

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

Weila Packer Pfeifer

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE PASTA DE CIMENTO E DE
RESÍDUO DE BORRACHA**

Limeira, 2014

Weila Packer Pfeifer

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE PASTA DE CIMENTO E DE
RESÍDUO DE BORRACHA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia e Inovação

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Rosa Cristina Cecche Lintz

Co-Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Luisa Andréia Gachet Barbosa

Limeira, 2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Silvana Moreira da Silva Soares - CRB 8/3965

P476c Pfeifer, Weila Packer, 1981-
Caracterização eletromagnética de pasta de cimento e de resíduo de borracha / Weila Packer Pfeifer. – Limeira, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.
Coorientador: Luisa Andréia Gachet Barbosa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Concreto. 2. Radiofrequência. 3. Resíduos. I. Lintz, Rosa Cristina Cecche, 1971-. II. Barbosa, Luisa Andréia Gachet, 1970-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Electromagnetic characteristics of cement paste and waste rubber

Palavras-chave em inglês:

Concrete

Radiofrequency

Waste

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestra em Tecnologia

Banca examinadora:

Rosa Cristina Cecche Lintz [Orientador]

Leonardo Lorenzo Bravo Roger

Carlos Roberto dos Santos

Data de defesa: 15-08-2014

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE PASTA DE CIMENTO E DE RESÍDUO
DE BORRACHA**

Weila Packer Pfeifer

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz
UNICAMP/FT
Presidente



Prof. Dr. Leonardo Lorenzo Bravo Roger
UNICAMP/FT



Prof. Dr. Carlos Roberto dos Santos
CETESB

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Leonardo Lorenzo Bravo Roger que muito contribuiu para meu conhecimento e desenvolvimento dos ensaios em radiofrequência, sempre me auxiliando e se fazendo presente para que eu conseguisse ter todo suporte no desenvolvimento de meu mestrado interdisciplinar.

Agradeço a minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Rosa Cristina Cecche Lintz e co-orientadora Prof^ª. Dr^ª. Luisa Andréia Gachet Barbosa que sempre se mostraram confiantes em meu trabalho, me incentivando e não medindo esforços para revisar meus textos e me orientar.

Agradeço também ao Prof. Dr. André Franceschi de Angelis que desde a minha graduação sempre me incentivou a ingressar na carreira acadêmica.

Agradeço aos técnicos do laboratório da Faculdade de Tecnologia (FT) Emerson Verzegnassi e Reginaldo Ferreira, que me deram todo o suporte técnico para a fabricação dos corpos de prova e realização dos ensaios de compressão dos mesmos.

Agradeço as secretárias da pós-graduação Fátima Aparecida Alves e Karen Tank Mercuri Macedo, que sempre com simpatia nos atendem e nos instruem quanto as inúmeras documentações necessárias a cada etapa como aluna da pós graduação.

Agradeço aos estudantes de mestrato em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC) Manuel Antonio García López e Oscar Enrique Llerena Castro, que muito me auxiliaram na utilização e aprendizado do software HFSS utilizado para as simulações apresentadas nesse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a execução desse estudo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de incineração de pneus inservíveis.	18
Figura 2 - Evolução da Resistência à compressão de cada tipo de cimento Portland.	26
Figura 3 - <i>Aplicações do Sistema de Steel Frame em construções (paredes internas e externas)</i> 31	
Figura 4 - Sequência da produção de placas e ensaios de flexão.	33
Figura 5 - Esquema de conexão utilizada para ensaio de permissividade.	37
Figura 6 - Esquema de conexão utilizada para ensaio de permissividade.	38
Figura 7 - Gráfico da Frequência de Ressonância, com ilustração da frequência central e da frequência nos pontos de -3 dB.	40
Figura 8 – Esquema representativo da primeira parte das atividades experimentais da pesquisa.	42
Figura 9 – Esquema representativo da segunda parte das atividades experimentais da pesquisa.	43
Figura 10 - Corpo da cavidade com as furações laterais em ambos os lados.	44
Figura 11 - Tampa inferior com furações laterais sem rosca.	45
Figura 12 - Tampa superior com furações laterais sem rosca e furação ao centro para o conector SMA.	45
Figura 13 - Conector SMA.	45
Figura 14 - Vista interna do primeiro conector fixado na tampa superior da cavidade.	46
Figura 15 - Vista interna do Segundo conector fixado na tampa superior da cavidade.	46
Figura 16 - Vista superior da cavidade concluída para início da validação.	47
Figura 17 - Cavidade desenhada em 3D no software HFSS.	48
Figura 18 - Ajuste da faixa de frequência na qual o software trabalhou.	48
Figura 19 - <i>Gráfico resultante da simulação com antenas de 3 mm de comprimento, na faixa de frequência de 3,08 a 3,15 GHz.</i>	49
Figura 20 - Conexão da cavidade ao equipamento HP8517.	49
Figura 21 - Análise da cavidade em vazio, gráfico da frequência central.	50
Figura 22 - Corpos de Prova para validar a cavidade com perturbação.	51
Figura 23 - Corpo de prova disposto no centro da cavidade.	51
Figura 24 - Cavidade perturbada com o corpo de prova de pasta de cimento de ambas as alturas.	52
Figura 25 - Pasta de cimento com traço de 1:0,5.	53
Figura 26 - Molde de alumínio.	53
Figura 27 - Molde de canudo plástico.	53
Figura 28 - Corpos de prova provenientes do molde de alumínio.	53
Figura 29 - Corpos de prova provenientes do molde de plástico.	53
Figura 30 - Ensaio na cavidade em vazio conectado ao analisador de redes Agilent Techniligies E5071C.	54
Figura 31 - Corpo de prova no centro da cavidade.	54
Figura 32 - <i>Análise da ressonância com a cavidade em vazio.</i>	55
Figura 33 - Análise da ressonância com o corpo de prova no centro da cavidade.	55
Figura 34 - Ensaio de Massa Específica do cimento CPV-ARI.	57
Figura 35 - Ensaio de Massa Específica do resíduo de borracha.	57
Figura 36 - Granulometria do Resíduo de Borracha.	58
Figura 37 - Corpos de prova de pasta de cimento sem e com resíduo de borracha para a realização do ensaio de compressão.	59

Figura 38 - Corpos de prova de pasta de cimento a ser ensaiado quanto à radiofrequência.	59
Figura 39 - Corpo de Prova de Borracha.....	59
Figura 40 - Novo Sistema de Fixação do Conector na Tampa da Cavidade.....	62
Figura 41 - Conector SMA Fêmea com prolongação da antena.	62
Figura 42 - Cavidade com o interior isento de ranhuras e riscos.	62
Figura 43 - Gráfico da Frequência da Ressonância da cavidade em vazio simulada no HFSS. ...	63
Figura 44 - Gráfico da Frequência da Ressonância da cavidade em vazio ensaiada com o analisador de redes E5071.	63
Figura 45 - Corpo de prova de Teflon ensaiado como elemento de referência.....	65
Figura 46 - Gráfico do ensaio de frequência da ressonância da cavidade com o corpo de prova de Teflon utilizando o analisador de redes E5071.	65
Figura 47 - Corpo de Prova de Pasta de Cimento dentro da cavidade	67
Figura 48 - Corpo de Prova de Borracha dentro da cavidade.	67
Figura 49 - Ensaio do Corpo de Prova de Pasta de Cimento.	67
Figura 50 - Ensaio do Corpo de Prova de borracha.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das borrachas de pneu.....	16
Tabela 2 - Calor de hidratação dos compostos puros (J/g).....	22
Tabela 3 - Nomenclatura dos Cimentos Portland e classe de resistência.....	25
Tabela 4 - Resistência à Compressão de alguns cimentos no Brasil.....	29
Tabela 5 - Ensaio de resistência à compressão com os corpos de prova sem e com resíduo de borracha aos 7 e 28 dias.....	60
Tabela 6 - Parâmetros característicos de materiais dielétricos a uma frequência de 2,45 GHz. ..	64
Tabela 7 - Valores de Constante Dielétrica e Tangente de Perda para o Teflon por meio de cálculo com os valores medidos.....	66
Tabela 8 - Parâmetros característicos de materiais dielétricos a uma frequência de 2,45 GHz. ..	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 O HISTÓRICO DA BORRACHA TENDO COMO ORIGEM O PNEU	16
3.1.1 PNEU INSERVÍVEL, DESCARTE E RESÍDUO DE BORRACHA	17
3.2 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DA PASTA DE CIMENTO.....	19
3.2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	21
3.2.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO.....	22
3.2.3 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO DA PASTA.....	23
3.2.4 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	23
3.2.5 DENSIDADE, FINURA E RESISTÊNCIA	26
3.3 CONCEITO GERAL DE ARGAMASSA DE CIMENTO.....	27
3.4 CONCEITO GERAL DE CONCRETO DE CIMENTO	28
3.5 PLACAS CIMENTÍCIAS	29
3.6 O USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU EM COMPÓSITOS DE CIMENTO	31
3.7 REDES WIRELESS	34
3.7.1 PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA	35
3.7.2 ENSAIOS REALIZADOS COM <i>WIRELESS</i> EM CONCRETO	36
3.7.3 DIMENSIONAMENTO DA CAVIDADE PARA ENSAIO DE RADIOFREQUÊNCIA	38
3.7.4 CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA TANGENTE DE PERDA	39
4. PARTE EXPERIMENTAL.....	42
4.1 CONSTRUÇÕES DA CAVIDADE RESSONANTE.....	44
4.2 SIMULAÇÕES E ENSAIOS PRÁTICOS COM A CAVIDADE EM VAZIO.....	47
4.3 ENSAIOS PRÁTICOS COM A CAVIDADE PERTURBADA	51
4.4 REDIMENSIONAMENTO DA CAVIDADE PARA TRABALHO EM FREQUÊNCIA DE <i>WI-FI</i> E FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	56
4.4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	60
4.4.2 ENSAIOS DE RADIOFREQUÊNCIA	61
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

