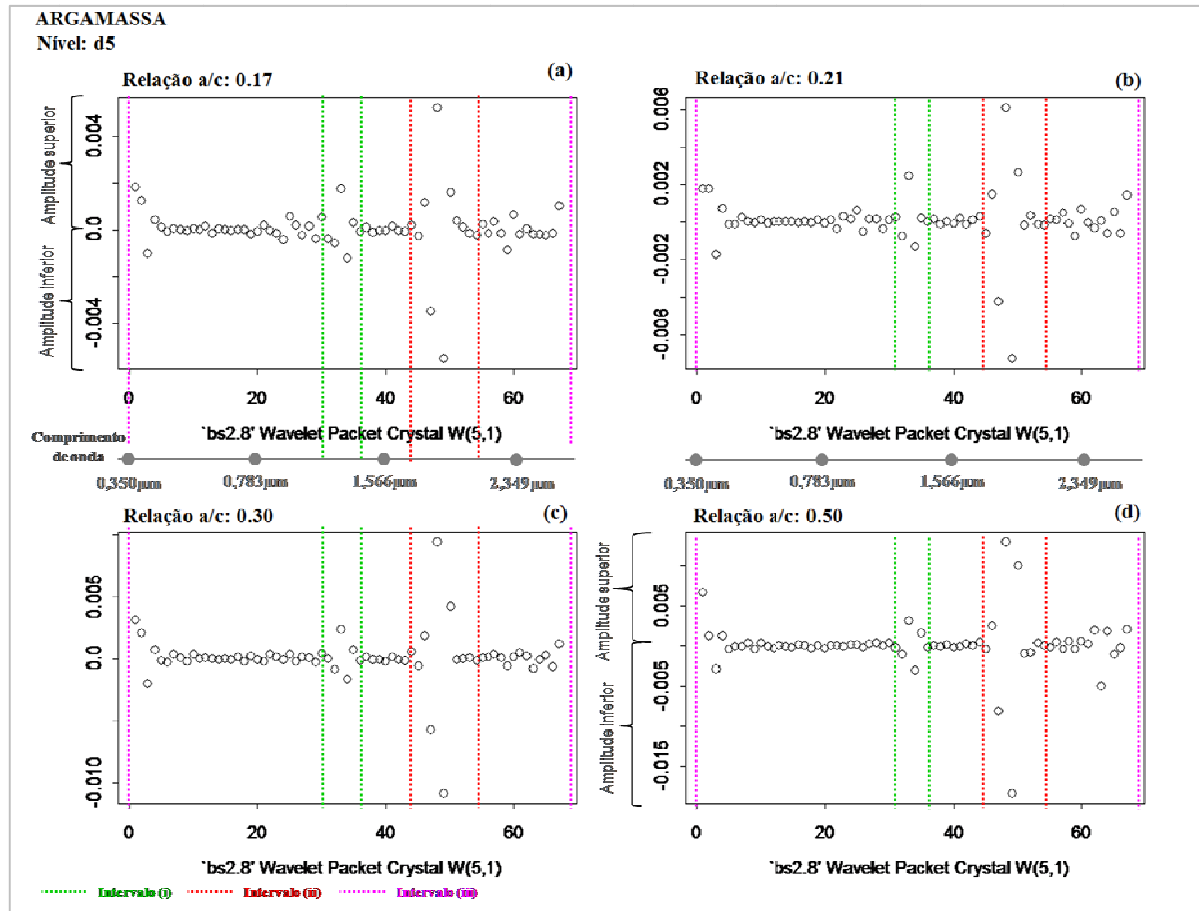


Figura 32: Gráficos das curvas de Fator de reflectância no nível d5, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,21; (c) relação a/c 0,30 e (d) relação a/c 0,50.

Tabela 29: Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 32.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	d5	-0,006	0,000	0,000	0,005	0,000	0,011
ARGAMASSA - relação a/c 0,21	d5	-0,007	0,000	0,000	0,006	0,000	0,013
ARGAMASSA - relação a/c 0,30	d5	-0,011	0,000	0,000	0,009	0,000	0,020
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	d5	-0,018	0,000	0,000	0,013	0,000	0,031

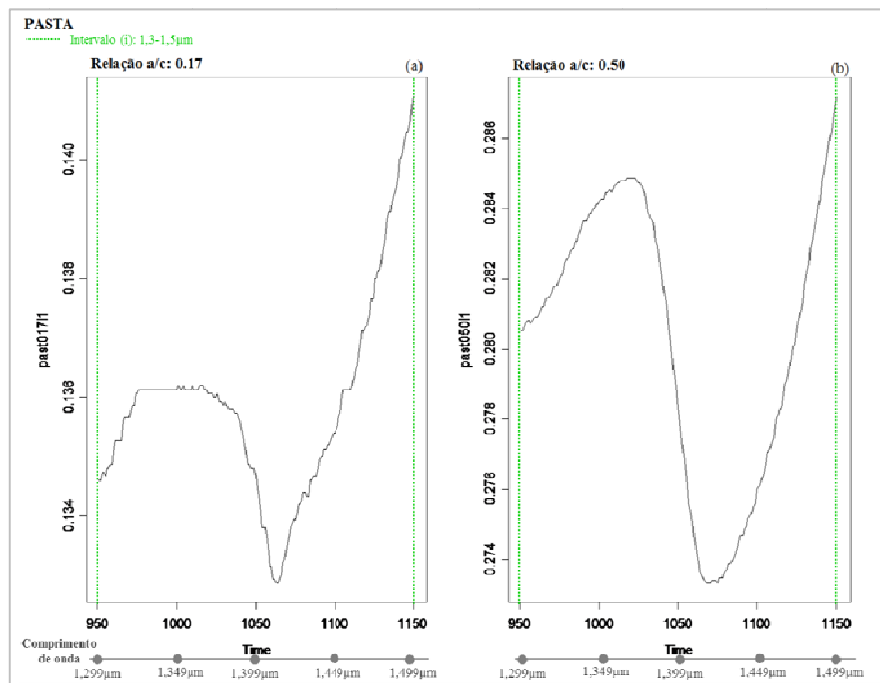
Tabela 30: Valores referentes às amostras de argamassa da Figura 32.

Amostra ARGAMASSA	relação a/c 0,17	relação a/c 0,50	Razão entre (rel. a/c 0,50) e (rel. a/c 0,17)
Nível	d5	d5	-
Amplitude Inferior	-0,006	-0,018	3,0
Amplitude Superior	0,005	0,013	2,6
Amplitude Total (módulo)	0,011	0,202	-

