



ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES E RESÍDUOS

**Munique Fante⁽¹⁾; David Brandão Nunes⁽²⁾; Laís Vieira de Souza⁽³⁾;
Marlova Piva Kulakowski⁽⁴⁾; Francisco Manoel Wohnrath Tognoli⁽⁵⁾**

(1) UNISINOS – munifante@hotmail.com; (2) UNISINOS – davidbrnunes@gmail.com; (3) UNISINOS – laisvs@unisinis.br (4) UNISINOS – marlovak@unisinis.br (5) UNISINOS – ftognoli@unisinis.br

RESUMO

A espectroscopia de reflectância é uma técnica amplamente utilizada, com aplicações, por exemplo, na caracterização de rochas e minerais, solos e vegetação. Porém as pesquisas desta técnica aplicada a construção civil ainda são superficiais. A aplicação da técnica para caracterização de diferentes materiais é devida as mudanças das feições de absorção nos variados comprimentos de ondas, que são específicas para cada material; e com isso é possível reconhecer diferentes composições químicas e até mesmo variações de concentração. Portanto, a utilização desta técnica, para a caracterização de materiais e resíduos com potencial emprego na construção civil, pode se tornar uma alternativa viável em pesquisas e desenvolvimento de novos produtos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o ensaio de espectroscopia de reflectância em materiais cimentícios suplementares e resíduos, observando diferentes comportamentos espectrais. Para tanto, foram utilizados os seguintes materiais: cimento CP-V, clínquer, filer calcário, metacaulim, resíduo cerâmico, cinza volante, cinza de casca de arroz e resíduo da lapidação do vidro. Os resultados mostram que cada um dos materiais estudados possui padrão espectral distinto, corroborando com as diferentes composições químicas. Demonstrando que a espectroscopia de reflectância é uma técnica eficaz para a diferenciação destes materiais, além de ser rápida, eficaz e não destrutiva.

Palavras-chave: espectroscopia de reflectância, resíduos, materiais cimentícios suplementares.

REFLECTANCE SPECTROSCOPY APPLIED TO THE CHARACTERIZATION OF SUPPLEMENTARY CIMENTARY MATERIALS AND WASTES

ABSTRACT

Reflectance spectroscopy is a widely used technique, with applications, for example, in the characterization of rocks and minerals, soils and vegetation. However, the researches of this technique applied to civil construction seems to be superficial. The application of the technique to characterize different materials is due to the changes in the absorption characteristics of different wavelengths, which are specific to each material; and with this it is possible to recognize different chemical compositions and even variations of concentration. Therefore, the use of this technique, for the characterization of materials and wastes with potential use in civil construction, can become a viable alternative in research and development of new products. The aim of this work was to evaluate the reflectance spectroscopy in supplementary cementitious materials and wastes, observing different spectral behavior. The following materials were used: CP-V cement, clinker, limestone filler, metakaolin, ceramic waste, fly ash, rice husk ash and glass lapidation waste. The results show that each of the studied materials has a specific pattern, corroborating with the different chemical compositions. Demonstrating that reflectance spectroscopy is an effective technique for the differentiation of these materials, in addition to being fast, effective and non-destructive.

Key-words: Reflectance spectroscopy, wastes, supplementary cementitious materials.



1. INTRODUÇÃO

A concentração de CO₂ no mundo vem aumentando nas últimas décadas, sendo que a média mensal global apresentou um aumento superior a 40ppm entre os anos 2000 e 2018 ⁽¹⁾. Ao estudarmos o processo de fabricação do cimento Portland, verificamos que resultam na emissão de gás carbônico. Estes são indicados como responsáveis por 5 a 7% das emissões de gás carbônico mundiais ⁽²⁾

A redução do fator clínquer pela incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma estratégia eficaz para a redução dessas emissões, com uma previsão de 37% de redução no fator clínquer até o ano de 2050 ^(3,4). Os MCS podem ser caracterizados como fileres ou pozolanas, normalmente, provenientes de resíduos de outros ramos de atividade, como o resíduo de cerâmica vermelha e a cinza de casca de arroz. Ao incorporarmos diferentes materiais ao cimento, sua composição química é modificada, podendo acarretar em reações diferenciadas. Portanto, é necessária uma boa caracterização do material a se incorporar.