RESUMO

O crescente desenvolvimento tecnológico e a necessidade de comunicação entre as pessoas tem intensificado o aumento do número de equipamentos que se comunicam por meio de redes sem fio (*wireless*). As construções de alvenaria, ou seja, de paredes feitas de tijolos cerâmicos, blocos de concreto ou placas cimentícias são algumas das barreiras artificiais que podem influenciar na queda ou diminuição do sinal dessas redes, dificultando a comunicação entre os usuários de redes sem fio. A construção civil tem utilizado resíduos de diferentes naturezas para a produção de concretos e argamassas, tais como resíduos de construção e demolição, pó de mármore, pó de granito e de outras rochas, isoladores de porcelana para redes alta tensão, borracha, resíduos de lodo provenientes das Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) como uma alternativa tecnicamente viável, tentando minimizar o consumo de materiais naturais e evitar a disposição inadequada dos resíduos no meio ambiente. Conciliando as necessidades tecnológicas e ambientais, esse trabalho objetiva estudar as características da pasta de cimento e do resíduo de borracha quanto à permissividade de ondas de radiofrequência. Visa-se com isso propor ao mercado a incorporação desse resíduo à fabricação de placas cimentícias ou divisórias, de modo que essas atenuem o mínimo possível às ondas de radiofrequência das redes de *wireless*. Para tanto, foram caracterizados fisicamente o cimento e a borracha e moldados corpos de prova de pastas de cimento sem e com adição de borracha as quais foram ensaiadas à compressão. Amostras de pastas de cimento e amostras de resíduos de borracha foram caracterizadas quanto à permissividade de ondas de radiofrequência, utilizando equipamento analisador de redes e cavidade ressonante na faixa de frequência de 2,45 GHz que representa a faixa de frequência de utilização do *wireless*. Quanto aos resultados de compressão observa-se que se confirma a relação inversa entre o teor crescente de água/cimento e de borracha com a resistência à compressão. Quanto aos ensaios de radiofrequência, nota-se o aumento da tangente de perda para a pasta de cimento em relação ao resíduo de borracha, consequentemente a pasta de cimento possui uma menor permissividade das ondas de *wireless*. Para os ensaios de radiofrequência foi necessário desenvolver uma nova metodologia, adaptando para escalas reduzidas as exigências da Norma Técnica Brasileira para a fabricação de corpos de prova.

Palavras chave: Concreto; Radiofrequência, Resíduos.

ABSTRACT

The increasing technological development and the need for communication between people has intensified the increasing number of devices that communicate through wireless networks (wireless). The masonry buildings, ie walls made of clay bricks, concrete blocks or cement slabs are some of the artificial barriers that can influence the fall or decrease the signal of these networks, hindering communication between users of wireless networks. The construction industry has used different kinds of waste for the production of concrete and mortar, such as construction and demolition waste, marble dust, granite dust and other rocks, porcelain insulators for high voltage networks, rubber, waste sludge from the Water Treatment Plants (WTP) and Sewage Treatment Plant (STP) as a technically viable alternative, trying to minimize the consumption of natural materials and avoid improper disposal of waste on the environment. Combining the technological and environmental needs, this work aims to study the characteristics of the cement paste and rubber residue as the permissiveness of radiofrequency waves. The aim is to propose it to the market to include this residue for the manufacture of cement slabs or partitions, so that these can attenuate the minimum radiofrequency waves to wireless networks. For that were physically characterized the cement and rubber and molded specimens of cement pastes with and without addition of rubber which were tested in compression. Samples of cement pastes and rubber waste samples were characterized as the permissiveness of radiofrequency waves, using network analyzer equipment and resonant cavity in the frequency band of 2.45 GHz that represents the range of the wireless frequency usage. Regarding the compression results it can be seen that confirms the inverse relationship between increasing water content / rubber cement and the compressive strength. For the tests, radio frequency, note the increase of loss tangent for the cement paste relative to residue of rubber, consequently the cement paste has a lower permittivity of the wireless waves. For testing radio frequency was necessary to develop a new methodology, adapting to the requirements of small scales Brazilian Technical Standard for the manufacture of test specimens.

Keywords: Concrete; Radiofrequency; Waste.

1. INTRODUÇÃO

Na década de 1980 e meados de 1990 a melhor forma de comunicação entre duas pessoas era via telefone fixo. Para isso, era necessário estarem em um ambiente onde houvesse linha telefônica, como residência, trabalho, ou utilizar-se de telefones públicos. Porém a necessidade de comunicação instantânea, somada a constante movimentação do ser humano levou ao avanço tecnológico e em especial do segmento de telecomunicação, chegando rapidamente aos telefones móveis que evoluíram de forma abrupta seus recursos de conexão e aplicativos (GALLO e HANCOCK, 2003).

De acordo com Silva e Soares (2009), são diversos os meios e formas de comunicação, tais como celulares, *notebooks*, *tablets*, entre outros, e todos com aplicativos que possibilitam as comunicações instantâneas através de rede sem fio (*wireless*). Essa rede transmite o sinal através de radiofrequência, onde o sinal encontra diversos obstáculos capazes de interferi-lo, atenuá-lo e até mesmo barrá-lo.

Um problema identificado por usuários dessa rede é a atenuação do sinal ou até mesmo a perda dele dentro da mesma residência ao passar de um cômodo para o outro. Ou seja, o aparelho que está há alguns cômodos do roteador recebe o sinal com baixa intensidade ou até mesmo não o recebe devido as paredes funcionarem como atenuadores e/ou barreiras. Paredes construídas de tijolos furados promovem uma menor absorção de sinal se comparada com paredes de tijolos maciços ou de concreto (PELLEGRINI, 2010).

Em empreendimentos mais recentes tem-se aplicado um novo tipo de parede (*dry wall* e *steel frame*), que podem ser possíveis barreiras para o sinal *wireless*. Diferente das paredes feitas convencionalmente de tijolo, tem-se utilizado o sistema *DRY WALL* (paredes cartonadas de gesso) e mais recentemente o sistema *Steel Frame* (paredes de placas cimentícias), sistema que reduz tempo de execução, mão de obra e geração de resíduos de construção civil (ETERPLAC, 2010).