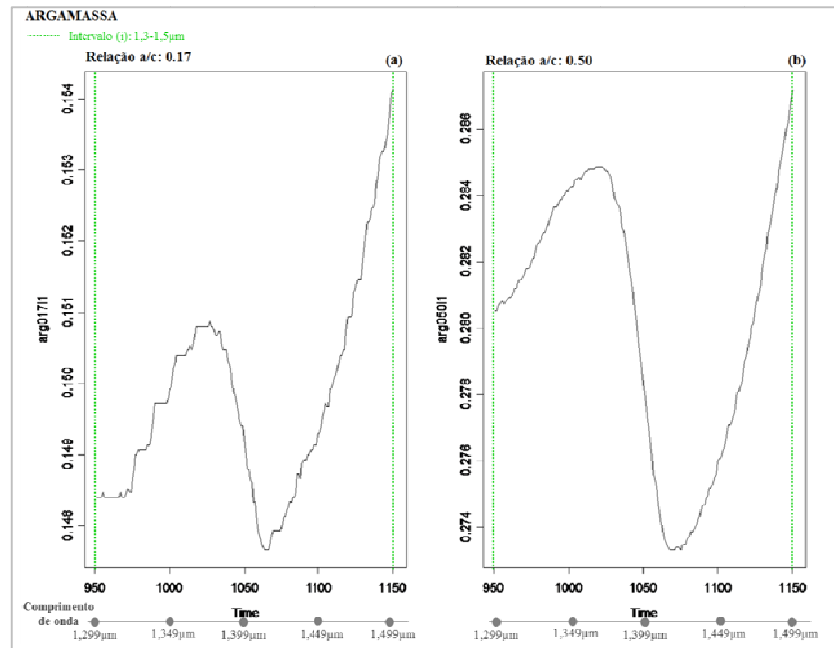
#### 4.1.4.2 Análise das curvas espectrais resultante das amostras de pasta e argamassa nos intervalos (i) e (ii)

Com o objetivo de avaliar o efeito da água sobre as curvas espectrais, realizaram-se análises em dois intervalos: (i) (1,3-1,5  $\mu\text{m}$ ) e (ii) (1,8-2,2  $\mu\text{m}$ ). Estas duas regiões concentram informações referentes a cada feição de absorção da água em torno de 1,4  $\mu\text{m}$  e 1,9  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Este estudo será feito somente para duas relações a/c 0,17 e 0,50, visto que se deseja avaliar o comportamento das curvas limites das amostras. Para isto, aplicou-se a análise *wavelet* nestes dois intervalos, pois assim será possível comparar os valores encontrados.

A Figura 33 e Figura 34 mostram a feição  $\lambda=1,4$ , com valores originais, descrita pelo intervalo (i) (1,3-1,5  $\mu\text{m}$ ), para as assinaturas espectrais da relação a/c 0,17 e da relação a/c 0,50 da amostra de pasta e de argamassa.

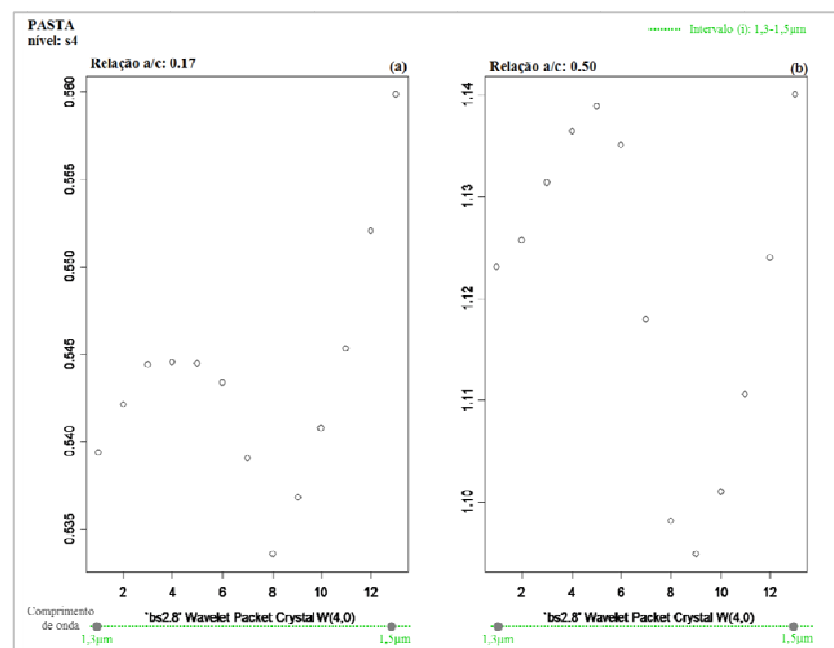


**Figura 33:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu\text{m}$ ), amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.



**Figura 34:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.

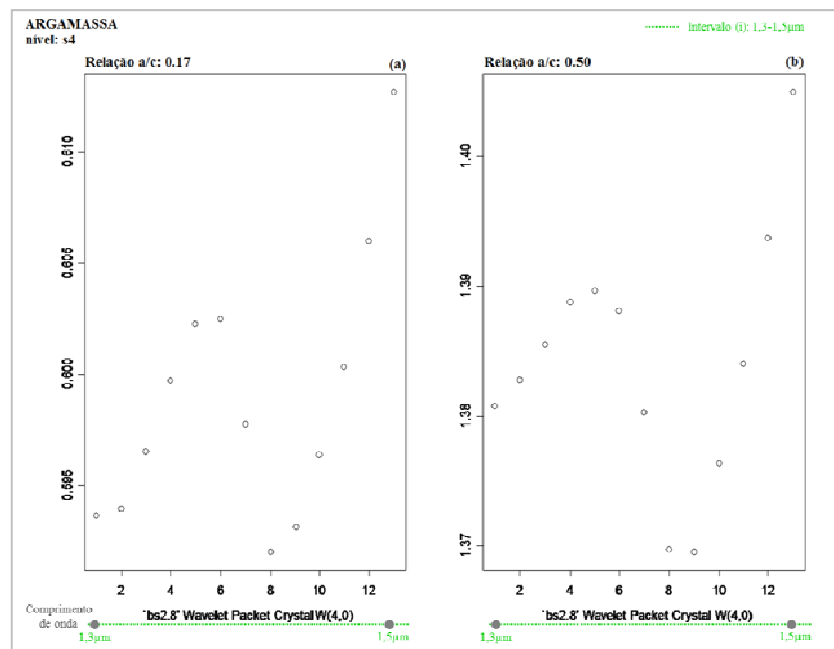
O intervalo (i) das duas amostras foi decomposto em 4 níveis, que esta representado pelo nível s4, nas Figura 35 e Figura 36. Este nível de resolução foi o que melhor demonstrou a diferença da intensidade da feição entre as duas relações a/c. Nas Tabela 31 e Tabela 32, observam-se os valores de amplitude para cada amostra, mostrando uma razão quase duas vezes maior entre as relações a/c 0,50 e a 0,17.



**Figura 35:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), no nível s4, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.