Ao abrangermos técnicas de sensoriamento remoto, verificamos que sua utilização na área da construção civil ocorre há mais de 30 anos. No entanto, a caracterização e identificação de materiais é ainda limitada, principalmente em relação à utilização de sensores proximais com maior resolução espectral ⁽⁵⁾. Com o intuito de uma melhor caracterização e utilização de diferentes técnicas, o presente estudo visa avaliar a técnica de espectroscopia de reflectância em materiais cimentícios e resíduos, observando as variações no comportamento espectral.

1.1. Caracterização espectral de materiais cimentícios

A espectroscopia de reflectância é uma técnica que permite caracterizar diferentes materiais, observando as variações nos padrões de reflectância das bandas espectrais em variados comprimentos de onda. Baseia-se no princípio de incidência de iluminação sobre uma determinada superfície e registro do espectro da luz refletida para extração das respostas espectrais que são sensíveis à composição do material estudado. A utilização do espectrorradiômetro para fazer as medições das curvas espectrais permite obter resultados de forma rápida, sem custo elevado e não destrutiva ⁽⁶⁻⁸⁾.

Na área da construção civil verificamos a utilização deste equipamento para diferentes fins. Zahiri et. al. ⁽⁵⁾ utilizaram a caracterização espectral para classificar concretos de acordo com a relação água-cimento e prever a sua densidade. Em estudo realizado por Sridhar et. al. ⁽⁹⁾, foi investigado o efeito de diferentes práticas construtivas nas características espectrais do concreto. Schneider dos Santos



et. al.⁽¹⁰⁾ aplicaram essa técnica para diferenciar a resistência à compressão de materiais cimentícios. No entanto, os materiais suplementares que são incorporados ao cimento não possuem uma caracterização espectral específica.

Em grande parte dos trabalhos que utilizam espectrorradiômetros portáteis o intervalo dos comprimentos de onda dos detectores varia de 0,4 a 2,5 micrômetros (μm). O comprimento de ondas do visível ao infravermelho proximal (VNIR), que corresponde ao intervalo de 0,4 a 1,0 μm , é utilizado para avaliar a presença do íon férrico que é associado a óxidos e hidróxidos. Já o infravermelho de ondas curtas (SWIR), que corresponde ao intervalo de 1,0 a 2,5 μm , indica feições de absorção de hidroxilas e carbonatos ⁽⁶⁾.

Ao analisar o padrão espectral da presença de água em amostras, nota-se características específicas das bandas próximas a 1,4 e 1,9 μm ⁽⁹⁻¹¹⁾. No entanto, a presença de carbonato apresenta suas particularidades principalmente nas bandas próximas a 2,3 μm ^(9,12). Quando há a identificação de ferro na composição, existe uma diferenciação entre autores. A reflectância característica deste material é representada entre 0,6 e 1,1 μm , e centrada aos 0,85 μm ⁽⁹⁾ ou, para outros autores, no comprimento de onda de 0,54 e 0,84 μm , mas essas variações podem ser referentes a diferentes íons férricos analisados ⁽¹³⁾. A presença de caulinita pode ser verificada com absorção dupla na banda referente ao comprimento de onda de 2,2 μm ⁽¹⁴⁾.

Ao falarmos em concreto, as modificações na reflectância características são em 0,45, 1,38 e 1,85 μm ⁽⁹⁾. E a hidratação do concreto pode ser verificada acompanhando as bandas entre 1,4 a 1,5 e 1,85 a 2,15 μm ⁽⁹⁾.

A presença de areia na composição química da amostra aumenta a reflectância total da curva espectral. Isso é justificado pela presença de quartzo, que apresenta alta taxa de reflectância⁽¹⁰⁾. Portanto, a presença de areia composta por quartzo não modifica o comportamento espectral, somente a aumenta a reflectância. Além disso o mineral quartzo apresenta feições diagnósticas nos comprimentos de ondas próximo de 10 μm ⁽¹⁵⁾.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O cimento utilizado para esse estudo foi o cimento Portland V –ARI (CPV). De acordo com a NBR 16697 ⁽¹⁶⁾, é permitido de 0 a 10% de material carbonático neste cimento, não contendo adições pozolânicas. O clínquer (CL), proveniente da cidade de Rio Branco, Acre, também foi empregado no estudo.