Sendo diversas as barreiras aos sinais das redes sem fio, a motivação desta pesquisa é avaliar as características da pasta de cimento e do resíduo de borracha quanto à permissividade de ondas de radiofrequência para que, no futuro, seja possível a fabricação de divisórias feitas de placas cimentícias compostas com ambos materiais (pastas de cimento com borracha) com a finalidade de interferirem o mínimo possível na transmissão dos sinais das redes *wireless*. Neste

trabalho, realizou-se a caracterização eletromagnética de dois materiais, sendo eles a pasta de cimento pura e o resíduo de borracha.

O resíduo de borracha empregado nesta pesquisa é proveniente de pneus inservíveis. Este pneu que já cumpriu a sua função de rodagem tem sido descartado inadequadamente na natureza, sendo queimados a céu aberto poluindo o ar e o solo (MATTOS, 2006).

De acordo com Lagarinhos (2011; 2013) a geração de lixo é um agravante do mundo atual, impactando o ambiente, causando danos à saúde de homens e animais, entre outros fatores. Os pneus inservíveis são um exemplo desse lixo que alocado de maneira inadequada servem de criadouro para mosquitos como os da dengue e malária.

Preocupado com o descarte desse pneu e o impacto ambiental por ele causado, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na Resolução nº 416/2009 determina que a cada pneu novo comercializado, empresas fabricantes ou importadoras deverão destinar de maneira ambientalmente adequada um pneu inservível. Os elementos constituintes do pneu deverão ser reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas admitidas pelos órgãos ambientais competentes.

Devido a exigência da Resolução CONAMA nº 416/2009, o nicho das indústrias de reciclagem de pneus tem aumentado de forma significativa. Essas empresas são responsáveis pela separação dos materiais que compõem o pneu. Dentre esses materiais está a borracha que, há algum tempo, tem sido usada para compor as mantas asfálticas. Mesmo sendo inserida na composição da manta asfáltica, ainda há uma elevada e crescente quantidade de resíduo de borracha que aguardam uma possível aplicação (EDEL, 2002).

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é determinar a permissividade dielétrica da pasta de cimento e do resíduo de borracha proveniente de pneus inservíveis, utilizando ondas de radiofrequência, na faixa de 2,45 GHz, também denominada banda das redes *wireless* (redes sem fio). Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar a resistência à compressão das amostras de pasta de cimento sem e com a adição de resíduo de borracha.
- Observar se os resultados dos ensaios de compressão confirmam a relação inversa entre o teor de água/cimento e de borracha com a resistência.
- Determinar o volume adequado do corpo de prova para a realização do ensaio na faixa de frequência de 2,45 GHz.
- Determinar a permissividade da pasta de cimento e do resíduo de borracha, utilizando ondas de radiofrequência.
- Avaliar individualmente o resultado da permissividade dielétrica de cada amostra (de pasta de cimento e de resíduo de borracha) e comparar os valores de ambas para saber qual tem maior permissividade e quanto maior é essa permissividade.
- Propor a continuidade desse estudo em pesquisas futuras, misturando o resíduo de borracha na pasta de cimento, visando conhecer qual a permissividade dielétrica do composto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O HISTÓRICO DA BORRACHA TENDO COMO ORIGEM O PNEU

De acordo com a Associação Nacional da Indústria dos Pneumáticos, foi através de estudos realizados a partir de 1824 que Charles Goodyear descobriu que a borracha cozida com enxofre a altas temperaturas, mantinha suas propriedades elásticas independentemente da situação climática. Esse processo de vulcanização da borracha deu forma ao pneu, reduzindo acidentes, trepidações e tornando o automóvel mais seguro em freadas, o que garantiu aos irmãos Michelin em 1845 a patente do pneu para automóveis (GOODYEAR, 2013).

De acordo com Vasconcelos (2009), parte da borracha utilizada para a fabricação dos pneus é proveniente do látex, uma matéria-prima originada de árvores conhecidas como seringueiras. Após o processo de vulcanização associado a outros diversos produtos dá-se origem ao pneu de borracha usado nos veículos rodoviários.

O pneu é o resultado da combinação exata entre borracha natural, derivados de petróleo, aço e outros produtos químicos em distintas proporções para a fabricação de pneus de veículos de passeio descritos na Tabela 1. Esses pneus suportam altas velocidades mantendo a aderência com a pista e o conforto do passageiro. Já os pneus para caminhões têm como principal propriedade suportar o peso (ANIP, 2013).

Tabela 1 - Composição das borrachas de pneu.

Componente	Porcentagem	Composição/Finalidade
SBR (<i>borracha de butadieno estireno</i>)	62,1	$(-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{ran}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-\text{})_n$
Negro de fumo	31,0	Fortificar a borracha, aumentar a resistência à abrasão, dissipar calor
Óleo modificado	1,9	Mistura de hidrocarbonetos aromáticos/amolecer a borracha, dar trabalhabilidade
Óxido de zinco	1,9	Controlar processo de vulcanização, aumentar propriedades físicas da borracha
Ácido esteárico	1,2	Controlar processo de vulcanização, aumentar propriedades físicas da borracha
Enxofre	1,1	Fazer o crosslink entre as cadeias poliméricas, prevenir excessivas deformações a altas temperaturas
Aceleradores	0,7	Composto organo-enxofre/ catalisar a vulcanização

Fonte: SEGRE (1999)

A Resolução CONAMA nº 416/2009 define pneu como: um componente de um sistema de rodagem, sendo constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais, que ao serem montados na roda de um veículo, sustentam elasticamente a carga do veículo e resistem a pressão provocada pela interação com o solo.

O processo produtivo do pneu inclui a preparação da borracha, sendo de grande importância a banda de rodagem (parte do pneu que possui contato com o solo), carcaça de aço e o talão (parte do pneu que faz ligação com a roda), que proporcionam maior resistência com o asfalto (ANIP, 2013).

3.1.1 PNEU INSERVÍVEL, DESCARTE E RESÍDUO DE BORRACHA

O pneu tem seu tempo de vida útil contabilizado pela sua rodagem, estando ainda sujeitos o mau uso ou danos extras. A reforma de pneu, também conhecida como recapagem, remoldagem ou recauchutagem de acordo com o procedimento realizado, não é considerada uma destinação adequada, sendo apenas um método de se aumentar a vida útil do pneu (FIORITI *et al.*, 2010).

Ainda de acordo com Fioriti *et al.* (2010), o pneu que chega ao fim de sua vida útil, também conhecido como pneu inservível, tem na reciclagem e no aproveitamento de seus resíduos a principal forma de conter o impacto ambiental que esse material pode causar.

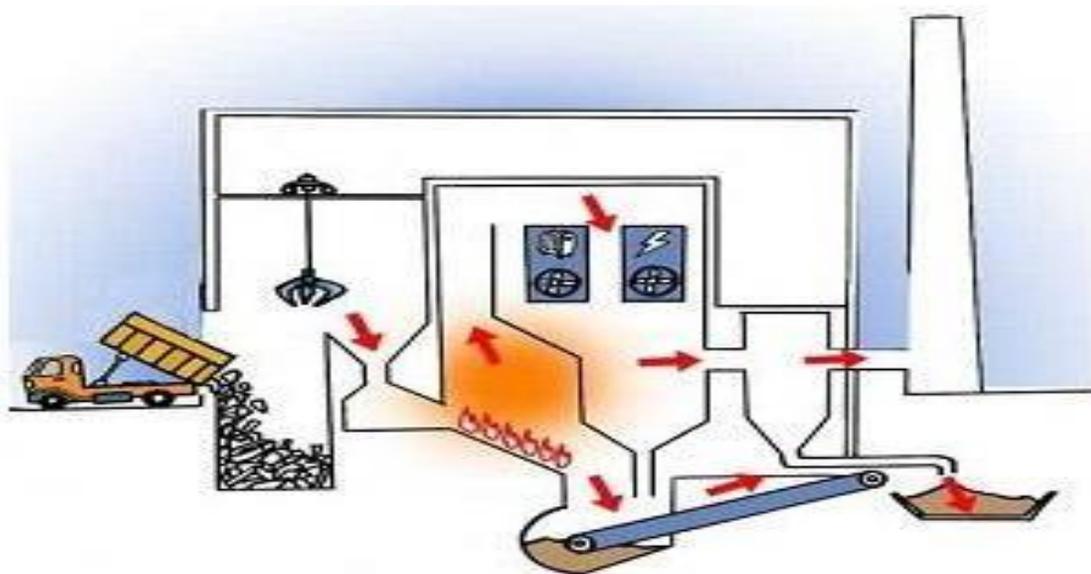
Segundo Rodrigues (2006), só na região Sudeste do Brasil, em terrenos catalogados, o número de pneus inservíveis armazenados ultrapassa os 16 milhões. Em informação mais recente, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) afirma que em 2013 foram produzidos no Brasil 68,8 milhões de pneus, sendo 12,3 milhões destinados à exportação versus uma importação de 3,8 milhões. Portanto internamente no Brasil, apenas em 2013, são 60,3 milhões de pneus novos que se tornarão inservíveis após exceder seu limite de rodagem e precisarão de um descarte adequado.