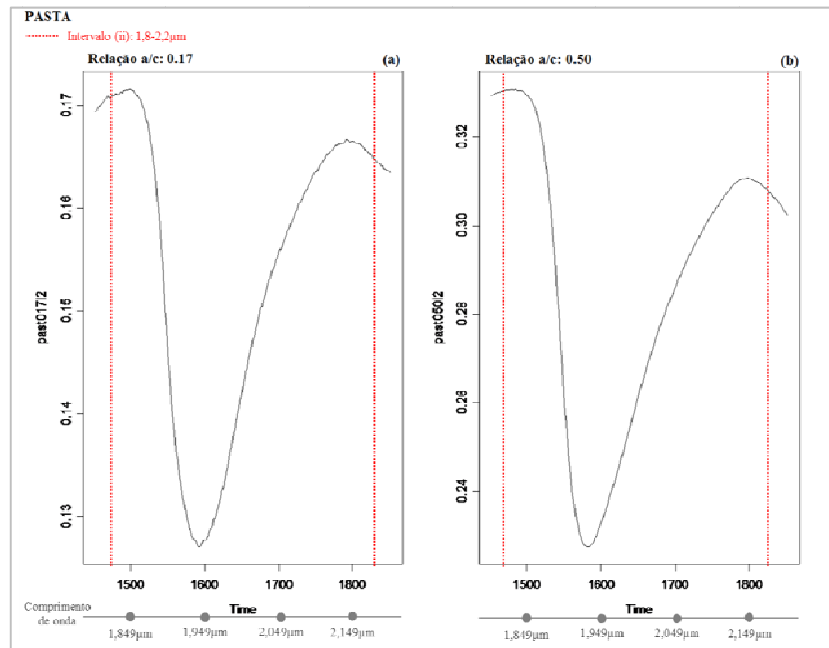
**Tabela 31:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 35.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	s4	0,534	0,543	0,544	0,560	0,004	0,026
PASTA - relação a/c 0,50	s4	1,095	1,124	1,121	1,140	0,018	0,045

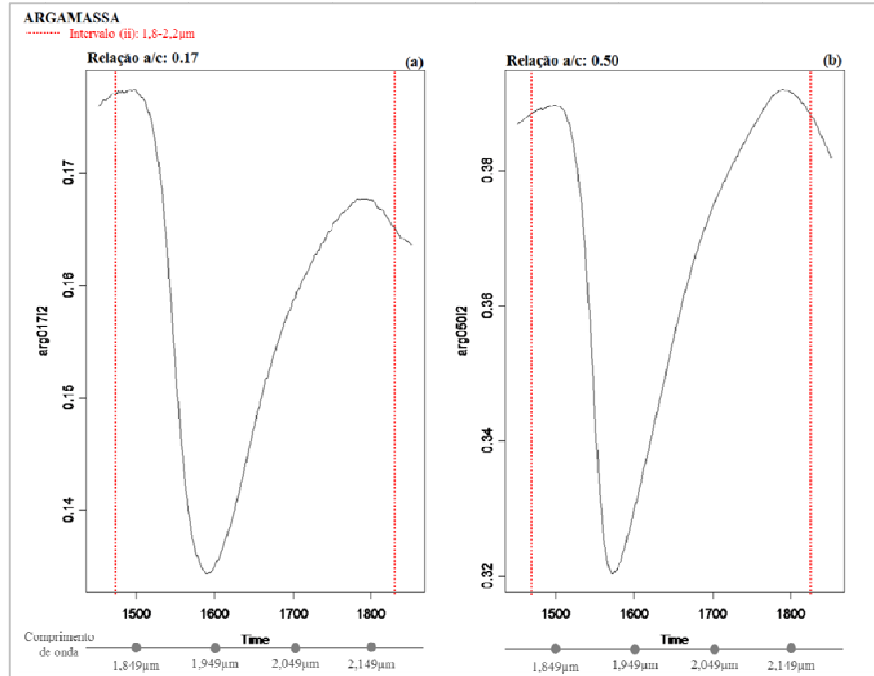
**Figura 36:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 1 (1,3-1,5 $\mu$ m), no nível **s4**, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.**Tabela 32:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 36.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	s4	0,592	0,598	0,5999	0,613	0,006	0,021
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	s4	1,370	1,384	1,405	1,384	0,007	0,014

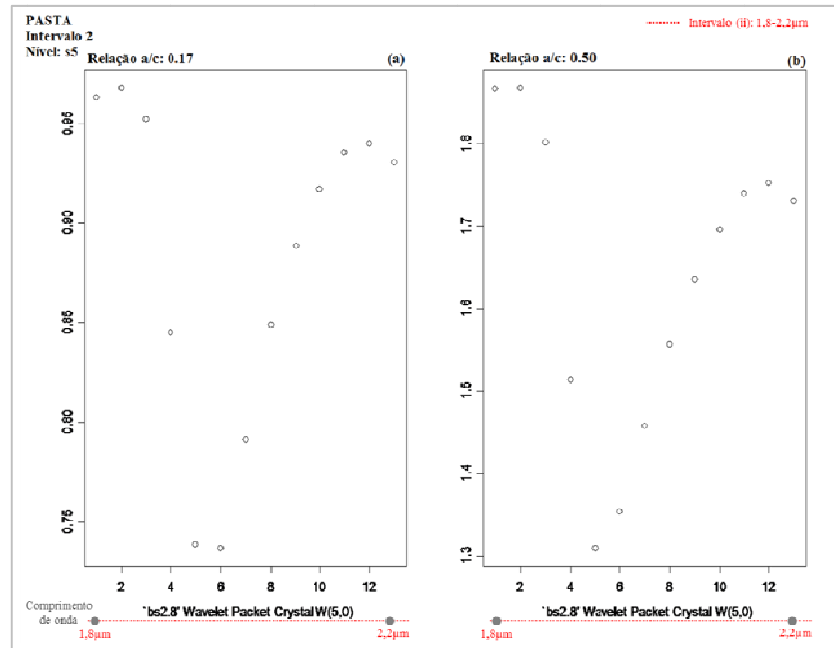
A Figura 37 e Figura 38 mostram a feição em torno de  $\lambda=1,9$ , com valores originais, descrita pelo intervalo (ii) (1,8-2,2  $\mu$ m), para as assinaturas espectrais da relação a/c 0,17 e da relação a/c 0,50 da amostra de pasta e de argamassa. O intervalo (ii) das duas amostras foi decomposto em 5 níveis, que esta representado pelo nível **s5**, nas Figura 39 e Figura 40. Este nível de resolução é o que melhor representa a variação da intensidade da feição entre as duas relações a/c. Nas Tabela 33 e Tabela 34, observam-se os valores de amplitude para cada amostra, mostrando uma razão duas vezes maior entre as relações a/c 0,50 e a 0,17.



**Figura 37:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu\text{m}$ ), amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.



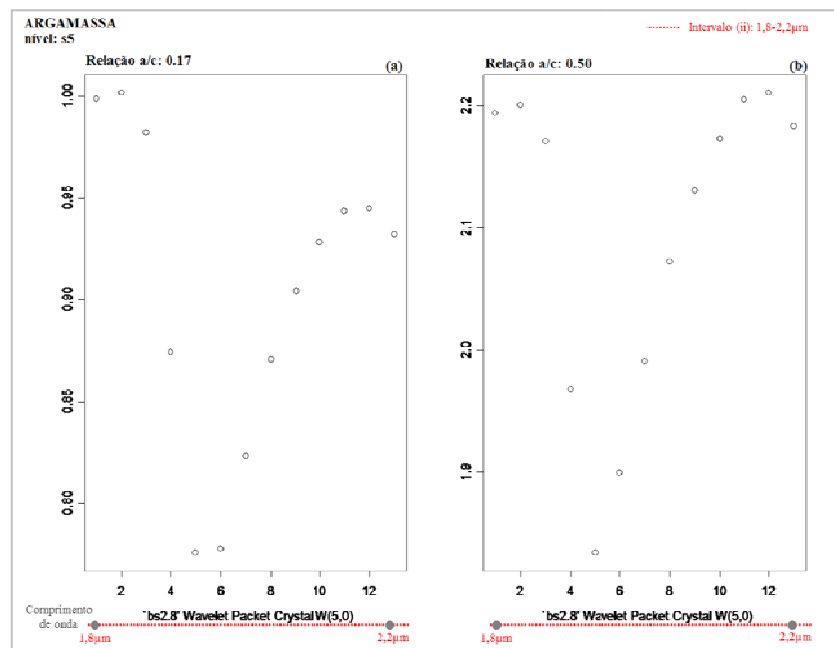
**Figura 38:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2 $\mu\text{m}$ ), amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.