Os materiais cimentícios suplementares utilizados foram:

- Cinza volante (CV) proveniente da Usina Termoeletrica de Candiota, localizada a sudeste do Rio Grande do Sul.
- Resíduo de cerâmica vermelha (RCV) originário da cidade de Arroio do Meio, localizada no Vale do Taquari, Rio Grande do Sul. O fabricante informou que o processo de queima dos blocos ocorre em temperatura controlada, de 700 a 750°C. Os resíduos foram secos em estufa a 100 ± 5°C por 24 horas e submetidos a processos de beneficiamento.
- Metacaulim (MK) comercial.
- Fíler calcário calcítico (FC) proveniente de mineradora da região Jacuí Centro, na cidade de Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul.
- Cinza de casca de arroz (CCA) originária da geração de energia em termoeletrica oriunda da cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul.
- Resíduo da lapidação do vidro (RLV) proveniente de uma fábrica de vidros na cidade de Teresina, Piauí.

Os materiais utilizados para esse estudo foram previamente empregados no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio Sinos ⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ e caracterizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, na Universidade do Vale do Rio Sinos (LCVMat). A composição química, realizada através do ensaio de Fluorescência de Raio-X (FRX), está indicada na Tabela 1.



Tabela 1 - Valores de FRX para os materiais em estudo.

Parâmetros	CPV	CL	CV	RCV	MK	FC	CCA
SiO ₂	16,65	18,01	64,70	58,07	50,83	12,67	95,39
Al ₂ O ₃	2,58	4,60	20,97	17,16	37,96	3,59	0,18
Fe ₂ O ₃	4,25	2,81	7,50	16,03	3,22	1,70	0,06
MgO	1,88	7,17	1,28	0,62	0,99	1,09	0,01
P ₂ O ₅	0,09	0,05	ND	0,11	0,24	0,12	0,1
SO ₃	2,12	1,15	0,16	ND	ND	ND	0,57
K ₂ O	1,57	0,93	1,71	1,11	2,66	0,60	1,01
Na ₂ O	1,21	1,69	1,73	0,47	0,12	0,49	ND
CaO	60,92	62,25	1,03	0,56	0,11	44,13	0,33
TiO ₂	0,51	0,21	0,86	2,33	1,16	0,24	0,01
MnO	0,15	0,05	ND	0,26	0,01	0,06	0,2
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	ND	ND	ND	ND	ND
ZnO	0,04	0,04	ND	ND	ND	ND	ND
SrO	0,36	0,10	ND	ND	ND	0,12	ND
PF	7,65	0,92	0,06	3,28	2,72	35,18	2,13

ND – não detectado

PF – perda ao fogo

O resíduo da lapidação do vidro foi caracterizado somente qualitativamente, devido a não existência de um padrão para esse material no laboratório ensaiado. Os elementos que apresentaram quantidade entre 50% a 5% são o Ca e Si e quantidade inferior a 5% são: Sc, S, Fe, K, Al, Sr. Não apresentando elementos majoritários, com quantidade superior a 50%.

2.2. Métodos

A análise das amostras através da técnica da espectroscopia de reflectância foi feita com um espectrorradiômetro de alta resolução SPECTRAL EVOLUTION, modelo SR-3500, que realiza leituras no intervalo de comprimento de ondas do visível ao infravermelho de ondas curtas (0,35 a 2,5µm), registrando os valores de 1019 bandas espectrais. As medições foram feitas nos materiais puros pulverizados, sendo possível assim obter as curvas espectrais com as feições de absorção características de cada amostra.

Utilizou-se aproximadamente 8g de cada amostra para realizar as medições, que foram feitas através de um sensor de contato, que contém uma lâmpada de tungstênio de 5 watts de potência, que é ligado diretamente ao equipamento. As medições foram realizadas conforme a metodologia padrão,



onde se obtém previamente um padrão de referência antes de iniciar as leituras. O equipamento pode ser configurado para que em cada leitura sejam realizadas diversas medidas, tendo como resultado final a médias destas. O tempo da obtenção para cada leitura é de aproximadamente 2 segundos para o aparelho configurado em 30 medidas sucessivas. Foram realizadas três leituras em cada amostra, e a análise final das curvas espectrais é equivalente à média destas três leituras, garantindo assim uma maior confiabilidade nos resultados.

