DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DIELÉTRICA E DA TANGENTE DE PERDA DA PASTA DE CIMENTO EM FREQUENCIAS DE MICROONDAS

Determination of dielectric constant and loss tangent in cement paste at microwave frequencies

PFEIFER, Weila Packer
Faculdade de Tecnologia - UNICAMP

LINTZ, Rosa Cristina Cecche
Faculdade de Tecnologia - UNICAMP

GACHET-BARBOSA, Luisa Andreia
Faculdade de Tecnologia - UNICAMP

BRAVO-ROGER, Leonardo Lorenzo
Faculdade de Tecnologia – UNICAMP

Resumo: O artigo apresenta um estudo experimental que tem como finalidade a determinação da constante dielétrica e da tangente de perda da pasta de cimento. A pasta de cimento é um elemento comum nas construções de alvenaria, seja na argamassa de assentamento ou na composição dos próprios elementos construtivos, como por exemplo, paredes feitas de tijolos de barro, blocos de concreto, placas pré-moldadas, etc, que afetam as comunicações sem fio nos ambientes internos das edificações. Uma análise apurada da redução dos níveis de sinais provocadas por essas barreiras artificiais, foi analisada nesse estudo, onde se utilizou a faixa de frequência de 2,45 GHz (frequência de operação das redes sem fio). O resultado mostra que o método utilizado é apropriado para caracterizar a permissividade de pastas de cimento.

Palavras-chave: pasta de cimento; permissividade; comunicação em interiores.

Abstract: This article shows an experimental study that aims to determine the dielectric constant and the cement paste loss tangent. The cement paste is a common element in masonry construction, whether in the mortar or in the composition of constructive elements, such as walls made of clay bricks, concrete blocks, precast slabs, etc., that affect wireless communications in indoor environments of buildings. An accurate analysis of the reduction of signal levels caused by these artificial barriers has performed in this study, in which a band in the 2.45 GHz range (wireless networks operation frequency) was used. Results show that the perform method is appropriate to characterize the permittivity of cement pastes.

Keywords: Cement paste; Permittivity; indoor communications.

INTRODUÇÃO

A partir de 1990 a necessidade de comunicação instantânea, combinado com o movimento constante do ser humano, levou ao avanço tecnológico especialmente no segmento de telecomunicações, o que resultou no desenvolvimento abrupto de telefones móveis e recursos de conexão e aplicações [1]. Atualmente abundam aplicativos usados em telefones, *laptops*, *tablets* e outros meios de comunicação que permitem a comunicação instantânea via rede sem fio (*wireless*), onde o sinal é transmitido através de radiofrequência, podendo ser atenuado ou bloqueado por vários tipos de barreiras, sendo elas naturais ou artificiais, [2]. Notavelmente, usuários dessa rede percebem que ao passar de um ambiente para outro no interior dos edifícios, o sinal proveniente da rede sem fio que atinge o dispositivo sofre atenuação do sinal, sugerindo que a alvenaria que divide um ambiente do outro está agindo como uma barreira. Já existem estudos que mostram que as paredes construídas com tijolos furados apresentam menor absorção do sinal em comparação com paredes de tijolos sólidos [3].

Desenvolvimentos mais recentes têm utilizado do sistema Steel Frame (paredes de placas de cimento), reduzindo o tempo de execução, o trabalho e a geração de resíduos [4-5]. A pasta de cimento é a base para a fabricação de produtos de construção civil. Sendo assim, este artigo contribui para a caracterização experimental eletromagnética da pasta de cimento, o que permitirá estudar o efeito das paredes internas feitas desse material sobre as ondas de radiofrequência na banda utilizada pelas redes sem fio (frequência central de 2,45 GHz).

