

Aplicação da espectroscopia na região do visível e infravermelho próximo na avaliação não-destrutiva de materiais cimentícios

Rochelle Schneider dos Santos¹
Silvia Beatriz Alves Rolim¹
Fernando Hepp Pulgati¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM)
Av. Bento Gonçalves, 9.500 – 91501-970. Caixa Postal 15.044
Porto Alegre, RS/Brasil
rochellesds@gmail.com; {silvia.rolim, pulgati}@ufrgs.br

Abstract. Rapid urbanization is leading to unplanned growth of large cities, along with the use of poor-quality urban materials as a result of high demand for construction projects. All materials pass through evaluation procedures and the most quality inspections is associated with destructive testing. The intensive use of materials based on cement contributes for the research development related to methods of non-destructive inspection. In this context, remote sensing offers resources that collect data from an object without the need to destroy it, and can contribute to monitoring construction materials, allowing to investigate and identify various properties. The materials can be inspected directly on site, in a rapid and inexpensive manner; this is crucial for the ongoing process of construction. This study was conducted with FieldSpec® 3 spectroradiometer to measure two cement materials based on Portland cement: cement paste and mortar. In these samples, the spectral behavior of four different mechanical compressive strengths was observed. The absorption features of the spectral curves were interpreted based on the theory of vibrational and electronic spectroscopy. The result of this study found out a spectral contrast between different samples and it was possible to detect the presence and proportion of water. Through Wavelet analysis recorded statistical evidences of spectral contrast and showed that the depth of water absorption features is inversely proportional to compressive strength in the materials under study. The technique applied is considered to be promising and feasible as an alternative method to minimize time and cost of conventional techniques of quality control.

Palavras-chave: cement paste, mortar, remote sensing, wavelet analysis, pasta de cimento, argamassa, sensoriamento remoto, análise wavelet.

1. Introdução

Todas as cidades apresentam uma estrutura construtiva padrão, composta pelos mesmos materiais como: o asfalto, o concreto, o vidro e o metal. É importante que todos estes materiais estejam de acordo com o controle de qualidade estipulado pela norma de cada material, para proporcionar segurança e qualidade na vida das pessoas (Kerekes et. al, 2008). A urbanização acelerada vem ocasionando um crescimento sem planejamento das grandes cidades, juntamente com o uso de materiais urbanos de péssima qualidade devido à intensa demanda das construções. Materiais à base de cimento Portland são algum destes produtos intensamente consumidos no mercado da construção civil. Todos os materiais passam por procedimentos avaliativos e a maioria das inspeções de qualidade está relacionada com ensaios destrutivos. O uso intensivo dos produtos gerados através de materiais cimentícios contribui para que, cada vez mais, se desenvolva pesquisas relacionadas com métodos não-destrutivos para a inspeção, favorecendo abordagens multidisciplinares e possibilitando uma avaliação mais ampla e eficiente (Schneider Dos Santos et al., 2014).

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 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. 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 (Paroli et al., 1996; Schneider Dos Santos et al., 2014). A aplicação de novas técnicas e métodos para avaliação de materiais à base de cimento apresenta um fator de impacto importante relacionado à eficiência e desempenho dos materiais. Como uma estratégia para minimizar o volume de amostras a serem analisadas pelos métodos destrutivos tradicionais, as técnicas de sensoriamento remoto proximal podem ser utilizadas como um recurso alternativo, pois apresentam princípios investigativos bem definidos e necessitam acessar somente a superfície do material (Ghosh, 2001).

2. Materiais cimentícios à base de cimento Portland

2.1 Características físicas

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 e cimento aluminoso (Neville, 1997). Existem 5 tipos de cimentos Portland, sendo o cimento Portland CPV-ARI o selecionado para a realização deste trabalho, devido sua ampla utilização em obras de infraestrutura executadas atualmente no Brasil. Quando hidratado, o cimento Portland é denominado “pasta” e forma o silicato de cálcio hidratado, o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 , a etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado. 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. 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 mecânica final, a curva espectral da mistura.

A resistência mecânica à compressão é a propriedade mais valorizada no controle de qualidade dos materiais cimentícios e pode ser definida como a capacidade de suportar, sem ruptura, as forças atuantes sobre a estrutura. Vários fatores podem influenciar na variação da resistência, como a relação água/cimento, a porosidade e o tamanho dos cristais dos compostos hidratado (Reda et al., 1999). A relação água/cimento (relação a/c) é conhecida como a quantidade de água na mistura (kg.m^{-3}) em relação à quantidade de cimento (kg.m^{-3}). As características e propriedades dos materiais cimentícios vão depender da proporção e da qualidade dos compostos presentes (Neville, 1997; ABNT, 2014). Segundo Abrams (1918) foi estabelecida uma relação inversamente proporcional entre a relação a/c e a resistência mecânica (quanto mais água na mistura, menor será a rigidez do material). O aumento da relação a/c enfraquece o sistema, deixando a pasta hidratada menos compacta, com mais espaços livres (poros grandes), permitindo o crescimento dos produtos da hidratação do cimento Portland como, por exemplo, os cristais de Ca(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).