O descarte inadequado desses pneus após sua vida útil eleva e agrava o problema de saúde pública, dengue e malária, por exemplo. Por não sofrerem biodegradação o seu armazenamento em terrenos, principalmente em países de clima tropical, servem como criadouros para mosquitos transmissores de dengue, febre amarela e malária, (LARGUINHOS, 2011).

Um segundo descarte ainda mais prejudicial é a incineração desse pneu inservível (Figura 1), onde ocorre a liberação do óleo pirolítico, capaz de produzir efeitos adversos à saúde como

perda de memória, deficiência no aprendizado, bem como supressão do sistema imunológico, danos nos rins e no fígado, devido a produtos tóxicos e metais pesados presente nesse óleo, o qual contamina o solo, a água e lençóis freáticos. Alguns estudos demonstram que a poluição de águas causada pelo escoamento derivado da queima de pneus pode durar até 100 anos (MATTOS, 2006).

Figura 1- Esquema de incineração de pneus inservíveis.



Fonte: [http://3.bp.blogspot.com/-](http://3.bp.blogspot.com/-9zOz74joLWg/UKZ6fhKUhZI/AAAAAAAAAKk/72dID5icfC0/s1600/imagem.JPG)

[9zOz74joLWg/UKZ6fhKUhZI/AAAAAAAAAKk/72dID5icfC0/s1600/imagem.JPG](http://3.bp.blogspot.com/-9zOz74joLWg/UKZ6fhKUhZI/AAAAAAAAAKk/72dID5icfC0/s1600/imagem.JPG)

Tendo em vista todos os danos causados pelo descarte inadequado do pneu quando o mesmo excede seu limite de rodagem ou quando danificado por alguma eventualidade, a Resolução CONAMA n° 416/2009, preocupado com o impacto ambiental que esses pneus podem causar, impõe que, para cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível. Sendo entendidos como destinação adequada os procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas admitidas pelos órgãos ambientais competentes, desde que não causem riscos a saúde pública e segurança, e minimize os impactos ambientais adversos.

Com essa determinação da Resolução CONAMA nº 416/2009, criou-se e tem-se crescido o nicho da reciclagem de pneus inservíveis. A reciclagem é o processo de fabricação de borracha moída, em diferentes granulometrias, com separação e aproveitamento do aço. Porém no Brasil apenas 29,91% de todo pneu inservível passa por esse processo de reciclagem, sendo as regiões Sul e Sudeste as campeãs no quesito de correta destinação do pneu, com destaque para os estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná onde se concentram o maior número de empresas que atuam nesse segmento. Atualmente, a principal aplicação desse resíduo de borracha de pneu é a pavimentação asfáltica, porém tem-se estudado a inserção desse resíduo nas pastas de cimento e concretos para as mais diversas aplicações.

3.2 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DA PASTA DE CIMENTO

Pasta é a denominação dada à mistura de um aglomerante hidráulico (cimento, cal hidráulica) ou aéreo (cal aérea, gesso) com a água.

A pasta de cimento geralmente é formada pelo cimento Portland que ao reagir com a água, adquire propriedade adesiva gerando produtos que possuem características de pega e endurecimento.

Segundo a Norma ABNT NBR 5732:1991, o Cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

As matérias-primas empregadas na fabricação do cimento Portland são formadas de carbonato de cálcio (rochas calcárias, giz, mármore ou conchas do mar) tendo a argila e dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) como principais impurezas, e de silicatos de cálcio (obtida de argilas e xistos argilosos). As argilas contêm também alumina (Al_2O_3), os óxidos de ferro (Fe_2O_3) e álcalis que, presentes na matéria-prima, facilitam a formação dos silicatos de cálcio. Sem estes elementos, as temperaturas para a calcinação do cimento teriam de ser bem maiores e por esta razão, quando há quantidade insuficiente de Al_2O_3 ou Fe_2O_3 na matéria-prima, são feitas adições de bauxita e minério de ferro, respectivamente. Assim sendo, além dos silicatos de cálcio, o produto final também contêm aluminatos e ferroaluminatos de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Após a extração, a matéria-prima é britada e misturada nas proporções corretas. Esta mistura é colocada em um moinho (moinho de cru) produzindo um pó fino chamado de farinha que, no processo de fabricação por via seca, é calcinada num forno rotativo a temperaturas de aproximadamente 1450°C. Durante a calcinação, consome-se em torno de 800 Kcal/Kg de cimento produzido. A mistura sofre uma série de reações químicas complexas e o material que deixa o forno tem a forma de nódulos com 5 a 25 mm de diâmetro, sendo denominado clínquer (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Finalmente, o clínquer é reduzido a pó em um moinho (moinho de cimento) juntamente com 3% a 5% de gipsita. A gipsita tem a função de retardar o endurecimento do clínquer, pois este processo seria muito rápido se a água fosse adicionada ao clínquer puro.

Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos seguintes compostos:

- silicato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
- silicato bicálcico $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$
- aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
- ferro aluminato tetracálcico $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AFe}$

As propriedades do cimento estão relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos.

O silicato tricálcico ou alita é o maior responsável pela resistência em todas as idades especialmente até o fim do primeiro mês de cura. Na hidratação do cimento Portland, a alita acelera o endurecimento, aumenta o calor de hidratação e é responsável pelas resistências iniciais.

O silicato bicálcico ou belita possui estrutura molecular onde os vazios intersticiais são menores e, por esta razão, sua reatividade é menor que a da alita. A belita, na hidratação do cimento Portland, responde pelas resistências finais, apresenta baixo calor de hidratação e endurecimento lento.

O aluminato tricálcico contribui para o ganho de resistência no primeiro dia. Sua reação com a água é violenta e provoca o enrijecimento imediato da pasta (pega instantânea). Por este motivo, adiciona-se a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ao clínquer na fabricação do cimento Portland, com o propósito de retardar a pega.

O ferro aluminato tetracálcico em nada contribui para a resistência, tem calor de hidratação relativamente baixo, ficando entre o C_3S e o C_2S (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

3.2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O cimento Portland adquire suas propriedades aglomerantes a partir da adição da água, quando se iniciam as reações de hidratação dos diversos compostos. Estes compostos hidratam a velocidades diferentes e, os aluminatos, por serem muito mais reativos que os silicatos, hidratam primeiro, sendo responsáveis pelo enrijecimento e pega da pasta.

Há duas maneiras pelas quais os compostos presentes no cimento reagem com a água. Na primeira, há uma incorporação direta de algumas moléculas de água, sendo assim uma verdadeira hidratação, e a segunda uma hidrólise (NEVILLE, 2008).

Quanto à reação de hidratação dos aluminatos a reação do C_3A com a água é muito rápida, formando hidratos cristalinos tais como C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_8 com liberação de grande quantidade de calor. Se não fosse a adição de gipsita ao clínquer do cimento, com a finalidade de desacelerar esta reação, a alta velocidade de enrijecimento da pasta impediria seu uso (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), quanto à reação de hidratação dos silicatos de cálcio, verifica-se que quando ocorre a hidratação do C_3S e do βC_2S com uma quantidade limitada de água, como no caso da pasta de cimento e do concreto, acredita-se que o C_3S sofra hidrólise. Essa hidrólise produz uma variedade de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que variam conforme a relação cálcio/sílica e o teor de água combinada. Os C-S-H representam de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta totalmente hidratada, sendo responsáveis por suas principais propriedades. Embora não se conheça a estrutura exata do C-S-H, acredita-se que a mesma seja constituída de camadas com área específica elevada (100 a 700m²/g).