Utilizando a técnica da cavidade cilíndrica ressonante perturbada [8], esse dispositivo foi projetado e construído para medir os parâmetros dielétricos de amostras de pasta de cimento. Para tornar possível essa medição e análise, inicialmente foi realizada a medição de frequência de ressonância da cavidade vazia. Em seguida, uma amostra de material foi colocada no centro da cavidade, e novamente foi medida a frequência de ressonância, agora com a cavidade perturbada (como se costuma dizer). De posse dos valores da frequência de ressonância e do volume da amostra é calculada a constante dielétrica, enquanto que a tangente de perda é calculada a partir do fator de qualidade com e sem

amostra. A amostra trabalhada/analisada nesse artigo foi fabricada sob a forma de um cilindro.

A parte real e imaginária da permissividade pode então ser calculada a partir da mudança na frequência de ressonância e o fator de qualidade. O restante do artigo foi organizado da seguinte forma: a Seção 2 explica a análise teórica para a determinação da constante dielétrica e da tangente de perda; a Seção 3 descreve os procedimentos de fabricação e preparação de amostras; os resultados teóricos e experimentais para a pasta de cimento são apresentados na Seção 4 e nessa mesma seção se apresentam as medições realizadas para uma amostra de Teflon, de características conhecidas, com o objetivo de validar o experimento; as observações finais deste trabalho são descritas na Seção 5.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O método da cavidade ressonante é amplamente utilizado na medição da constante dielétrica e da tangente de perdas dos materiais [6]. A ideia básica da cavidade é a mudança na configuração geral geométrica dos campos eletromagnéticos com a inserção de uma amostra que deve ser pequena. As seguintes equações possibilitam os cálculos teóricos da frequência de ressonância, f_c da cavidade cilíndrica, para modo TM_{010} [7]:

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi}\left[\left(\frac{x_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{H\ \pi}{d}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (1)$$

Onde: f_{nml} é a frequência de ressonância da cavidade no modo *nml*, *c* é a velocidade da luz, X_{nm} é a raiz da função Bessel (utiliza-se a raiz de primeira ordem), *a* é o raio da cavidade cilíndrica, *d* é a profundidade da cavidade e por último, *H* é a altura total da cavidade.

Através da inserção de uma amostra simetricamente na região de campo elétrico máximo dentro da cavidade, as partes real e imaginária da permissividade relativa complexa, são calculadas por [7]:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{V}{2v}\left(\frac{f_1 - f_2}{f_2}\right) \qquad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V}{4v}\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2}\right) \qquad (3)$$

Onde, f_1 é a frequência de ressonância da cavidade em vazio, f_2 é a frequência de ressonância da cavidade perturbada com o espécime, Q_1 e Q_2 são os fatores de qualidade da cavidade, sem e com amostra em seu interior, respectivamente; e finalmente, V e v são os volumes de cavidade e a da amostra, respectivamente. O fator de qualidade, Q em ambos os casos é determinado através da medição da frequência de ressonância (f_0) e da largura de banda de meia potência Δf_{3dB}, pela equação seguinte:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta_{f_{3dB}}} \qquad (4)$$

A tangente de perda (*tan δ*) pode ser calculada por:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \qquad (5)$$

PROCESSO DE FABRICAÇÃO E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A. *FABRICAÇÃO DA CAVIDADE CILINDRICA*

Para realizar o ensaio é necessário, inicialmente, dimensionar a cavidade para receber o material a ser testado. Esta cavidade deve ser feita de material metálico para evitar que as ondas de radiofrequência saiam da cavidade para o exterior da mesma. A cavidade pode ser feita de materiais metálicos, tais como latão ou alumínio.

A equação (1) foi utilizada para conceber a cavidade, tendo sido calculados tanto o diâmetro interno quanto a profundidade da cavidade para a gama de frequências pretendida. A frequência utilizada para o cálculo do diâmetro interno foi de 2,45 GHz, o que resultou em a = 48 mm, d = 54 mm, H = 62 mm e um volume interno V = 520,888.32 mm^3. A Fig.1 mostra a cavidade cilíndrica fabricada.