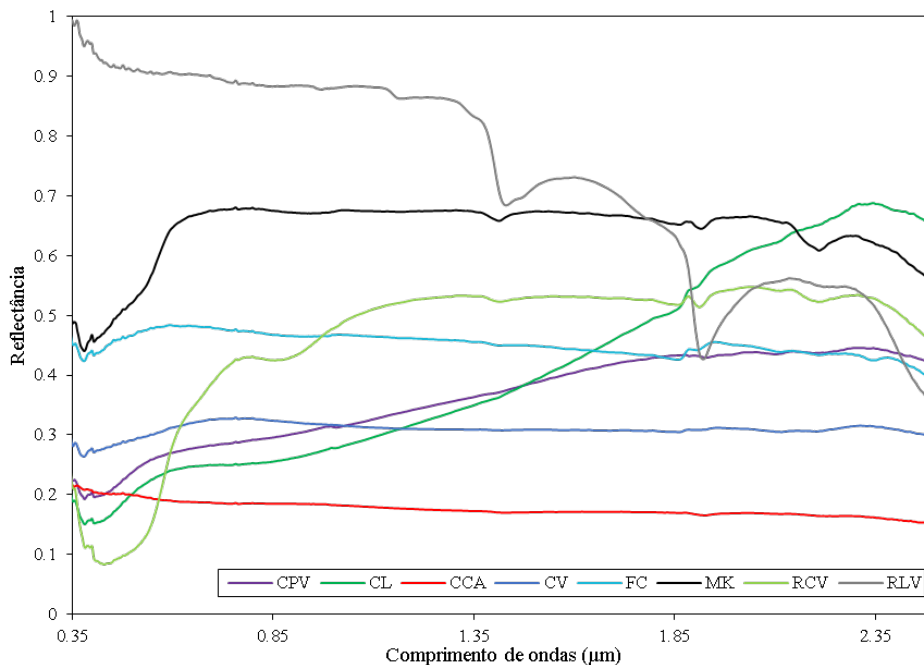
O processamento dos dados utilizando a função de remoção do contínuo, que auxilia nas análises das feições de absorção, foi realizada no software ENVI. As análises gráficas dos dados, que são os valores de comprimento de onda em função da reflectância, para os dados brutos e com remoção do contínuo, foram feitas no software Excel.



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma análise inicial dos resultados e interpretação dos dados espectrais de reflectância, gerou-se gráficos que relacionam os valores de comprimento de onda no intervalo de 0,35 a 2,5 μm e a reflectância para todas as amostras puras e pulverulentas em estudo (Figura 1). Ao observar o padrão espectral dos 8 materiais nota-se variações nas intensidades de reflectância e diferentes feições de absorção para cada material. A reflectância máxima observada foi na amostra do RLV, com reflectância inicial da curva de 100%. Já a amostra com um padrão geral de baixa reflectância é CCA, que também não conta com feições de absorção pronunciadas.