Uma idéia de como poderiam ser representadas as reações de hidratação dos silicatos em pastas totalmente hidratadas é indicada nas Equações (1) e (2):



Na hidratação dos silicatos de cálcio, uma parcela da cal é liberada na forma de hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, também chamado de portlandita, constituindo de 20% a 25% do volume de

sólidos da pasta hidratada. Os cristais de portlandita são mais solúveis que as partículas do C-S-H, e sua presença na pasta reduz a durabilidade a águas ácidas e sulfatadas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a hidratação do C_3S produziria 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de $Ca(OH)_2$ enquanto que a hidratação do C_2S produziria 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de $Ca(OH)_2$ e disto resulta que cimentos com maior proporção C_2S são mais duráveis em meios ácidos e sulfatados.

3.2.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO

Os compostos presentes no cimento Portland são obtidos através de reações realizadas a altas temperaturas, estando em estado de energia elevado. Ao entrarem em contato com a água, estes compostos reagem produzindo compostos hidratados, liberando a energia em forma de calor. As reações de hidratação do cimento Portland são reações exotérmicas, chegando a liberar energia de até 500 J/g de cimento. O calor liberado nas reações é conhecido como Calor de Hidratação. Segundo TAYLOR *apud* SEGRE (1999) a hidratação completa do cimento Portland I (CPI) para uma relação água/cimento de 40% a 21°C produz uma energia na ordem de 400J/g.

Este calor pode ter implicações prejudiciais à estrutura do concreto principalmente em grandes volumes de mistura, uma vez que o aumento de temperatura provocado pelo calor de hidratação, nas primeiras horas, provoca variações volumétricas e, conseqüentemente, tensões internas na pasta ainda pouco hidratada. Na prática o fator mais importante é conhecer a velocidade com que esse calor é dissipado e não a quantidade total de calor de hidratação liberada (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2008). Na Tabela 2 são mostrados valores típicos do calor de hidratação dos compostos puros.

Tabela 2 - Calor de hidratação dos compostos puros (J/g).

Composto	Calor de hidratação
C_3S	502
C_2S	260
C_3A	867
C_4AFe	419

Fonte: NEVILLE, 2008

3.2.3 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO DA PASTA

Após a adição da água à mistura de cimento Portland, iniciam-se reações de hidratação e aos poucos a mistura vai perdendo a consistência da pasta plástica de cimento até atingir o estado de enrijecimento. O enrijecimento ocorre devido à perda de água livre na pasta pela hidratação dos compostos do cimento, adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade e também pela evaporação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Essa mistura, com o decorrer do tempo, começa a perder a plasticidade ao passo que endurece, sendo esse período de tempo denominado tempo de pega, que é caracterizado pelo aumento da viscosidade e elevação da temperatura. O começo da solidificação da pasta é chamado de início de pega e marca o ponto no tempo em que a pasta perde a trabalhabilidade. Quando a pasta de cimento endurece e torna-se um bloco indeformável para pequenas cargas significa que finalizou o tempo da pega, porém internamente continuam ocorrendo reações que elevam sua coesão e a resistência. De acordo com SEGRE (1999), esse aumento da coesão e da resistência que continua a ocorrer é proveniente dos 75% de silicatos de cálcio que existem na composição do cimento, sendo estes os responsáveis pelo pH alcalino das pastas de cimento.

Segundo AITCIN (2000), durante o tempo de pega, a reação do cimento ao ser hidratado é uma reação exotérmica o que promove uma elevação da temperatura da mistura. Essa elevação de temperatura está relacionada com a quantidade de cimento que está sendo efetivamente hidratada e não com a totalidade de cimento presente na mistura. Nesse caso, com a temperatura elevada, há perda gradual da água evaporável do concreto, ocasionando o aparecimento de reações de desidratação da pasta de cimento.

3.2.4 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

Na designação dos cimentos brasileiros as iniciais CP correspondem a abreviatura de Cimento Portland seguidas dos algarismos romanos de I a V conforme o tipo de cimento, sendo agrupados, segundo a resistência, nas classes 25, 32 e 40, correspondendo respectivamente, às resistências 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, aos 28 dias.

Os cimentos Portland são classificados conforme a sua composição e as adições feitas em sua produção. Segundo ISAlA (2010), essas adições minerais são divididas em três categorias,

sendo a primeira de materiais cimentícios como escória de alto-forno, a segunda de materiais pozolânicos como cinzas volantes e sílica ativa e a terceira categoria de materiais não reativos como o fíler calcário. Além das vantagens econômicas, pois as adições minerais tem custo inferior quando comparado com o clínquer, essas adições apresentam vantagens técnicas como melhora da trabalhabilidade da pasta de cimento ainda no estado fresco, bem como a melhora da durabilidade de produtos feitos com esse cimento. No âmbito ambiental e da sustentabilidade o que até então era resíduo de um processo passa a ser parte integrante de outro, considerando-se assim a redução no consumo de energia e da emissão de CO₂ na produção de cimento.

De acordo com ABCP (2002) são diversos os tipos de cimento ofertado no mercado brasileiro, dentre eles o cimento Portland comum, também conhecido como CP I e denominado cimento de referência. A partir desse cimento de referência, os diversos tipos de cimento vão se diferenciar quanto à proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, materiais carbonáticos e as adições. O CP I é produzido sem quaisquer adições além do gesso, que é utilizado para regularizar a pega. Ao receber de 1% a 5% de adição mineral, seja esta adição de material pozolânico, escória de alto-forno ou material carbonático, esse cimento passa a ter um “S” acrescentado a sua sigla, tornando-se CP I – S. Já os cimentos compostos recebem essas adições em maior proporção, quando essa maior proporção é de escória de alto-forno a sigla passa a ser acrescida de um “E” (CP II – E), quando é de pozolana é acrescida de um “Z” (CP II – Z) e quando é de fíler, é acrescida de um “F” (CP II – F). Já os CP III (cimento Portland de Alto-Forno) apresentam proporções de 35 a 70% de escória em sua composição, enquanto que os CP IV (cimentos Portland Pozolânico) apresentam de 15 a 50% de pozolana. O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) tem a propriedade de atingir altas resistências já nos primeiros dias após a aplicação. Isto é possível pela utilização de uma dosagem específica de calcário e argila na produção do clínquer, além de uma moagem mais fina.

Existem ainda alguns tipos especiais de cimento tais como: Cimento Portland Resistentes a Sulfatos que resistem aos meios agressivos, Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação que apresentam taxas lentas de evolução de calor, Cimento Portland Branco o qual é obtido através de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês, além de condições especiais de fabricação, principalmente durante o resfriamento e a moagem, Cimento para Poços Petrolíferos, utilizado na cimentação de poços petrolíferos.

A relação dos principais tipos de cimento e suas siglas está expressa na Tabela 3.

Tabela 3 - Nomenclatura dos Cimentos Portland e classe de resistência.