FIG. 1 A CAVIDADE CILÍNDRICA FABRICADA.

FONTE: AUTORES.

A radiofrequência foi excitada no interior da cavidade utilizando-se o excitador mostrado na Fig. 2, inserido no centro da tampa superior da cavidade. O conector SMA fêmea, permite ligar o excitador ao Analisador Vetorial de Rede, através de um cabo coaxial. Tendo as dimensões apropriadas da cavidade para trabalhar com a frequência de redes sem fio, o software HFSS foi utilizado para otimizar o comprimento do excitador da cavidade e o tamanho correto das amostras a serem testadas. Com base em simulações foi definido como 8,5 mm o melhor comprimento para o excitador.



FIG. 2 CONECTOR SMA FÊMEA COM O EXCITADOR DE RADIOFREQUÊNCIA SOLDADO.

FONTE: AUTORES

B. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a fabricação das amostras de pasta de cimento, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (CPV- ARI), cujas características físicas, químicas e propriedades mecânicas cumprem as exigências da norma NBR 5733:1991, e a densidade é 3,08 (g/cm^3), testado de acordo com a norma NBR NM 23:2001. A composição do CPV - ARI é dada por 95% a 100% de clínquer e gesso, com adição de uma percentagem de até 5% de enchimento calcário. Este cimento é mais fino na

sua composição do que o CP – III, devido à diferença de dosagem do calcário e da argila na produção do clínquer, e ao processo de moagem.

Esta produção resulta em propriedades de alta resistência nos primeiros dias após a aplicação, e também por esta razão, é amplamente utilizada em pesquisa tecnológica que precisa de resultados rápidos e de alta resistência para rápida aplicação no mercado. Outros dados e exigências físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI são mostrados na Tabela I, enquanto que os requisitos químicos são apresentados na Tabela II.

TABELA I. REQUISITOS FÍSICOS DO CIMENTO CPV-ARI

Finura		**Tempo de Pega**		**Expansividade**		**Resistência à Compressão**			
Resíduo na peneira 75mm (%)	Área especifica (m^2/kg)	Início (h)	Fim (h)	Frio (mm)	Quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-

FONTE: ADAPTADO DE [2].

TABELA II. REQUISITOS QUÍMICOS DO CIMENTO CPV-ARI

Resíduo insolúvel (%)	**Perda Inicial (%)**	**MgO (%)**	**SO_3 (%)**	**CO_2 (%)**	**S (%)**
≤ 1.0	≤ 4.5	≤ 6.5	≤ 3.5 ≤ 4.5(*)	≤ 3.0	-

(*)SO_3 É IGUAL A 3.5% QUANDO $C_3A \leqslant$ 8.0 E 4.5% QUANDO $C_3A \geqslant$ 8.0%

FONTE: ADAPTADO DE [2].

Nas simulações, foram trabalhadas amostras com dimensões que variam de 30 mm de diâmetro por 30mm de altura até 6mm de diâmetro por 10mm de altura, definindo-se assim que o tamanho apropriado a ser adotado para as amostras a serem fabricadas é de 6 mm de diâmetro x 10 mm de altura. Para a fabricação da

amostra de pasta de cimento foram utilizados os critérios e regulamentos [1] com uma relação água/cimento de 0,4. Devido à necessidade de uma fabricação de amostras em uma escala reduzida, inferior às menores amostras normatizadas que são de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, todos os materiais e moldes foram adaptados. Neste caso, foram usados para moldes tubos de plástico das dimensões requeridas.

Entre os corpos produzidos foi escolhido o de melhor acabamento superficial para os ensaios de RF, conforme mostra a Fig. 3a. Uma amostra das mesmas dimensões foi fabricada em Teflon conforme a Fig.3b.Como a tangente de perda e a constante dielétrica do Teflon são já conhecidos [4] conforme apresentado na linha cinco da Tabela III, essa amostra de teflon foi usada como referência para a validação dos testes.