2.2 Comportamento espectral

O sensoriamento remoto envolve o registro da radiação eletromagnética refletida ou emitida por um alvo, relacionando a resposta obtida com as propriedades físico-químicas do

mesmo (Hunt e Salisbury, 1970). A curva espectral traz informações importantes da composição do material analisado, como por exemplo, a presença e quantidade de água (Smith, 1999). Existe uma forte correlação entre a posição do pico de absorção em uma assinatura espectral e a estrutura química de uma molécula, este fato faz com que a espectroscopia seja uma ferramenta de análise importante.

Existem algumas condições para que a vibração da molécula se transforme em uma feição no seu espectro. Para ocorrer absorção da radiação, os átomos presentes na molécula devem apresentar Momento dipolo diferente de zero e a luz incidente deve 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 apresentar o valor exato necessário.

É possível ativar vários modos vibracionais (ν) ao mesmo tempo, através de uma única energia. Segundo Hunt (1977), são os sobretons 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. A água líquida possui três modos vibracionais que são observados, quando excitados, nas regiões $\nu_1= 3.106 \mu\text{m}$; $\nu_2= 6.080 \mu\text{m}$ e $\nu_3= 2.903 \mu\text{m}$ (Tabela 1). Na região do infravermelho próximo podem aparecer cinco feições de absorção, classificadas como sobretons e combinações de bandas (Hunt, 1977). As duas feições de interesse neste estudo são as feições localizadas próximas a $1,454 \mu\text{m}$ ($2\nu_1 + \nu_3$) e $1,875 \mu\text{m}$ ($\nu_2 + \nu_3$). Através da curva espectral é possível identificar a presença da água em um material. Isto é possível quando as duas bandas de absorções localizadas próximo a $1,40\mu\text{m}$ e $1,9\mu\text{m}$, aparecerem juntas na assinatura espectral da amostra. A variação da quantidade de água pode ser detectada pela variação da profundidade destas duas feições de absorção mencionadas (Hunt, 1977).

Tabela 1. Feições de absorção da água.

Tipos de feições de absorção	Comprimento de onda (μm)
Modos vibracionais $\text{H}_2\text{O}_{\text{líquida}}$	
ν_1 Estiramento simétrico do OH	3,106
ν_2 OHO flexão (<i>bend</i>)	6,080
ν_3 Estiramento assimétrico do OH	2,903
Sobretom + Combinação de bandas	
$\nu_2 + \nu_3$	+ - 1,875
$2 \nu_1 + \nu_3$	+ - 1,454
$\nu_1 + \nu_3$	+ - 1,380
$\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$	+ - 1,135
$2 \nu_1 + \nu_3$	+ - 0,942

Fonte: Adaptado de HUNT, 1977.

3. Metodologia de Trabalho

A análise do comportamento espectral de produtos à base de cimento Portland foi realizada em dois tipos de material: pasta de cimento (pasta) e argamassa. Os corpos-de-prova foram fabricados na forma cilíndrica e com dimensão de $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ (LxA) pelo Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (LAMTAC/NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As medições com o espectrorradiômetro foram realizadas no Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico (LAB-SRGEO) da UFRGS. As análises estatísticas das curvas espectrais foram feitas no Núcleo de Assessoria Estatística (NAE) da UFRGS. Cada material possui três

corpos-de-prova para cada uma das quatro resistências à compressão (relação a/c : 0.17; 0.21; 0.30 e 0.50), totalizando doze exemplares de pasta e doze de argamassa. As dosagens das amostras pasta e argamassa estão discriminadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Todas as relações a/c da pasta foram produzidas com os mesmos materiais (cimento Portland, sílica ativa, água, aditivo superplastificante). Na argamassa utilizaram-se os mesmos materiais da pasta com adição de areia.

Tabela 2. Dosagem das amostras de pasta de cimento e de argamassa. O prazo estabelecido para determinar a resistência mecânica final à compressão axial de uma estrutura é 28 dias (ABNT, 2014).