Nome Técnico		Sigla	Classe	Identificação
Cimento Portland Comum (NBR 5732)	Cimento Portland Comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
			40	CP I-40
	Cimento Portland Comum com Adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
Cimento Portland Composto (NBR 11578)	Cimento Portland Composto com Escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento Portland Composto com Pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
	Cimento Portland Composto com Fíler	CP II-F	25	CP II-F-25
			32	CP II-F-32
			40	CP II-F-40
Cimento Portland de Alto-Forno (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP IV-32
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos (NBR 5737)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS
			32	
			40	
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (NBR 13116)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC
			32	
			40	
Cimento Portland Branco (NBR	Cimento Portland Branco Estrutural	CPB	25	CPB-25
			32	CPB-32
			40	CPB-40

12989)	Cimento Portland Branco Não Estrutural	CPB	-	CPB
	Cimento para Poços Petrolíferos (NBR 9831)	CPP	G	CPP - classe G

Fonte: ABCP (2002)

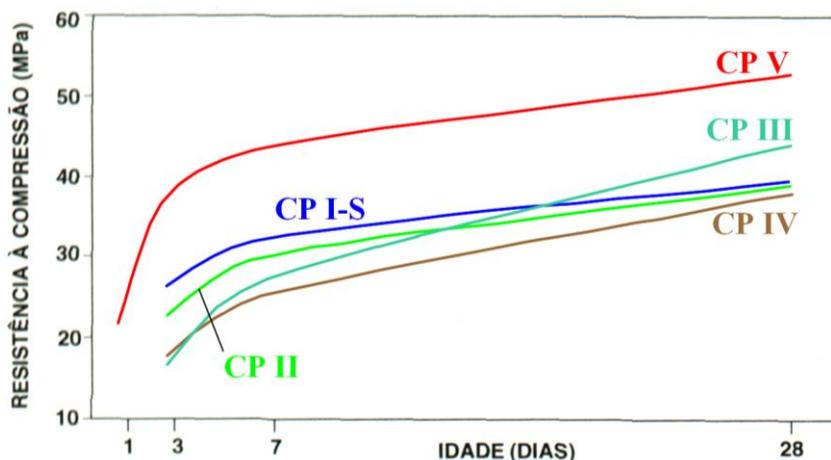
3.2.5 DENSIDADE, FINURA E RESISTÊNCIA

Na pasta de cimento, a densidade é um valor variável com o tempo, aumentando à medida que progride o processo de hidratação. Tal fenômeno é conhecido como retração, podendo atingir em 24 horas cerca de 7 mm por metro na pasta pura (BAUER, 2007).

A finura do cimento está relacionada com o tamanho dos grãos do material e pode ser definida pelo valor de sua superfície específica. A finura influencia a velocidade da reação de hidratação do cimento influenciando as demais propriedades da pasta. Aumentando-se a finura, melhora-se a resistência à compressão, principalmente nos primeiros dias, diminui-se a exsudação, aumenta-se a impermeabilidade e a trabalhabilidade da pasta (BAUER, 2007).

Os cimentos, de acordo com sua composição e finura, apresentam curvas Resistência x Idade distintas, que determinam seu emprego em determinados serviços. A Figura 2 mostra a evolução da resistência com o tempo, para cada tipo de cimento.

Figura 2 - Evolução da Resistência à compressão de cada tipo de cimento Portland.



Fonte: KATTAR e ALMEIDA, 1997

Segundo Neville (2008), durante a produção do clínquer ocorre à formação de aluminatos e silicatos, elementos determinantes nos processos da resistência mecânica, porosidade, calor de hidratação e em várias outras propriedades do cimento. Essas propriedades implícitas no processo de formação do clínquer serão aparentes quando esse cimento for hidratado, formando assim a pasta de cimento. Sendo a pasta o elemento quimicamente ativo de qualquer material à base de cimento, ela está presente em materiais como argamassas e concretos.

De acordo com Isaia (2010), a pasta de cimento, composta apenas por cimento Portland e água em devidas proporções, possui aplicação restrita por apresentar uma maior retração (fenômeno típico do cimento) e um custo mais elevado quando comparado à argamassa convencional. Dessa forma, sua principal aplicação é para vedação de vazamentos ou obstrução de trincas e fissuras em peças de concreto danificadas. No caso de pastas de cimento, a resistência mecânica está condicionada fundamentalmente pela qualidade e atividade do cimento e pela relação água/cimento.

3.3 CONCEITO GERAL DE ARGAMASSA DE CIMENTO

A argamassa, de acordo com a norma ABNT NBR 13281:2005, é uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, com propriedade de aderência e endurecimento, contendo ou não aditivos ou adições, podendo ser dosada em obra ou industrializada. Assim como o concreto, a argamassa apresenta sua principal característica mecânica como sendo a resistência à compressão. As possibilidades de aplicação desse material são revestimentos de tetos, paredes e piso, assentamento de tijolos, blocos, sendo também empregada na forma de argamassa armada (HANAI, 2009). No Brasil a argamassa armada foi grandemente empregada em obras desenvolvidas pelo arquiteto João Filgueiras Lima na construção de componentes pré-fabricados em série (LIMA, 1984).

As propriedades da argamassa, segundo Bauer (2007), variam de acordo com a quantidade de água e a sua qualidade, bem como a qualidade do aglomerante. Esses fatores irão determinar as condições de envolvimento dos grãos dos agregados pela pasta de cimento, a aderência entre eles e a quantidade de vazios resultante. A análise das propriedades de uma argamassa acontece em duas etapas, sendo a primeira no estado fresco da argamassa quando esta é recém-misturada e a segunda no estado endurecido.

Quando recém-misturada, são importantes as suas propriedades de retenção de água e de consistência, essa última também conhecida como trabalhabilidade. Quando a argamassa encontra-se endurecida, a sua principal propriedade é a de resistência mecânica. A consistência de uma argamassa pode ser entendida como a capacidade que a mesma apresenta de se deformar sob a ação de seu peso próprio ou de esforços a ela aplicado logo após a mistura. É a medida da consistência que proporciona uma melhor ou pior trabalhabilidade, sendo possível melhorar com a adição de plastificantes ou fluidificantes (produtos químicos que alteram as propriedades das argamassas), porém essa adição não deve implicar na perda de coesão ou resistência mecânica, fenômenos esses que ocorrem quando se aumenta a relação água/cimento visando atingir uma melhor trabalhabilidade (BAUER, 2007).

3.4 CONCEITO GERAL DE CONCRETO DE CIMENTO

O concreto é o material de construção civil mais utilizado em todo o mundo devido à facilidade de acesso aos materiais necessários para sua fabricação, bem como a durabilidade, desempenho e versatilidade, que resultam em um produto final com vida útil e custo competitivo com os demais materiais estruturais, segundo Isaia (2010).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), o concreto é um excelente material de construção civil quanto à resistência à compressão, sendo esta a propriedade mais valorizada por engenheiros e projetistas. Constituído por cimento Portland, agregados miúdo e graúdo e água em proporções adequadas, podendo ou não conter aditivos e adições, o concreto atinge a consistência e resistência especificada em projeto.

A resistência que o concreto apresenta não apenas à compressão, mas também a outros tipos de tensões está relacionada a diversos fatores, como o traço da mistura, a relação água/cimento, a porosidade dos componentes estruturais, bem como o grau de compactação e as condições de cura da mistura. Os possíveis vazios, ocupados por ar, devem ser evitados, pois constituem pontos de descontinuidade, não havendo resistência mecânica nessa localização (METHA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Isaia (2010), concretos produzidos com os mesmos materiais cimento e agregados, fixando-se uma relação água/cimento, quanto mais fluído o concreto (maior abatimento) maior será o consumo de cimento do concreto. No caso de se manter fixo o valor de

abatimento, quanto menor a relação água/cimento do concreto, mais elevado será o seu desempenho mecânico, sua durabilidade e seu consumo de cimento por m³ de concreto.

Segundo Neville (2008), para se conhecer o consumo de cimento para a fabricação de concreto conforme a sua aplicação é necessário obedecer ao teor mínimo de cimento recomendado para cada função que o concreto irá desempenhar, garantindo que dessa forma ele atenderá as características de resistência e solicitações mecânicas. Para o caso de concretos sem função estrutural, recomenda-se entre 100 a 150 kg de cimento por m³ de concreto; quando o concreto desempenha função estrutural, o recomendado é 300 kg de cimento por m³ de concreto, já nos concretos expostos a condições agressivas, a recomendação de consumo de cimento é ainda maior, chegando a 350 kg de cimento por m³ de concreto.

Quando endurecido, conforme Isaia (2010), a principal propriedade do concreto a ser analisada é a resistência à compressão, a qual varia de acordo com cada tipo de cimento conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência à Compressão de alguns cimentos no Brasil.

Idade (dias)	Resistência à Compressão (28 dias) MPa					
	CP V ARI	CP II F 32	CP II Z 32	CP II E 32	CP IV 32	CP III 40
1	21,1	-	-	-	-	-
3	33,6	28,8	25,8	22,6	20,6	21,0
7	40,0	35,0	32,0	28,0	29,8	30,2
28	50,1	43,6	42,3	35,0	42,8	50,2

Fonte: ISAIA, 2010

3.5 PLACAS CIMENTÍCIAS

Segundo Pezente (2013), a placa cimentícia é um componente produzido industrialmente, com alto padrão de qualidade, resultante da mistura de cimento Portland, agregados leves como a perlita, com adição de fibras, podendo ou não conter aditivos. Normalmente é usada fibra de vidro em ambas as faces para garantir a resistência à flexão, evitando fissuras provocadas por diferença de temperatura.