(a) amostra de pasta de cimento usada para ensaio em RF.



(b) amostra de Teflon usada para ensaio em RF.

FIG. 3 AMOSTRAS DE CIMENTO E TEFLON

FONTE: AUTORES

TABELA III. CARACTERÍSTICAS DOS PARÂMETROS DIELÉTRICOS DOS MATERIAIS EM FREQUÊNCIA DE 2.45 GHZ.

Material	Constante Dielétrica	Tangente de perda
Alumina	9	0.0006
Concrete (dry)	4.5	0.0111
Quartz	4	0.0001
Nylon	2.4	0.0083
Teflon	2.1	0.0003
Wood	1 – 2.5	0.004

FONTE: ADAPTADO DE [4].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Analisador Vetorial de Redes, *Agilent Technologies E5071C*, foi calibrado para funcionar na gama de frequência das redes sem fio. Notou-se a necessidade de secagem com ar quente, tanto da cavidade quanto das amostras, para evitar que a umidade causasse imprecisão nas medições. O primeiro teste foi realizado com a cavidade vazia, seguido de um teste com uma amostra de teflon centralizada no interior da cavidade. A Fig. 4 mostra a cavidade de ressonância cilíndrica ligada ao analisador de redes.



FIG. 4 ANALISADOR DE REDE COM CABO COAXIAL LIGADO À CAVIDADE RESSONANTE CILÍNDRICA

FONTE: AUTORES

Os resultados das medições com amostras de Teflon coincidiram com os valores esperados de acordo com a Tabela I. Isso significa que o método de medição da cavidade de ressonância foi validado para amostras nessas dimensões e na frequência de 2,45GHz. Sendo assim, a amostra de Teflon foi substituída pela amostra de pasta de cimento. Com os valores centrais de frequência de ressonância, as perdas de retorno em dB, e os valores de frequência obtidos nos pontos de 3dB da cavidade em vazio, relacionados com os mesmos valores da cavidade perturbada (valores estes obtidos através do ensaio com o Analisador de Redes ligado à cavidade ressonante), tornou-se possível calcular a constante dielétrica e a tangente de perda para cada amostra, utilizando-se (2), (3) e (4), tal como descrito em [6].

A frequência central de ressonância da cavidade em vazio resultou na gama de 2.3769694 GHz e a perda de retorno na ordem de -21,3 dB. As frequências dos pontos de 3 dB foram 2,376561GHz e 2,372876 GHz, como mostra a Fig. 7. Ao

perturbar a cavidade com a amostra de Teflon, a nova frequência central de ressonância foi de 2,37 GHz, com uma perda de retorno de -19,5 dB e as frequências nos pontos de 3dB foram 2,3742689 GHz e 2,3749010 GHz, conforme mostrado na Fig. 8. A aplicação dos valores obtidos nos ensaios, conforme ilustram as Fig. 7 e 8, em (2), (3) e (4) permite obter os valores ilustrados na coluna central da Tabela IV. Comparando-se esses resultados com os valores de referência oferecidos na coluna central da Tabela III, observa-se uma correspondência satisfatória das medições do Teflon. Isso permitiu a validação do método, tornando confiáveis os resultados obtidos para a amostra de pasta de cimento que são oferecidos na última coluna da Tabela IV.