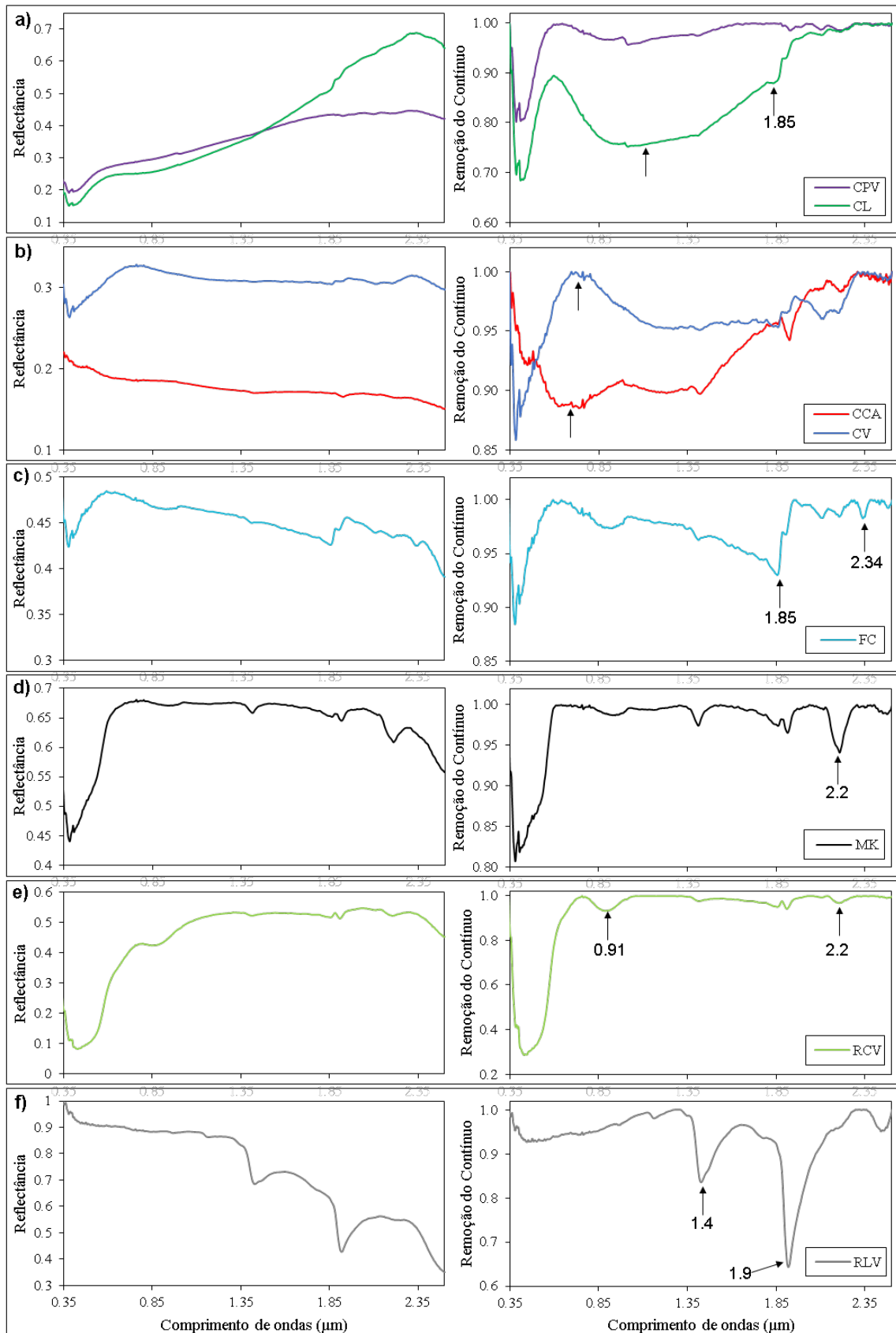
Figura 1 – Curvas espectrais de reflectância dos materiais entre os comprimentos de onda de 0.35 a 2.5 μm .



Buscando uma análise mais detalhada de cada curva e a identificação das feições de absorção que caracterizam cada material, foi feita uma análise individual das curvas, comparando o gráfico sem nenhum processamento (somente a relação entre o comprimento de onda e reflectância) e um gráfico com a remoção do contínuo (Figura 2). O processamento de remoção do contínuo isola as feições de absorção e as coloca em uma mesma escala para que elas possam ser comparadas ^(6,20). Com a remoção do contínuo as feições de absorção ficam em maior evidência, o que facilita identificar a sua posição no comprimento de onda dessas feições e interpretá-las.



Figura 2 – Curvas espectrais de reflectância (esquerda) e de remoção do contínuo (direita) com a identificação das principais feições de absorção. a) CPV e CL. b) CCA e CV. c) FC. d) MK. e) RCV. f) RLV.





Ao observar as curvas espectrais das amostras de CPV e CL (Figura 2a), nota-se que um padrão espectral semelhante até aproximadamente $1,35\mu\text{m}$. Porém, nos comprimentos de onda superior a esse valor, a amostra CL apresentou um aumento da reflectância, chegando a 70%, enquanto a amostra CPV mostra baixas feições de absorção no SWIR. Essa diferença do padrão espectral ficou evidenciado pela remoção do contínuo. Na curva de remoção do contínuo da amostra CL também foi possível identificar a feição de absorção em $1,85\mu\text{m}$, que já foi descrita em amostras de concreto ⁽⁹⁾. A maior diferença composicional para essas amostras está no teor de MgO (Tabela 1), sendo para o CPV 1,88 e para o CL 7,17, portanto, essa diferença composicional pode ter resultado na mudança do comportamento espectral para a amostra de CL.

As duas amostras de cinza CCA e CV (Figura 2b) apresentam baixa reflectância, com reflectância máxima de aproximadamente 35% na amostra CV. As amostras mostram um padrão espectral semelhante nos comprimentos de onda do SWIR. A principal diferença espectral entre os dois materiais é melhor observada na região do VNIR, onde a CCA inicia com uma reflectância superior em $0,35\mu\text{m}$ e decresce em direção ao SWIR. Já a CV possui um aumento de reflectância próximo a $0,85\mu\text{m}$, com um pequeno decréscimo, que continua constante até o SWIR. Essa oposição no padrão espectral no VNIR ficou melhor evidenciado nas curvas com remoção do contínuo.