Amostra	Relação a/c	Cimento Portland CPV-ARI (Kg.m ⁻³)	Sílica ativa (Kg.m ⁻³)	Água (Kg.m ⁻³)	Areia (Kg.m ⁻³)	Aditivo (Kg.m ⁻³)	Aditivo (%)	Compressão axial (MPa)
Curva 1	0.50	827	92	449	-	0,00	0,00	47,40
Curva 2	0.30	1081	120	359	-	7,40	0,62	83,10
Curva 3	0.21	1272	141	292	-	16,70	1,18	116,70
Curva 4	0.17	1368	152	258	-	21,50	1,42	128,00
Curva 5	0.50	414	46	224	863	0,00	0,00	44,50
Curva 6	0.30	541	60	180	786	5,00	0,85	84,80
Curva 7	0.21	636	71	146	690	10,00	1,46	109,30
Curva 8	0.17	684	76	129	671	21,50	2,83	136,00

3.1 Medições com o espectrorradiômetro

As medidas de radiância dos materiais cimentícios à base de cimento Portland foram realizadas com o Espectrorradiômetro FieldSpec 3, utilizando o acessório Hi-Brite Contact Probe (ASD, 1999). Os valores de radiância foram convertidos para fator de reflectância (FR) (Milton, et. al., 2009). A interpretação dos espectros foi feita com base na análise das feições de absorção da água e na intensidade de fator de reflectância de cada curva. A leitura com o espectrorradiômetro foi feita para cada uma das quatro resistências à compressão de cada material, lembrando que cada resistência possui três corpos-de-prova. Através das leituras realizadas para cada curva (1 a 8) realizou-se um média aritmética dos valores de fator de reflectância medidos, gerando uma única assinatura espectral final para cada relação a/c de cada material.

3.2 Método estatístico: Wavelet

A análise wavelet pode ser considerada um aprimoramento da Análise de Fourier, pois é aplicável em qualquer tipo de sinal (os espectros analisados são classificados como não-estacionário). A Transformação Wavelet 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 (Ogden, 1997). Neste trabalho a análise foi empregada para comprovar estatisticamente o contraste espectral entre as curvas do mesmo material e a variação da amplitude nas feições de absorção da água. O número de níveis de decomposição (cristais) é determinado pela capacidade de adequação da função wavelet (bs2.8) ao tamanho da amostra. Neste caso o modelo atingiu 99,99% da variabilidade com sete níveis de decomposição, utilizando o intervalo entre 0,35-2,5 μ m.

4. Resultados e Discussão

A análise exploratória dos espectros foi realizada por meio de um diagrama de fator de reflectância espectral (ρ) com as quatro resistências mecânicas da amostra de pasta, curvas 1 a

4, (Figura 1) e de argamassa, curvas 5 a 8, (Figura 2). Nas duas figuras, cada número entre parênteses identifica a curva espectral. Este número, quando seguido pela letra *a* representa a feição de absorção localizada em torno de $\lambda=1.40\mu\text{m}$ e seguido pela letra *b* representa a feição em torno de $\lambda=1.90\mu\text{m}$. A inspeção visual das assinaturas espectrais da amostra de pasta indica que as quatro relações *a/c* apresentam um comportamento padrão, 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 diminui a resistência mecânica e aumenta a proporção de água na mistura. 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 é correspondente à amostra de pasta com menor resistência (curva 1 - relação *a/c* 0.50). Em todas as assinaturas observam-se duas feições na região do infravermelho próximo, em torno de $\lambda=1,40\mu\text{m}$ ($FR_{1,40\mu\text{m}}$) e $\lambda=1,90\mu\text{m}$ ($FR_{1,90\mu\text{m}}$). Através da Tabela 3, nota-se que a profundidade destas duas feições de absorção, $FR_{1,40\mu\text{m}}$ e $FR_{1,90\mu\text{m}}$, diminui da curva 1 para a curva 4, sentido que a resistência mecânica aumenta.

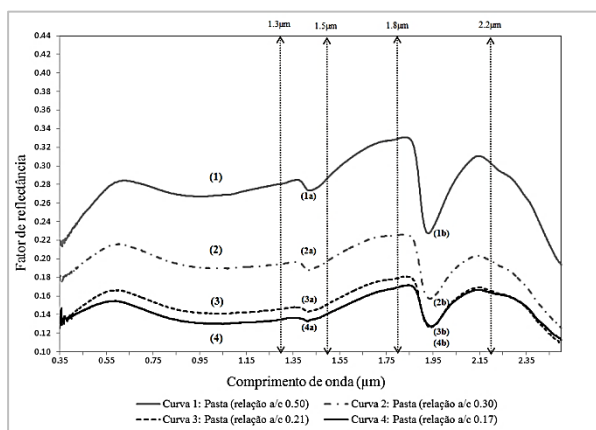


Figura 1. Comportamento Espectral das 4 resistências mecânicas da pasta.