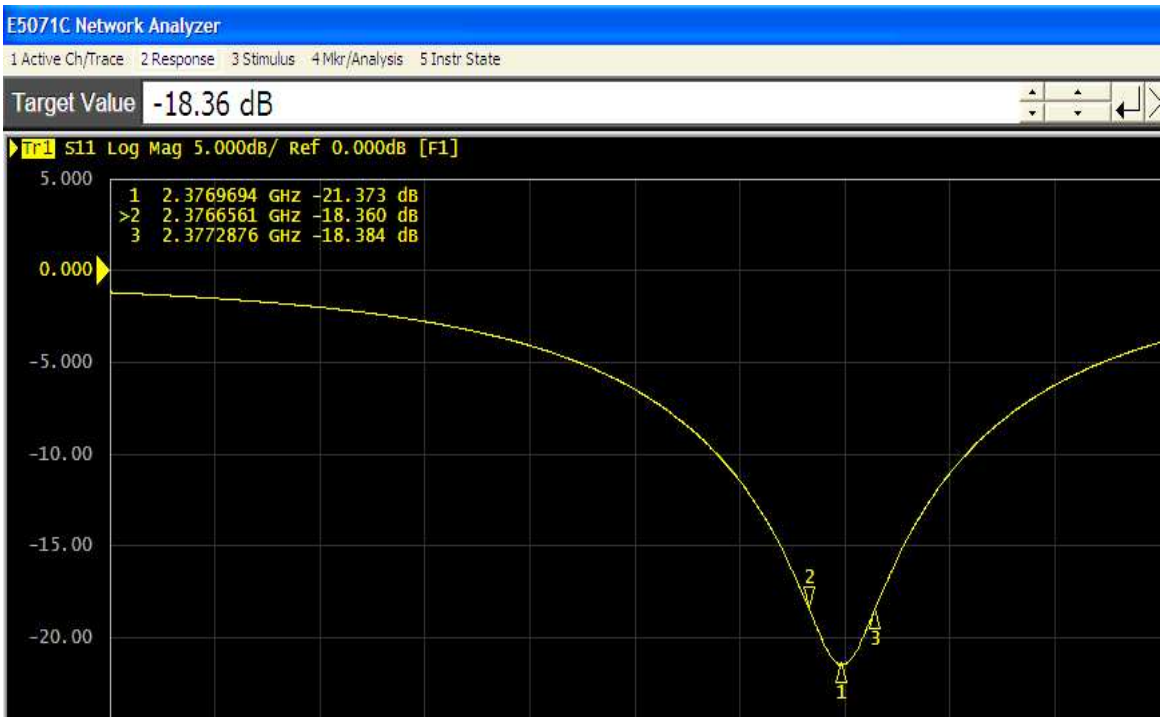

FIG. 7 – GRÁFICO DA CAVIDADE RESSONANTE ANALISADA EM VAZIO, OBTIDA NO ANALISADOR DE REDES.

FONTE: AUTORES.