Requisitos e métodos de ensaio, bem como condições de recepção são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15498:2007 para placas cimentícias planas com espessuras nominais de até 30 mm, reforçadas com adições de fibras, fios ou telas, exceto fibras de amianto.

As placas cimentícias devem apresentar algumas características mecânicas e físicas, dentre elas a resistência à tração na flexão, que é a resistência média dos valores obtidos nas duas direções das placas ensaiadas, onde a razão entre a resistência longitudinal/transversal deve ser maior ou igual a 0,5. Uma segunda característica é a permeabilidade, onde a placa pode apresentar umidade na face inferior, sem que haja formação de gotas de água nessa face. Também de suma importância é o comportamento das placas sob a ação do fogo, devendo essas apresentar incomustibilidade. Se combustíveis, deve-se especificar o índice superficial de propagação de chamas e a densidade óptica específica de fumaça (ABNT NBR 15498:2007).

As placas cimentícias são planas e se dividem em duas classes, A e B. As placas classificadas como “A” são indicadas para aplicação em área externa, sujeitas a ação direta de sol, chuvas e ventos. Essa classe de placas apresenta a resistência à tração na flexão entre 4 a 18 MPa, sendo este ensaio realizado com o corpo de prova saturado, ou seja, imerso em água com temperatura de pelo menos 5°C, por 24h, e por 48h quando a espessura da placa for superior a 20mm. O ensaio deverá ser realizado no máximo em 15 minutos após o corpo ter sido retirado da água. Com diferente aplicação, as placas de classe “B” são indicadas para áreas internas e externas apenas quando não são expostas diretamente a intempéries, apresentando uma resistência à tração na flexão que varia de 4 a 22 MPa. Para conhecer esse valor, este ensaio deve ser feito com os corpos de prova após 7 dias de cura em atmosfera controlada com temperatura de 23+/- 5°C e umidade relativa de 50 +/- 10%, dispostos de forma a deixar todas as faces ventiladas (ABNT NBR 15498:2007).

Devido à existência de placas para aplicação em uso interno e externo e as diversas classificações quanto à resistência à tração na flexão é permitido às placas cimentícias diversas possibilidades de aplicação, tais como: obras industriais, residenciais e comerciais, podendo ser usada como paredes externas de até três pavimentos (BRICKA, 2012).

As principais aplicações dessas placas são em fechamento de sistemas de *Steel Frame*, shafts, revestimento de colunas e vigas metálicas, decoração e design. Algumas vantagens desse sistema são: a facilidade de acabamento e aplicação de pintura, texturas, cerâmicas, pastilhas ou laminados; a praticidade e rapidez na obra; a redução de desperdício e geração de entulho quando

comparado com o sistema construtivo convencional. São resistentes a impactos e flexão, tem bom isolamento térmico e acústico, e não são inflamáveis, não oxidantes, imunes a fungos, insetos e roedores (PONTES, 2010).

A Figura 3 mostra a aplicação de *Steel Frame* em obras.

Figura 3 - Aplicações do Sistema de *Steel Frame* em construções (paredes internas e externas)



Fonte: <http://construirja.com/construir-casa-com-steel-frame/> (Janeiro. 2013) & <http://amcursos.blogspot.com> (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland)

3.6 O USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU EM COMPÓSITOS DE CIMENTO

A geração de resíduos e subprodutos provenientes da construção civil despertou a atenção da humanidade desde a edificação das cidades do Império Romano, civilização essa que registrou o início da reutilização de resíduos em novas construções. Atualmente, as novas tecnologias têm possibilitado o reuso e a reciclagem de resíduos na fabricação de cimento (como por exemplo, escórias de alto forno), concreto (com resíduos de vidros), entre outros com o intuito de melhorar determinadas características do produto e auxiliar na redução de resíduos que impactam o ambiente (ISAIA, 2010).

O resíduo de borracha é um dos produtos que devem ser usados em pequena porcentagem, pois a sua presença em excesso na composição de concretos e argamassas favorece a diminuição

da resistência à compressão devido à flexibilidade e a baixa resistência da borracha (LINTZ e SEYDELL, 2009).

São cada vez mais comuns as pesquisas que estudam a adição dos mais diversos resíduos na composição de concretos e argamassas. É comprovada que, dependendo do resíduo adicionado, são pequenas as porcentagens que podem vir a fazer parte do composto de forma a manter as propriedades requeridas pelas exigências normativas (ISAIA, 2010; LEE *apud* SEGRE, 1999; TAVIERA *et al.*, 2012; LINTZ *et al.*, 2010).

Segundo estudos realizados por Lee *apud* Segre (1999), os resíduos de borracha com granulometria entre 0,8 a 0,4 mm sem tratamento superficial e tratados com ácido nítrico (HNO_3) diluído, ao serem adicionados em pasta de cimento nas proporções de 5 a 15% apresentaram uma queda na resistência à tração da pasta. Observou-se que essa queda de resistência aumenta quando se aumenta a porcentagem de resíduo na pasta, sendo ainda maiores quando o resíduo de borracha recebe o tratamento superficial. Dando sequência a esse estudo, foi ensaiada a resistência aos ciclos de gelo-degelo de corpos de prova de pastas de cimento com resíduos de borracha nas proporções de 10 a 20% sem tratamento superficial, obtendo-se uma menor flexibilidade a cada ciclo de gelo-degelo. No estudo em questão, os pesquisadores recomendam o uso de resíduos de borracha de pneus na composição do concreto para melhorar qualidades como o isolamento térmico e acústico.

Taviera *et al.* (2012) analisaram a utilização de fibras de borracha obtidas do processo de raspagem mecânica oriundas da recauchutagem de pneus e agregados provenientes de concreto reciclado na fabricação de argamassas. Os ensaios foram realizados a partir da moldagem de argamassa com traço de referência 1:2 (cimento: agregado miúdo) com 0,27 de relação água/cimento. Os demais traços tiveram a substituição de 25, 50, 75 e 100% do agregado miúdo pelo agregado de concreto reciclado (ACR) e adição de fibra de borracha. Ao se retirar 25% da areia da mistura de referência foram adicionados a ela 25% de ACR e 25% de fibra de borracha, seguindo esse mesmo padrão para as demais substituições. Os ensaios de compressão e absorção realizados nos corpos de prova de argamassa mostraram que o traço com 25% de substituição permitiu uma melhoria das características mecânicas, em relação à argamassa de referência, devido ao maior preenchimento dos vazios. Essa melhora foi apresentando queda nos traços subsequentes. No traço com 50% de substituição, a resistência à compressão foi da ordem de 13% e a de absorção de 5% em comparação com o traço da argamassa de referência. Sendo

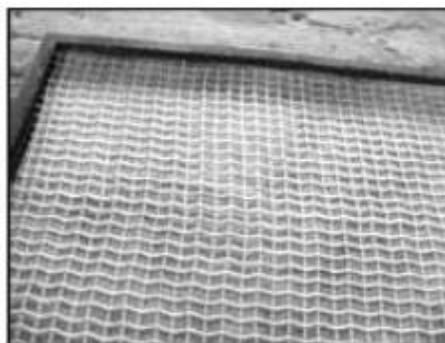
assim, pode-se constatar a viabilidade da produção de argamassa com a substituição de 25% do agregado por ACR e adição de borracha (TAVIERA *et al.*, 2012).