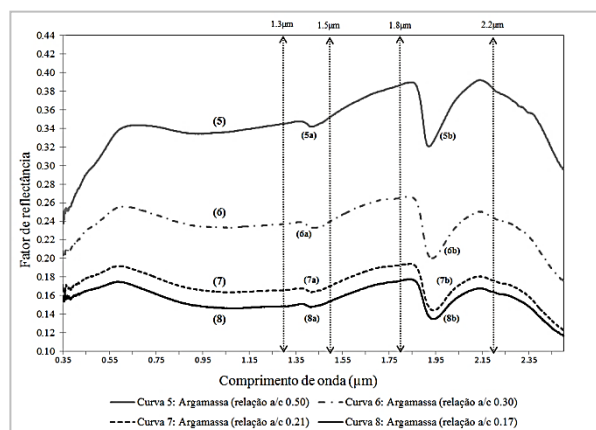


Figura 2. Comportamento Espectral das 4 resistências mecânicas da argamassa.

Tabela 3. Variação da profundidade das feições de absorção das amostras pasta e argamassa.

A profundidade da feição em torno de $\lambda=1,40\mu\text{m}$ é definida por $FR_{1,40\mu\text{m}} = FR_{1,372\mu\text{m}} - FR_{1,417\mu\text{m}}$ e a feição em torno de $\lambda=1,90\mu\text{m}$ é definida por $FR_{1,90\mu\text{m}} = FR_{1,834\mu\text{m}} - FR_{1,928\mu\text{m}}$.

Amostra	Profundidade da feição $FR_{1,40\mu\text{m}}$	Profundidade da feição $FR_{1,90\mu\text{m}}$
Curva 1	(1a) 0,0115	(1b) 0,1030
Curva 2	(2a) 0,0084	(2b) 0,0679
Curva 3	(3a) 0,0046	(3b) 0,0530
Curva 4	(4a) 0,0028	(4b) 0,0420
Curva 5	(5a) 0,0056	(5b) 0,0676
Curva 6	(6a) 0,0060	(6b) 0,0654
Curva 7	(7a) 0,0040	(7b) 0,0484
Curva 8	(8a) 0,0029	(8b) 0,0413

As curvas de argamassa apresentam um comportamento similar às curvas da pasta, 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. 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 é com menor resistência (curva 5 - relação a/c 0.50). Em todas as assinaturas observam-se as mesmas feições de absorção encontradas nas curvas da pasta, FR_{1,40µm} e FR_{1,90µm}. Através da Tabela 3, nota-se que a profundidade das duas feições de absorção diminui da curva 5 para a curva 8, sentido que a resistência mecânica aumenta.

Todas as curvas espectrais foram decompostas em 7 níveis de resolução, por meio da função wavelet escolhida. As Figura 3 e Figura 4 mostram a decomposição das curvas espectrais de cada relação a/c de cada material no nível de resolução s_7 , que terá uma representação gráfica expressa pelos coeficientes wavelet. Uma das vantagens 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 4, visualizam-se os valores da mediana da curva 1 (relação a/c 0.50) (3,148) e da curva 4 (relação a/c 0.17) (1,621). Pode-se dizer que a mediana da curva 1 é quase duas vezes maior que da curva 4. Esta informação tem uma relação direta com a proporção do dado original de fator de reflectância.

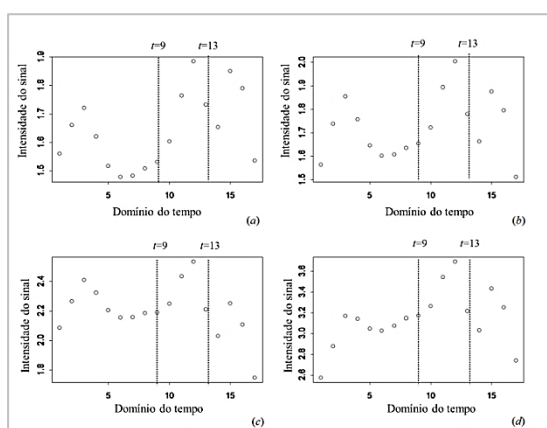


Figura 3. Gráficos das curvas de pasta no nível s_7 , expresso em cristais. (a) curva 4, (b) curva 3, (c) curva 2 e (d) curva 1.