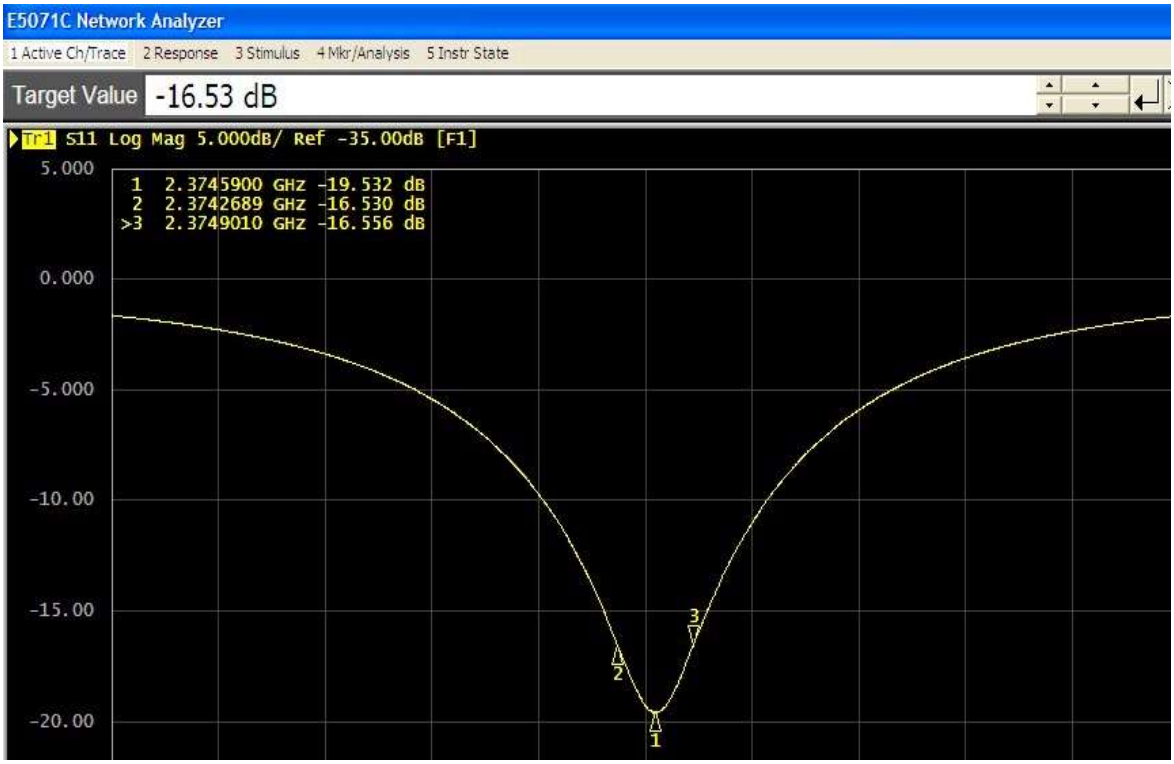

FIG. 8 - GRÁFICO DE FREQUÊNCIAS DO ENSAIO DA CAVIDADE DE RESSONÂNCIA COM A AMOSTRA DE TEFLON OBTIDA NO ANALISADOR DE REDES.

FONTE: AUTORES.

TABELA IV – VALORES DAS CONSTANTES DIELÉTRICAS E TANGENTE DE PERDA CALCULADO COM OS VALORES MEDIDOS.

Descrição do corpo de prova	**Teflon**	**Pasta de Cimento**
(v) Volume do Corpo de Prova em mm^3	282.6	263.195159
V/v	2092.653451	1979.095368
Cálculo do Fator de Qualidade	3756.668249	891.1821711
ε' (Constante Dielétrica)	2.048446179	6.299965269
ε"	j0.000271463	j0.423739458
Tangente de Perda	0.000132521	0.067260602

CONCLUSÃO

Conseguiu-se com sucesso, dimensionar o tamanho adequado de amostras de pasta de cimento que permitiram utilizar o método da cavidade para obter uma caracterização eletromagnética desse material na banda de radiofrequência utilizadas pelas redes sem fio, instaladas nos interiores dos edifícios. As dimensões apropriadas tanto das amostras como da cavidade foram determinadas por meio de simulações, utilizando o simulador eletromagnético de alto desempenho, HFSS versão 15.0. Observou-se que as dimensões das amostras, para serem compatíveis com a utilização do método de caracterização da cavidade, implicaram na necessidade de fabricar amostras de pasta de cimento em escalas muito pequenas, se comparadas com as dimensões e escalas trabalhadas usualmente na construção civil. O resultado mostra que a constante dieléctrica do material pode ser obtida com precisão através da cavidade projetada. Com a caracterização da pasta de cimento em radiofrequência é possível agora quantificar a atenuação experimentada pelo sinal de radiofrequência quando atravessa paredes construídas com esse material. Ao mesmo tempo, abre-se um leque de oportunidades de pesquisa visando possíveis novos produtos da construção civil que provoquem menor impacto sobre as ondas de rádio frequência *wireless* (popularmente conhecidas por WiFi), melhorando-se assim a qualidade da comunicação no interior dos edifícios.

1.1.1.1.1

1.1.1.1.2 REFERENCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. ABNT NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistencia a compressão. Rio de Janeiro, 1997.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND (ABCP). Guia Basico de Fabricação do Cimento Portland. Dezembro, 2002 – São Paulo, SP.