A amostra FC (Figura 2c) também mostra um aumento da reflectância no visível, que diminui em direção aos comprimentos de onda do SWIR. Uma das feições de absorção diagnósticas está centrada em $1,85\mu\text{m}$, sendo uma feição evidente até mesmo sem a remoção do contínuo, diferente do observado na amostra CL (Figura 2a). Essa feição em $1,85\mu\text{m}$ é observada em concretos ⁽⁹⁾, onde foi descrito o padrão espectral do concreto de maneira geral, portanto observando as feições do FC, pode-se interpretar que essa feição já descrita na literatura pode ser referente ao material suplementar FC. Já a outra feição observada está centrada em $2,34\mu\text{m}$, sendo que as feições presentes nessa região do comprimento de ondas são características de minerais carbonáticos. No geral, as feições de carbonato podem ser distinguidas pela presença de duas feições espectrais proeminentes em torno dos comprimentos de onda $2,5-2,55$ e $2,3-2,35\mu\text{m}$ ^(6,21). A posição entre essas duas feições diagnósticas varia com a composição do carbonato principal, sendo que diversos estudos buscam a posição exata, principalmente de calcita e dolomita, nesses diferentes comprimentos de onda. Gaffey ⁽⁷⁾ considerou como feição característica para calcita as bandas em $2,53$ e $2,33\mu\text{m}$ e para dolomita $2,51$ e $2,31\mu\text{m}$. Como o FC em estudo é calcítico, a feição de absorção se mostrou condizente com o observado na literatura.



A curva espectral do MK (Figura 2d) mostra um aumento da reflectância no visível de aproximadamente 70% que se mantém constante até o SWIR. A feição de absorção diagnóstica com maior expressão está centrada em 2,2 μ m, pode ser relacionada a hidroxilas e o seu posicionamento e profundidade da feição de absorção indica a qual íon essa molécula está relacionada. Segundo Hunt ⁽²²⁾ e Clark & Rouch ⁽²⁰⁾ a absorção nas regiões próximas a 2,2 μ m indicam a presença de argilominerais, como montmorilonitas, illitas e caulinitas. Para o mineral caulinita esperava-se uma feição diagnóstica de absorção dupla e bem pronunciada em 2,2 μ m ⁽²³⁾, porém a curva do MK mostrou uma única feição de absorção. Essa mudança pode ser devido à calcinação da amostra pura de caulim, que, com a calcinação ocorre uma mudança na estrutura cristalina da caulinita, com a perda dos hidróxidos.

A amostra RCV (Figura 2e) mostra um aumento da reflectância em direção ao SWIR, que se mantém constante nos comprimentos de onda superior. No VNIR existe uma feição de absorção diagnóstica centrada em 0,91 μ m e os óxidos de ferro têm características de absorção intensa em comprimentos de onda inferiores a 1,0 μ m ⁽²¹⁾. Ao observar a Tabela 1, nota-se que o material RCV é que o que apresenta o maior teor de Fe₂O₃ dentre as amostras em estudo. Sherman e Waite ⁽²⁴⁾ estudaram as feições diagnósticas que diferenciam esses minerais, como a goetita e a hematita, sendo que a goetita apresenta feições diagnósticas em 0,917, 0,650, 0,480 e 0,435 μ m e, a hematita em 0,885, 0,650, 0,530 e 0,445 μ m. Com isso, o RCV em estudo apresenta em sua composição o goetita. Existe também uma leve feição de absorção em 2,2 μ m que pode estar relacionado ao tipo de argila utilizada na fabricação da cerâmica, como por exemplo montmorilonitas ou illitas.

Já na análise da curva espectral referente ao RLV (Figura 2f), é observada uma alta reflectância, chegando a 100% nas bandas iniciais no visível. Isso é justificado pela elevada presença de sílica na sua composição, assim como quando há a avaliação da presença de areia quartzosa. Outro fator característico desta curva, são os picos bem definidos de água, em 1,4 μ m e 1,9 μ m, que podem ser explicados pela granulometria inferior à fração silte do material, facilitando a absorção de água estrutural. As feições diagnósticas da molécula de água (H₂O) ocorrem na região do SWIR, e a banda de 1,9 μ m indica a presença de água molecular ou estrutural na amostra; muitas vezes essa banda está combinada com a banda de 1,4 μ m, que é característica de hidroxilas (OH) ^(6,14,21,22).