**Figura 39:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2μm), no nível s5, expresso em cristais, amostras de pasta. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.

**Tabela 33:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 39.

Amostra	Nível	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	MAD	Amplitude
PASTA - relação a/c 0,17	s5	0,737	0,917	0,881	0,968	0,068	0,231
PASTA - relação a/c 0,50	s5	1,309	1,695	1,637	1,867	0,206	0,558



**Figura 40:** Gráficos das curvas de Fator de reflectância no intervalo 2 (1,8-2,2μm), no nível s5, expresso em cristais, amostras de argamassa. (a) relação a/c 0,17; (b) relação a/c 0,50.



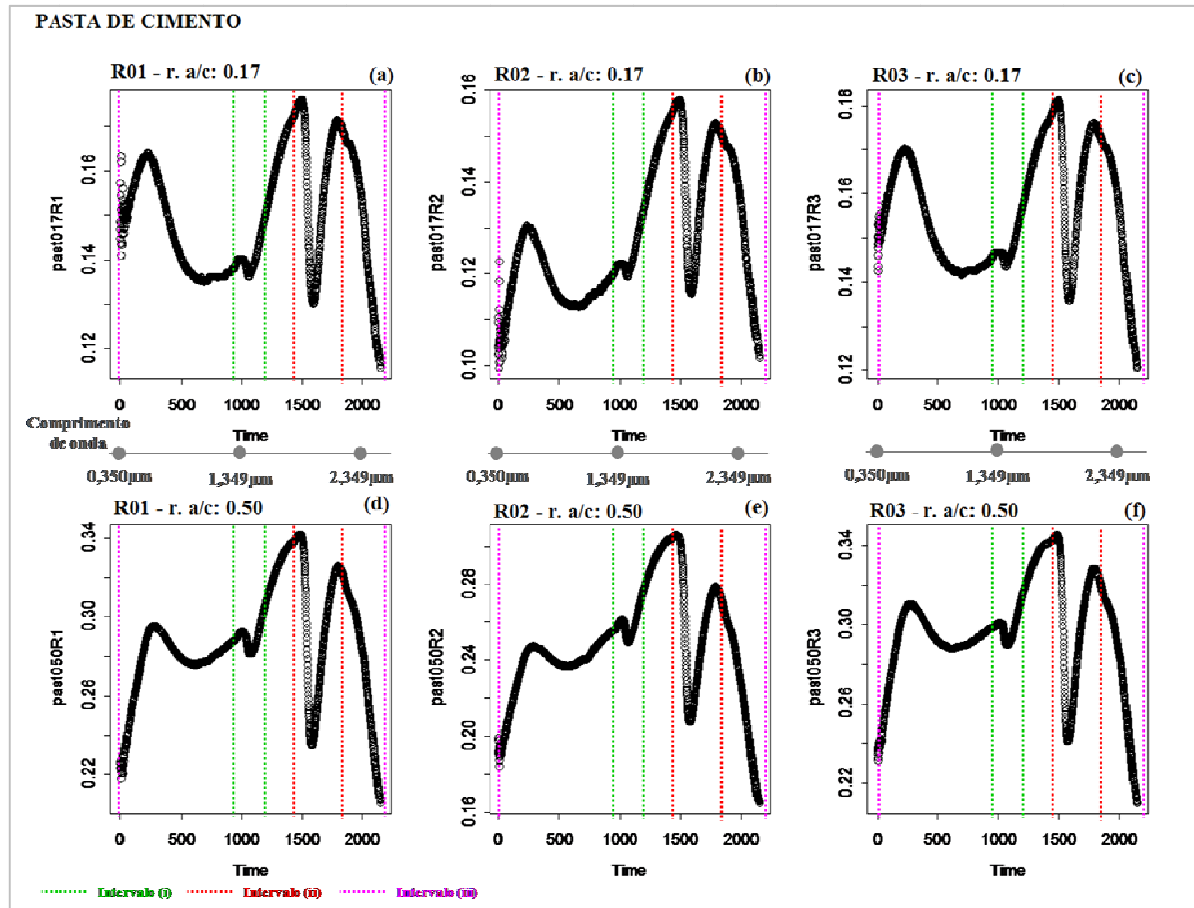
**Tabela 34:** Valores referentes às amostras de pasta da Figura 40.

<b>Amostra</b>	<b>Nível</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>MAD</b>	<b>Amplitude</b>
ARGAMASSA - relação a/c 0,17	s5	0,776	0,928	0,904	1,002	0,080	0,226
ARGAMASSA - relação a/c 0,50	s5	1,834	2,171	2,095	2,211	0,059	0,377

#### 4.1.4.3 Análise das réplicas das curvas espectrais das amostras de pasta no intervalo (iii)

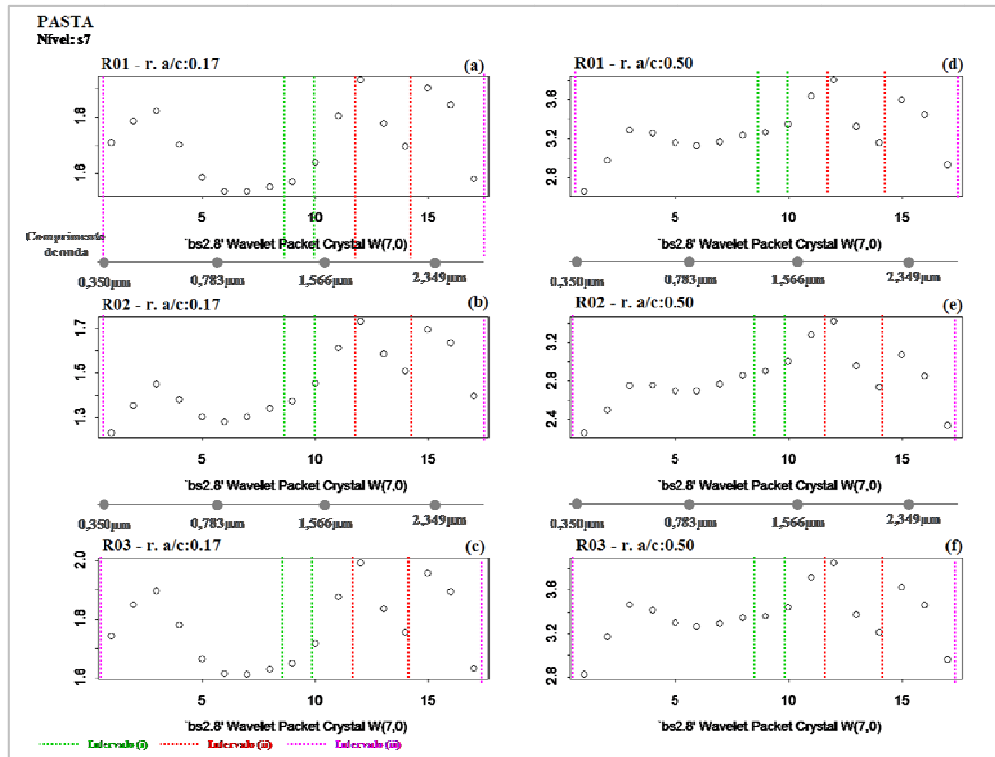
Cada curva espectral analisada é resultado da média de três réplicas de corpos-de-prova do mesmo produto e relação a/c. Cada réplica possui a sua curva espectral, que forma a curva final de cada relação a/c. No entanto, cada uma das réplicas, quando analisadas separadamente, não apresenta valor idêntico de Fator de reflectância das demais réplicas para o mesmo comprimento de onda. Desta forma, foi utilizada a análise de *wavelet* com propósito de confirmar se as réplicas são do mesmo produto e com mesma resistência mecânica. Para este estudo foram utilizadas as relações a/c 0,17 e 0,50 da amostra de pasta.