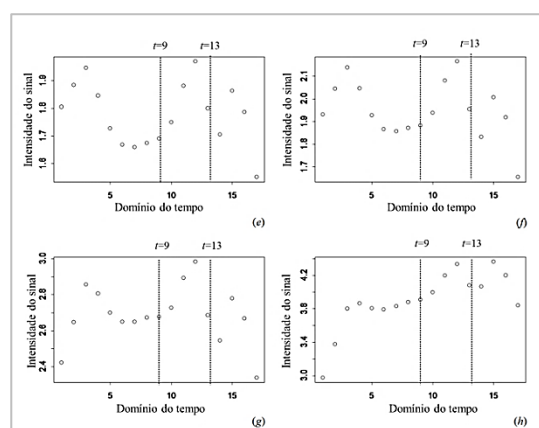


Figura 4. Gráficos das curvas de argamassa no nível s_7 , expresso em cristais. (e) curva 8, (f) curva 7, (g) curva 6 e (h) curva 5.

Tabela 4. Valores referentes às amostras de pasta Figura 3 (curvas 1 a 4) e de argamassa Figura 4 (curvas 5 a 8).

Amostra	Cristal	Valor mínimo	Mediana	Média	Valor máximo	Amplitude total
Curva 1	s_7	2,575	3,148	3,141	3,691	1,116
Curva 2	s_7	1,747	2,204	2,208	2,533	0,786
Curva 3	s_7	1,510	1,722	1,723	2,004	0,494
Curva 4	s_7	1,477	1,621	1,641	1,885	0,408
Curva 5	s_7	2,974	3,881	3,900	4,362	1,388
Curva 6	s_7	2,338	2,677	2,688	2,982	0,644
Curva 7	s_7	1,654	1,931	1,948	2,165	0,511
Curva 8	s_7	1,551	1,786	1,777	1,970	0,419

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 curva 1 é 2,7 vezes maior que a curva 4, 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 aumenta (da curva 4 para a curva 1), 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 s_7 . Assim como as diferenças no padrão e na forma de cada curva espectral.

Segundo Aïctin (2000), conforme a quantidade de água utilizada diminui, a resistência e a quantidade de cimento por metro cúbico aumentam, fazendo com que a mistura fique 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 entre as resistências mecânicas é uma propriedade importante para a análise das curvas espectrais. Para relações a/c 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, 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). Esta característica foi captada pelo espectrorradiômetro, produzindo um contraste espectral entre as curvas 1 a 4, da amostra de pasta e entre as curvas 5 a 8, da argamassa. Enquanto as curvas 4 e 8 (relação a/c 0.17), com superfície escura, apresentaram menor intensidade de fator de reflectância, as curvas 1 e 5 (relação a/c 0.50), com superfície clara, demonstraram maior intensidade. Esta característica auxiliou na identificação de um padrão no comportamento espectral das amostras, onde à 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 1, Figura 2 e Tabela 3). Analisando as feições de absorção de todas as amostras, encontram-se duas 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.

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.

Através da análise wavelet foi possível comprovar que o aumento da amplitude total das feições de absorção da água, em $t=9$ e $t=13$, é inversamente proporcional à resistência mecânica para a pasta e a argamassa. Nos gráficos também se comprovou com este método que, para estas duas amostras, existe um contraste espectral entre as quatro resistências mecânicas.

5. Conclusões

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. 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 diferentes produtos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos, ao Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (LAMTAC/NORIE) da UFRGS pelas amostras de pasta e de argamassa cedidas e ao Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico (LAB-SRGeo) do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da UFRGS.

Referências Bibliográficas

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

Aïctin, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1.ed. São Paulo. Editora Pini, 2000.

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

Associação Brasileira de Normas técnicas. **NBR 5739: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2007, 9 p.

Associação Brasileira de Normas técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014, 238 p.

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, cap. 5, p. 200-230.

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

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

Milton, E. J.; Schaepman, M. E.; Anderson, K.; Kneubühler, M.; Fox, N. Progress in Field Spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, vol. 113, n. 1, p. S92–S109, 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.001.
Neville, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

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

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**, vol. 50, n. 8, p. 970–976, 1996. DOI: 10.1366/0003702963905312.

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

Schneider Dos Santos, R., Rolim, S. B. A., Pulgati, F. H., Dal Molin, D. C. C., Venquiaruto, S. and Bernardino Da Silva, L. O uso de técnicas de sensoriamento remoto para detectar microfissuras em concretos submetidos ao carregamento precoce. In Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (CLB MCS), 1., 2014, Guimarães, Portugal. Anais, vol. 2, p. 540-551. ISSN 2183-1866.

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