4. CONCLUSÃO

A espectroscopia de reflectância se mostrou uma técnica eficaz de caracterização dos seis materiais cimentícios suplementares e resíduos em estudo. Foi possível identificar o padrão espectral que caracteriza cada um dos materiais, que são distintos entre si. Notou-se também uma diferença no comportamento do CPV e CL, que reflete a diferença composicional entre os materiais.

Para estudos futuros pretende-se analisar os materiais cimentícios suplementares e resíduos provenientes de outras regiões, a fim de buscar possíveis mudanças no padrão espectral devido as diferentes fontes dos materiais. Verificar a interferência no padrão espectral característico de cada material e como isso observar a mudanças espectrais em concretos e derivados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o laboratório VIZLab (Multidisciplinary Advanced Visualization Laboratory) que disponibilizou o espectrorradiômetro e ao LCVMat (Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais) da Unisinos onde foram realizadas as análises de caracterização. FMWT agradece ao CNPq (Processo 311204/2017-1).



5. REFERÊNCIAS

1. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Global Monitoring Division. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global>> Acesso em 03 de Outubro de 2018.
2. ZHANG, C. et. al. Accounting process-related CO₂ emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways. **Journal of Cleaner Production**, v.184, p. 451-465, 2018.
3. WRAY, P. Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO₂ and sustainable development. **American ceramic Society Bulletin**, v. 91, n. 5, p. 47-50, 2011.
4. WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Tecnology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018. 66p.
5. ZAHIRI, Z.; LAEFER D. F.; GOWEN A. The feasibility of short-wave infrared spectrometry in assessing water-to-cement ratio and density of hardened concrete. **Construction and Building Materials**, v.185, p.661-669, 2018.
6. CLARK, R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. **Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing**. New York, p. 3-58, 1999.
7. GAFFEY, S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0,35-2,55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. **American Mineralogist**, v.71, p. 151-162, 1986.
8. JARRAD, R. D.; BERG M. D. V. Sediment mineralogy based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **Geological Society**, London, Special Publications, v.267(1), p. 129-140.
9. SRIDHAR, B. B. M. et. al. Identifying the effects of different construction practices on the spectral characteristics of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.38, p. 538-542, 2008.
10. SCHNEIDER DOS SANTOS R.; ROLIM, S. B. A.; HEPP, F. Application of visible and near infrared spectroscopy in non-destructive evaluation of cement materials. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36:3, p. 917-938, 2015.
11. VENQUIARUTO, S.; BERNARDINO DA SILVA, L.; DAL MOLIN, D. C. C. Influence of preloading-induced microcracking on the durability of concrete produced with different types of cement. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 777-786, 2018.
12. KOTTHAUS, S. et. al. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 94, p. 194-212, 2014.
13. BROOK, A.; BEN-DOR, E. Reflectance spectroscopy as a tool to assess the strength of high-performance concrete in situ. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**, v.2(8), p. 169-188, 2011.
14. CLARK R. C. et. al. High Spectral Resolution reflectance spectroscopy of Minerals. **Journal of Geophysical Research**, v. 95(B8), p. 12,653-12,680, 1990.



15. CLARK, R. N. Reflectance spectra. Handbook of Physical Constants, p. 178-188, 1995.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
17. FERNANDES, A. J. M. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares**, São Leopoldo, 2018. 165p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
18. FRÖHLICH, J. **Estudos de hidratação de cimento composto por argila calcinada e carbonato de cálcio**. São Leopoldo, 2018. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).
19. GUILLANTE P. **Influência da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da reação álcali-agregado**. São Leopoldo, Trabalho de conclusão de curso – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).
20. CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote-sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89(B7), p. 8329-6340, 1984.
21. HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate Minerals. **Modern Geology**, v. 1, p.283-300, 1970.
22. HUNT, G. R. Spectral signatures of particulate minerals in visible and near-infrared. **Transactions-American Geophysical Union**, v. 58(6), p. 553-553, 1977.
23. CLARK, R.N.; et. al. USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.
24. SHERMAN, D. M.; WAITE, T. D. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, v. 70, n. 11–12, p. 1262–1269, 1985.