A Figura 41 mostra as curvas espectrais, com valores originais de Fator de reflectância, das três réplicas das duas resistências mecânicas da amostra de pasta: (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50. Observa-se que as réplicas das relações a/c 0,17 e 0,50 apresentam valores de reflectância variáveis, porém dentro de uma amplitude esperada.

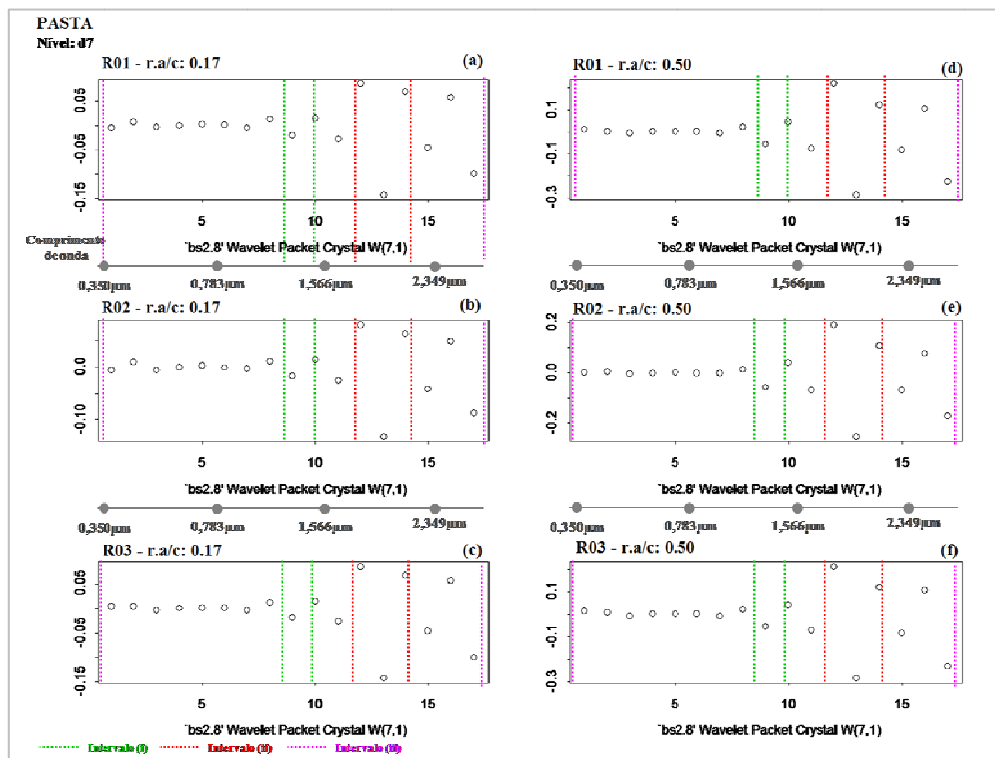


**Figura 41:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50.

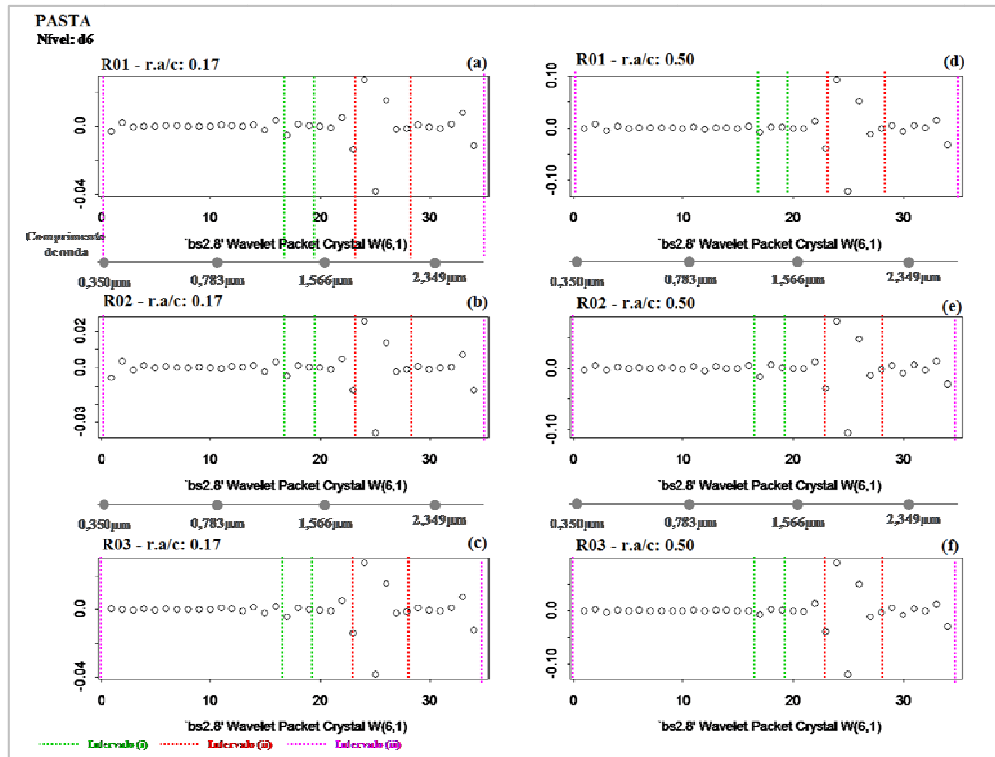
A curva espectral de cada réplica foi submetida ao efeito da função *wavelet* bs2.8. e decomposta em 7 cristais (níveis). O nível *s7* é representado pela Figura 42, onde é possível visualizar que o comportamento espectral das três réplicas, de cada relação a/c, são similares entre si. Quando estas réplicas são decompostas em níveis com maior resolução, como pode ser observado pelos níveis *d7* (Figura 43), *d6* (Figura 44) e *d5* (Figura 45), é possível afirmar que as réplicas da mesma relação a/c são similares entre si e diferentes entre as resistências mecânicas. Através da análise dos gráficos de decomposição das réplicas é possível afirmar que as três réplicas da relação a/c 0,17 (R01, R02 e R03) provém da mesma amostra, no caso pasta, e da mesma resistência mecânica. O nível de decomposição que melhor expressa esta análise é o *d5*. Por meio deste nível nota-se claramente o comportamento similar entre réplicas de mesma relação a/c e a distinção entre as réplicas de diferentes resistências.