[3] Agilent E5071C ENA Network Analyzer, Agilent Technologies, Inc. 2013 – 2014 Published in USA, Março 5, 2014. http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5478EN.pdf.

[4] ETERPLAC, Catalogo Técnico de fabricação de placas de cimento, São Paulo, 2010. http://www.eternit.com.br/userfiles/ETERPLAC_final%20060110.pdf.

[5] GALLO, Michael A.; HANCOCK, W. M.: Comunicação de computador e Tecnologia de Rede, São Paulo, 2003

[6] A. Kumar and S. Sharma, “Measuriment of dieletric constant and loss factor of the dielectric material at microwave frequencies”, *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, nº 69, pp.47–54, 2007.

[7] R. E. Collin, “Foundations for Microwave Enginneering”, 2ª nd, McGraw-Hill, 1992

[8] OLIVEIRA, Jesiel A.; PINHO, João T. Medição da Permissividade Elétrica de Produtos Naturais, 2002. Anais do Simpósio Brasileiro de Microondas e Otica – Grupo de Estudos e Departamento de Engenharias Alternativas / Universidade Federal do Pará, Belém, 2002. http://www.ufpa.br/gedae/SBMO2002_02.PDF

[9] PELLEGRINI, Alberto L. M. Análise de propagação de sinais de Rádio Frequência em redes wireless utilizando cabos irradiantes com configurações diferentes em ambiente indoor, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação, Universidade de Brasília ; Brasília, DF, 2010.

[10] SILVA, Anderson Porto; SOARES, Bruno Tarouco. A. Wi-Fi e WiMAX. I: As tecnologias de Rede Sem Fio, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2009.

Mini Curriculum dos autores:

W. P. Pfeifer Doutoranda em Tecnologia e Inovação em sistemas de comunicação pela Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, tendo recebido o titulo de Mestre em Tecnologia e Inovação em 2014 pela Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, e o titulo de Tecnologa em Construção Civil pelo Centro Superior de Ensino Tecnologico da UNICAMP em 2006.

Weila.pfeifer@pos.ft.unicmap.br
(19) 2113-3487

R. C. C. Lintz. Possui Graduação pela FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (1994), mestrado em CIENCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS pela Universidade de São Paulo (1997) e doutorado em Materiais e Processos Fabricação pela UNICAMP (2003). Atualmente é professor Pleno da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. Tem experiência na área de Construção Civil, com ênfase em Engenharia Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: desenho, reaproveitamento de materiais alternativos em compósitos e elementos de alvenaria, concreto elevado desempenho, dosagem de concreto, estruturas de concreto.

rosacclintz@ft.unicamp.br

L. A. Gachet-Barbosa. Possui Graduação em Tecnologia Sanitária pelo Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) da UNICAMP (1990), e também graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de Piracicaba (1993), mestrado em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas, pela Universidade Estadual de Campinas-FEC/UNICAMP (1997) e doutorado em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- POLI/USP (2002). Atualmente é professor MS-3 da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP) e Coordenador do curso de Graduação de Tecnologia da Construção Civil. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia de Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: estruturas de concreto armado, concreto armado, concreto de alta resistência, concreto auto adensável, materiais de construção, reciclagem de materiais e sustentabilidade.

gachet@ft.unicamp.br

L. L. Bravo-Roger recebeu o B. S. e M.Sc. em Sistemas de Telecomunicações na Universidade de Oriente (UO), Santiago de Cuba, em 1985 e 1998, respectivamente, e o Ph.D. em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, em 2003. Desde 2004, ele está com Escola Superior de Tecnologia da UNICAMP, Limeira, São Paulo, Brasil. Suas atividades de pesquisa estão nas áreas de tecnologias de RF, microondas, sistemas de detecção de Radar e Redes de Sensores Sem Fio.

leobravo@ft.unicamp.br