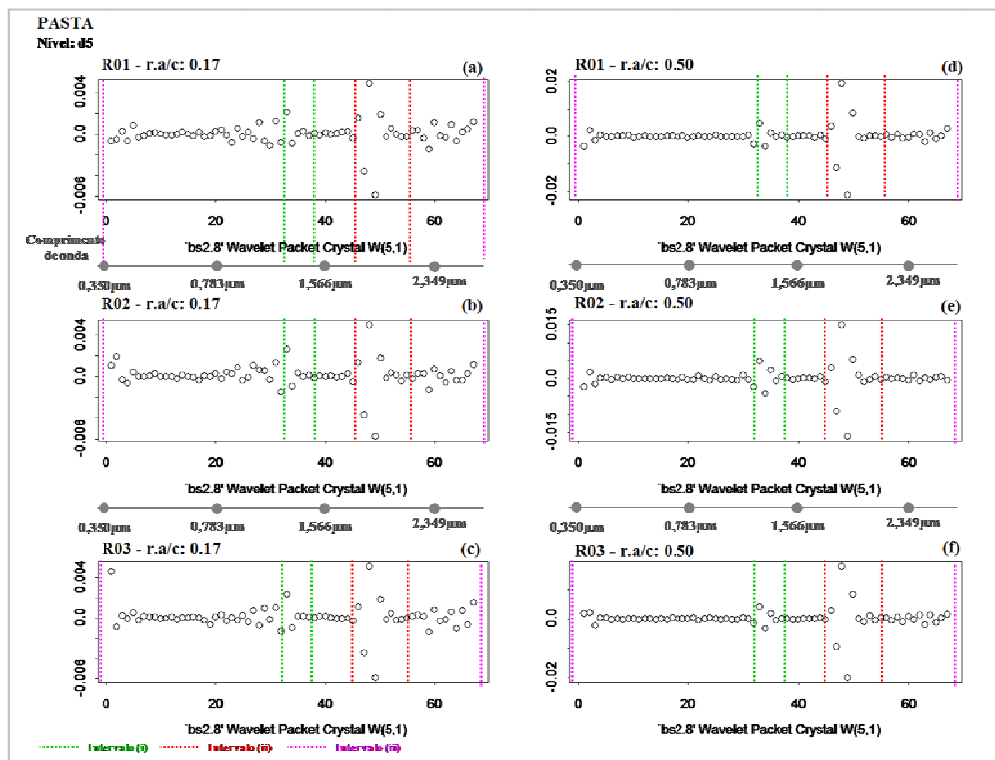
**Figura 42:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível s7. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50.



**Figura 43:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível d7. (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50.



**Figura 44:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **d6**.  
 (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50.



**Figura 45:** Gráficos das curvas das réplicas de cada relação a/c investigada para as amostras pasta, no nível **d5**.  
 (a) réplica 01 relação a/c 0,17; (b) réplica 02 relação a/c 0,17; (c) réplica 03 relação a/c 0,17; (d) réplica 01 relação a/c 0,50; (e) réplica 02 relação a/c 0,50 e (f) réplica 03 relação a/c 0,50.

## 4.2 Discussões

### 4.2.1 Curvas Espectrais das Amostras de Pasta e Argamassa

- dependendo da dosagem utilizada, os materiais cimentícios à base de cimento Portland podem apresentar menos poros na estrutura, o que impossibilita a formação de grandes cristais de Hidróxido de Cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  no processo de hidratação. Segundo Aïctin (2000) conforme a quantidade de água utilizada diminui, a resistência e a quantidade de cimento/ $\text{m}^3$  aumentam, fazendo com que a mistura fique mais compacta, com menos vazios e conseqüentemente com cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  menores. Isso faz com que a intensidade da reflectância das amostras com maior resistência mecânica diminua ao longo de todo o espectro, devido ao surgimento de mais espaços entre os cristais por onde a radiação eletromagnética é transmitida.
- a variação de tonalidade das quatro relações a/c, tanto para as amostras de pasta quanto para as de argamassa, criou um contraste espectral entre as curvas. Enquanto a curva de relação a/c 0,17, com superfície escura, apresentou menor intensidade de Fator de reflectância, a curva de relação a/c 0,50, com superfície clara, demonstrou maior intensidade. Esta característica auxiliou na identificação de um padrão no comportamento espectral das amostras, onde a medida que a relação a/c reduz a intensidade de Fator de reflectância de toda a curva espectral também diminui.
- a posição, a intensidade e a largura das feições de absorção de todas as amostras são semelhantes, demonstrando uma correspondência nas suas propriedades químicas e pequenas variações conforme a concentração dos materiais utilizados (Figura 11 e Figura 14, Tabela 12 e Tabela 14).
- nota-se que todas as curvas espectrais da amostra de argamassa apresentam intensidade de Fator de reflectância maior em relação às mesmas resistências mecânicas da pasta. Isto pode ser explicado devido ao acréscimo de areia à composição química da argamassa. Os cristais de areia presentes auxiliam no aumento do Fator de reflectância de toda a curva espectral para todas as relações a/c, pois apresenta em sua composição sílica, que possui alto índice de reflectância espectral.

- analisando as feições de absorção de todas as amostras, encontram-se duas feições bem definidas em torno de  $1.4\mu\text{m}$  e  $1.9\mu\text{m}$ , que caracterizam a presença de água. É possível identificar uma relação direta entre a redução da quantidade de água, o aumento da resistência e a diminuição do Fator de reflectância das amostras de pasta e de argamassa.
- através da transformada de *wavelet* foi possível comprovar que o aumento da amplitude total das feições de absorção da água, nos intervalos (i) e (ii), é inversamente proporcional à resistência mecânica (relação a/c) para a pasta e a argamassa. Nos gráficos referentes ao intervalo (iii) também se comprovou com este método que, para estas duas amostras, existe um contraste espectral entre as quatro resistências mecânicas.
- nas Figura 27, Figura 29 e Figura 31, correspondentes aos níveis d7, d6 e d5 da amostra de pasta e nas Figura 28, Figura 30 e Figura 32, correspondentes aos níveis d7, d6 e d5 da amostra de argamassa, verificou-se que na região referente à feição mais forte da água (intervalo ii) os valores da amplitude inferior foram maiores que os valores de amplitude superior, em relação a média. No entanto na amostra de pasta, quando analisada a diferença de amplitude superior entre as relações a/c 0,17 e 0,50, assim como para a amplitude inferior, constatou-se que esta feição esticou muito mais para cima do que para baixo. Este comportamento observado no intervalo (ii) foi contrário ao esperado, pois foi a feição da curva espectral que mudou dentro deste intervalo e não somente a profundidade do pico de absorção. Quanto à amostra de argamassa, com exceção do nível d7, constatou-se o comportamento esperado para a feição de absorção da água, ou seja, esta feição esticou mais para baixo do que para cima. Por meio da análise *wavelet* é possível sugerir que outro componente químico presente nas amostras, além da água, está influenciando esta feição de absorção.
- através da decomposição das curvas espectrais das réplicas das amostras de pasta foi possível identificar quais corpos-de-prova pertenciam a mesma amostra e resistência mecânica.

#### 4.2.2 Curvas Espectrais das Amostras de Concreto

- a posição, a intensidade e a largura dos picos de absorção de todas as amostras são semelhantes, demonstrando uma correspondência nas propriedades químicas. Estas informações, fornecidas pelas curvas espectrais, concordam com os dados de dosagem, onde todos os corpos-de-prova foram produzidos com os mesmos materiais e quantidades, modificando-se somente a sua forma física;
- existe uma diferença no comportamento espectral dos corpos-de-prova pré-carregados em relação aos de referência. Esta diferença se caracteriza por uma diminuição na intensidade de reflectância das amostras medidas, devido ao surgimento de microfissuras que geram espaços por onde a radiação eletromagnética é transmitida. A consequência é uma redução da quantidade de radiação que retorna ao meio (Fator de reflectância);
- valores menores de reflectância foram encontrados ao longo de todo o intervalo espectral nos corpos-de-prova pré-carregados à compressão axial (curva 10) em relação aos pré-carregados à tração na flexão (curva 12). Tendo em vista que a compressão axial, devido à maior intensidade das cargas aplicadas, tende a gerar maior número de microfissuras, afetou o comportamento espectral dos corpos-de-prova cilíndricos pré-carregados (CPC) de uma forma mais intensa.
- analisando as feições de absorção de todas as amostras, encontram-se duas feições bem definidas em todas as assinaturas espectrais, que caracteriza a presença de um componente importante no material. Quando estas duas feições aparecem no mesmo espectro, uma próxima a 1.4  $\mu\text{m}$  e outra a 1.9  $\mu\text{m}$ , é diagnosticada a presença da molécula de água na amostra. Independente do corpo-de-prova analisado, estas duas feições permaneceram inalteradas nas quatro amostras.
- comparando as amostras de pasta e de argamassa com as de concreto é possível afirmar que as fissuras causadas tanto por um ensaio de compressão axial como pelo carregamento precoce nos corpos-de-prova, são capazes de mover a curva espectral para valores menores de Fator de reflectância e não alteram o seu comportamento espectral. Desta forma, pode-se determinar que se novas amostras de pasta e de argamassa que não sofreram nenhum esforço estrutural fossem medidas, mantendo os mesmos materiais e quantidades, apresentariam o mesmo comportamento espectral, porém uma assinatura espectral com valores maiores de Fator de reflectância.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a técnica inovadora de espectroscopia de reflectância como uma alternativa às técnicas tradicionais de análise de materiais cimentícios à base de cimento Portland. A análise espectral das curvas de pasta de cimento e de argamassa possibilitou relacionar a reflectância das amostras com a resistência mecânica dos materiais estruturais. Além disso, foi possível identificar a presença e proporção de água nos produtos.

Os concretos estudados foram identificados através do seu comportamento espectral e a análise realizada foi coerente com os resultados mecânicos e de durabilidade aplicados na tese em desenvolvimento das doutorandas Lucília Maria Silveira Bernardino da Silva e Simone Dornelles Venquiaruto, alunas do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE - UFRGS). Foi possível identificar diferenças entre o comportamento espectral dos concretos de referência e o dos pré-carregados, evidenciando-se a aplicabilidade desta ferramenta do sensoriamento remoto na identificação da microfissuração do concreto.

A técnica apresentada foi considerada aplicável como uma ferramenta auxiliar na avaliação da qualidade de materiais cimentícios, podendo complementar as informações obtidas através de técnicas convencionais. Além disso, apresenta vantagens por ser uma técnica não-destrutiva, permite avaliações rápidas e de baixo custo *in loco*. Este método não foi encontrado na literatura nacional nem internacional sendo considerado um trabalho pioneiro no meio acadêmico.

Diante dos resultados dos espectros obtidos, referente à região do visível e do infravermelho próximo, não foi possível obter informações relacionadas com a quantidade e presença dos componentes químicos dos materiais cimentícios à base de cimento Portland, com exceção da água. Entretanto, foi possível diferenciá-los pela resistência mecânica, através o comportamento espectral. Como foi explicado anteriormente, isto ocorre devido à região em estudo não apresentar as feições de absorção mais fortes (nível fundamental,  $v=0$ ) dos compostos presentes no cimento, já que as mesmas encontram-se em comprimentos de onda maiores (infravermelho médio e distante). As bandas geradas pelos sobretons (*Overtones*) e combinações de bandas dos outros componentes químicos além da água não foram detectadas, pois foram suavizadas pela mistura.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-QADER, I.; ABUDAYYEH, O.; KELLY, M. Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 17, n. 4, p. 255–263, 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2003)17:4(255).

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures, Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1918.

AÏCTIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. São Paulo. Editora Pini, 2000.

ASD Incorporated. Technical Guide 3.ed. Boulder, USA, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim Técnico – Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. BT-106, São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento *Portland* de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 5p., 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 9 pg., 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 221 pg., 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento — Especificação. Rio de Janeiro, 4 pg., 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 3 pg., 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 18 pg., 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 53 pg., 2003.

BEN-DOR, E. Imaging spectrometry for urban application. In: Van Der Meer, F.D. and Jong, S.M. ed. *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. 2 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 243–281, 2003. DOI: 10.1007/978-0-306-47578-8\_9.

BENTUR, A.; MITCHELL, D. Material performance lessons. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 2, p. 259–272, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.009.

BOGUE, R. H. *The Chemistry of Portland Cement*, 2nd Ed. Reinhold Publishing Corporation, 1955.

BONALDO, A. V. *Transformada Ondeleite: Algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier*. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.

BORGUE, R. H., LERCH, W. Hydration of Portland cement compounds. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 26, n. 8, p. 837–847, 1934. DOI: 10.1021/ie50296a007.

BREWER, J. *Material Science and Tecnology. Teacher's Workshop prepared by Department of Material Science and Engineering. University of Illinois Urbana-Champaign*. Disponível em: <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html>. Acesso em: 25.01.2014.

BRUCE, A.; GAO, H. Y. *Applied wavelet analysis with S-PLUS*, 1996. ISBN 0-387-94714-0.

BUNGEY, J. H. Sub-surface radar testing of concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2004. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00093-X.

CEMENT RESEARCH INSTITUTE OF INDIA. *Infrared Spectroscopy for Characterization and Evaluation of Cements and Related Materials*. New Delhi, RB-6-76, p. 1–48, 1976.

CHEN, J.; HEPNER, G. F. Investigation of imaging spectroscopy for discriminating urban land covers and surface materials. In: *Proceedings of the 2001 AVIRIS Earth Science and Applications Workshop*, Palo Alto, CA. NASA JPL Publication 02–1. 2001.

EL-BAZ, F. *Remote Sensing of the Earth: Implications for Groundwater in Dafur*. The Brigde, *Linking Engineering and Society*, National Academy of Engineering, v. 38, n. 3, 2008.

FARMER, V. C. *Infra-red Spectroscopy of Silicates and Related Compounds*. In: TAYLOR, H. F. W (ed). *The chemistry of cements*. Academic Press Inc. London, v. 2, p. 442, 1964.

FERREIRA JÚNIOR, E. L.; CAMARINI, G. Análise de imagens: um avanço para a tecnologia do concreto. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

FRANÇA, R. L. S. Fatores críticos de execução de obras e as consequências para as deformações de estruturas de concreto. In: 7º Seminário de Tecnologia de Estruturas. São Paulo. 2005. 44 p. Disponível em: <http://www.sindusconsp.com.br>. Acesso em: 01/02/2014.

GHANDEHARI, M.; VIMER, C. S.; IOANNOU, I.; SIDELEV, A.; JIN, W.; SPELLANE, P. In-situ measurement of liquid phase moisture in cement mortar. *NDT & E International*, v. 45, n.1, p.162–168, 2012. DOI: 10.1016/j.ndteint.2011.09.011.

GHOSH, S. N.; CHATTERJEE, A. K. Absorption and reflection infra-red spectra of major cement minerals, clinkers and cements. *Journal of Materials Science*, v. 9, n. 10, p. 1577–1584, 1974. DOI: 10.1007/BF00540754.

GHOSH, S. N.; CHATTERJEE, A. K. Attenuated total reflectance infra-red spectra of Portland cement. *Journal of materials Science*, v. 10, n. 8, p. 1454–1456, 1975.

GHOSH, S. N. IR Spectroscopy. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. (eds.). *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Principles, Techniques, and Applications*. Ottawa, Ontario, Canada: Noyes Publications/ William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, U.S.A., 2001.

GOETZ, A. F. H.; VANE, G.; SOLOMON, J. E.; ROCK, B. N. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science* (ISSN 0036-8075), 228, (pp.1147-1153), 1985. DOI: 10.1126/science.228.4704.1147.

GREEN R. NASA's HypIRI: Seeing the Forest and the Trees and More! Acesso em: 27.01.2014. <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/hyspiri.html>.

GUINDON, B; ZHANG, Y.; DILLABAUGH, C. Landsat urban mapping based on a combined spectral–spatial methodology. *Remote Sensing of Environment*, v. 92, n. 2, p. 218–232, 2004. DOI: 10.1016/j.rse.2004.06.015.

HEROLD, M.; ROBERTS, D. A.; GARDNER, M. E.; DENNISON, P. E. Spectrometry for urban area remote sensing – development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, v. 91, n. 3–4, p. 304–319, 2004. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.013.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate Minerals: *Mod. Geology*, v. 1, p. 283–300, 1970.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II Carbonates: *Mod. Geology*, v. 2, p. 23–30, 1971.

HUNT, G. R. Spectral Signatures of Particulates Minerals in the Visible and Near-Infrared. *Geophysics*, v. 42, n. 3, p. 501–513, 1977. DOI: 10.1190/1.1440721.

JENNINGS, H. M.; CHEN, J. J.; THOMAS J. J.; TAYLOR, H. F. W. Solubility and structure of the calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, p. 1499–1519, 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.034.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente – uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 598p., 2009.

KEREKES, J. P.; STRACKERJAN, K.; SALVAGGIO C. Spectral reflectance and emissivity of man-made surfaces contaminated with environmental effects. *Optical Engineering*, v. 47, n. 10, p. 106201-1 – 106201-10, 2008. DOI: 10.1117/1.3000433.

LAM, H. Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability. Thesis (Master of Applied Science) – University of Toronto, 2005.

LAU, I. C.; CUDAHY, T. J.; HEINSON, G.; MAUGER, A. J.; JAMES, P. R. Practical applications of hyperspectral remote sensing in regolith research. In I. C. Roach (Ed.), *Advances in Regolith* (p. 249–253). CRC LEME, 2003.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Remote sensing and image interpretation. 6th ed. New York: John Wiley and Sons Press, 2008.

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

MILTON, E. J.; SCHAEPMAN, M. E.; ANDERSON, K.; KNEUBÜHLER, M.; FOX, N. Progress in Field Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 1, p. S92–S109, 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.001.

NETZBAND, M.; SCHÖPFER, E.; MÖLLER, M. Monitoring urban change with ASTER data In: RAMACHANDRAN, B.; JUSTICE, C. O.; ABRAMS, M. J. (eds.) *Land remote*

sensing and global environmental change. NASA's earth observing system and the science of ASTER and MODIS. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, v. 11, p. 397–419, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-6749-7\_17.

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

NICODEMUS, F. F., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I.W., & LIMPERIS, T. L. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. National Bureau of Standards Monograph, Vol. 160 (pp. 20402) Washington D.C U.S. Govt. Printing Office, 1977.

OGDEN, T. *Essential Wavelets for Statistical Applications and Data Analysis*. Birkhäuser Basel, XVIII, 206 p., 1997.

PANZERA, T. H.; SABARIZ, A. L. R.; STRECKER, K.; BORGES, P. H. R.; VASCONCELOS, D. C. L.; WASCONCELOS, W. L. Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento Portland e resina epoxi. *Cerâmica*, v. 56, n. 337, p. 77–82, 2010. DOI: 10.1590/S0366-69132010000100013.

PAROLI, R. M.; DELGADO, A. H.; BEAUDOIN, J. J. Comparison of IR Techniques for the Characterization of Construction Cement Minerals and Hydrated Products. *Applied Spectroscopy*, v. 50, n. 8, p. 970–976, 1996. DOI: 10.1366/0003702963905312.

POTGIETER-VERMAAKA, S. S.; POTGIETERB, J. H.; VAN GRIEKENA, R. The application of Raman spectrometry to investigate and characterize cement, Part I: A review. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 4, p. 656–662, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.09.008.

REDA, M. M.; SHRIVE, N. G.; GILLOTE, J. E. Microstructural Investigation of Innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 3, p. 323–329, 1999. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00225-7.

REEVES, R. G. (editor-in-chief), *Manual of Remote Sensing*, First Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, USA, v. 1, 1975.

RICHARDSON, I. G. The nature of the hydration products in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, n. 2, p. 97–113, 2000. DOI: 10.1016/S0958-9465(99)00036-0.

ROBERTSON, D. C.; CAMPS, O. I.; MAYER, J. S.; GISH, W. B. Wavelet and Electromagnetic Power System Transients. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 1050–1058, 1996. DOI: 10.1109/61.489367.

ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, G. L. Tempo de lançamento do concreto: um novo paradigma. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 5, n. 6, p. 798–811, 2012.

SHAM, F. C. J.; CHEN, N.; LONG, L. Surface crack detection by flash thermography on concrete surface. *INSIGHT* published by the British Institute of Non-Destructive Testing, v. 50, n. 5, p. 240–243, 2008. DOI: 10.1784/insi.2008.50.5.240.

SIEGEL, R.; Howell J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 1nd ed. Washington, DC: Hemisphere, 190p., 1968.

SLATER, P. N. *Remote Sensing of Environment*. Addison-Nerly, 515p., 1980.

SMITH, B. C. *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*. Boca Raton: CRC Press, 264p., 1999.

VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós-reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VENQUIARUTO, S.; BERNARDINO DA SILVA, L.; DAL MOLIN, D. C. C. *Influência do carregamento precoce na durabilidade de concretos produzidos com diferentes tipos de concreto*. IBRACON. Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC), Gramado, Outubro, 2013.

VIEIRA, G. L. *Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. *Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, quando aplicado um pré-carregamento de compressão*. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 1, p. 25–40, 2011.

WELCH, R. *Spatial resolution requirements for urban studies*. *International Journal of Remote Sensing*, v. 3, n. 2, p. 139–146, 1982. DOI: 10.1080/01431168208948387.

WINSLOW, D.; LIU, D. The pore structure of paste in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 20, n. 2, p. 227–284, 1990. DOI: 10.1016/0008-8846(90)90075-9.

YLMEN, R.; JAGLID, U.; STEENARI, B. M.; PANAS, I. Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. *Cement and Concrete Research* v. 39, n. 5, p. 433–439, 2009. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.017.