Rodrigues e Ferreira (2006) analisaram a possibilidade de fabricação de placas cimentícias com borrachas com a finalidade de vedação, conhecido como sistema *steel frame*. O resíduo de borracha utilizado apresentou quatro granulometrias as quais foram identificadas como P5, P10, P20 e P30 (partículas que passam nas peneiras de aberturas de malha 6 mm). Foram produzidos seis corpos de prova de dimensão 5x10 cm, cilíndricos, com resíduos de borracha, cimento Portland CPIII40, aditivos plastificantes de 3ª geração e adições a base de polímeros em emulsão possibilitando a redução da relação água/cimento entre 30 e 40%. Foram curados em câmara úmida com temperatura de 21 +/- 2°C. Os ensaios de compressão foram realizados aos 7, 14 e 28 dias de idade. Para os ensaios de flexão, foram moldadas placas cimentícias que receberam uma malha de fibra de vidro. Essas placas foram cortadas na dimensão de 350 mm x 50 mm e espessura de 13 mm para serem ensaiadas quanto à flexão conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Sequência da produção de placas e ensaios de flexão.



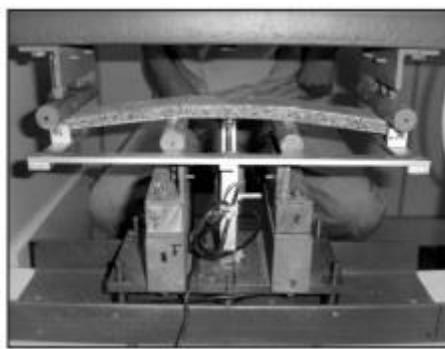
Moldagem de corpo de prova



Moldagem de corpo de prova



Corpo de prova para ensaio



Ensaio de flexão do corpo de prova

Fonte: (RODRIGUES e FERREIRA, 2006).

Os resultados dos ensaios comprovaram a viabilidade do uso do resíduo de borracha para a fabricação de placas cimentícias, independentemente do aditivo utilizado, apresentando desempenho adequado e custo competitivo (RODRIGUES e FERREIRA, 2006). Quanto ao teor de borracha empregado, observa-se que a incorporação de até 25% os resultados de resistência à compressão atendem as especificações da norma. Do ponto de vista ambiental esta porcentagem utilizada é significativa e contribui para minimizar os impactos gerados pelo descarte excessivo deste resíduo no meio ambiente, pois mesmo a porcentagem do resíduo sendo de apenas 25%, ela se torna significativa, pois a fabricação de placas é elevada e tende a crescer ainda mais na área da construção civil.

3.7 REDES WIRELESS

De acordo com Silva e Soares (2009), a rede sem fio, conhecida como *wireless* (wire = fio; cabo e less = sem) refere-se a uma transmissão de dados e sinais através de equipamentos de radiofrequência sem a necessidade do uso de cabos, sejam eles telefônicos coaxiais ou ópticos. A rede *wireless* é comumente chamada de *Wi-Fi*, que é a abreviatura de *wireless fidelity* (fidelidade sem fios). A *Wi-Fi* uma marca registrada pertencente à *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*.

Equipamentos como controle remoto (televisão ou som), celulares, infravermelho, laser, etc, trabalham com *wireless*. Porém, essa comunicação está dividida em duas categorias, as aplicações indoor e outdoor. Caracteriza-se como indoor a comunicação dentro do mesmo ambiente/edifício e outdoor a comunicação realizada entre dois prédios, ou entre dois ambientes (RODRIGUES, 2011).

O funcionamento de uma rede *Wi-Fi* acontece entre pontos da rede através da modulação dos dados atribuindo uma codificação para cada rede. Essa modulação recebe o nome de ESSID, que permite que múltiplas portadoras de rádio possam coexistir no mesmo meio sem interferência entre elas, garantindo que, ao se conectar a rede desejada, não haja uma troca de dados com a rede incorreta. Essa segurança na rede ocorre porque a frequência sintonizada nos receptores é específica, rejeitando as demais frequências conforme observam Silva e Soares (2009).

Ainda de acordo com Silva e Soares (2009), como as redes sem fio tem sinal de acesso aberto, permitindo o acesso de quem está ao alcance de seu raio de transmissão, é necessário, ao configurar uma rede *Wi-Fi*, criptografar os dados para que deste modo não seja possível pessoal

não autorizado conectar-se a rede, ainda que o sinal seja captado. Atualmente são três os tipos de *Wi-Fi* criptografias:

- WEP (*Wired Equivalent Privacy* ou “Privacidade Equivalente à de Redes com Fios”) podendo ser de 64 bits ou e 128 bits, em ambas se codifica o pacote de dados antes de ser enviada à rede e, durante o processo, uma chave fixa é configurada no ponto de acesso para informar ao usuário caso algum problema seja detectado durante a troca de dados;

- WPA (*Wi-Fi Protected Access* ou Acesso sem fio protegido), ambiente de aplicação e uma pilha de protocolos que especificam e descrevem como a comunicação ocorre.

3.7.1 PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA

Em ambientes internos, o sinal que se propaga proveniente das antenas dos roteadores das redes *wireless* atravessa as paredes internas das edificações. Do ponto de vista elétrico, materiais como as paredes possuem propriedades que as caracterizam através da chamada permissividade dielétrica. Entende-se por permissividade dielétrica a capacidade de um material se polarizar em resposta a um campo elétrico e cancelar parte desse campo. A parte desse campo elétrico cancelada varia de acordo com a posição do material em relação ao centro do campo elétrico, sua frequência, a umidade e a temperatura. A permissividade não apresenta valores fixos, podendo ainda apresentar valores reais ou complexos. É chamado dielétrico todo material que não conduz eletricidade.

Quando uma carga elétrica é inserida em um material dielétrico este barra e/ou bloqueia a passagem da carga. Um fenômeno similar ocorre quando um material dielétrico é colocado num campo eletromagnético. Nesse caso, tem-se uma perturbação no campo atenuando ou até mesmo barrando o sinal. Justamente dentro deste contexto, esse trabalho objetiva avaliar as características de pastas de cimento quanto à passagem de sinal das redes *wireless*. Pastas estas que poderiam ser usadas no futuro para compor as pastas cimentícias empregadas na fabricação de paredes de vedação.

No vácuo, o valor da permissividade dielétrica é uma constante cujo valor é $8,85419 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$. A razão entre a permissividade de um material e a permissividade no vácuo é denominada como constante dielétrica, cujo valor é o que se determina na maioria dos experimentos.

Para que seja possível a análise da permissividade são utilizados equipamentos denominados analisadores de rede, os quais comparam o sinal incidente com o sinal transmitido pelo dispositivo através da medida da magnitude e a resposta de fase de componentes e redes elétricas. Essa medição traduz a capacidade que o material analisado tem de permitir, atenuar ou barrar a passagem do sinal (PAULA, 2010).

3.7.2 ENSAIOS REALIZADOS COM WIRELESS EM CONCRETO

Estudos têm utilizado da rede *wireless* em concretos e em concreto armado. Nesse último, o objetivo é analisar a saúde do aço que compõe a estrutura, ou seja, se o mesmo não apresenta corrosão e rompimento (ANTOINE, 1998; OLUTOLA e STAVROS, 2012; 2013).

Olutola e Stavros (2013) ensaiaram a passagem de um sinal de radiofrequência através de peças de concreto com o intuito de analisar a transferência do sinal através do concreto utilizando o método do acoplamento de ressonância magnética (SCMR). Para a realização do ensaio, utilizaram um analisador de redes modelo HP8714 e os parâmetros de transmissão e recepção foram medidos utilizando um conjunto de medição que comporta duas partes, um transmissor situado no ar e um sensor inserido dentro do concreto. O primeiro ensaio analisou a eficiência entre o sinal transmitido e recebido ao ar livre, em duas condições de umidade relativa. Na seqüência, mantendo-se a mesma distância entre o transmissor e receptor, esse último foi colocado dentro do cubo de concreto simples e posteriormente em um terceiro ensaio, em um cubo de concreto armado. Nesse caso a finalidade foi analisar e comparar o sinal recebido pelo sensor através dessa barreira cúbica de concreto conforme Figura 5.

Para todos os ensaios, foi avaliada a condição de umidade relativa do ar dentro do cubo de concreto, e constatou-se que quanto menor a umidade relativa do ar, melhor a eficiência do sinal recebido. Em relação à eficiência do sinal mediante as barreiras, o melhor resultado foi no ensaio ao ar livre, sendo de eficiência mediana para o ensaio com o concreto simples, e de baixa eficiência quando a barreira era de concreto armado.

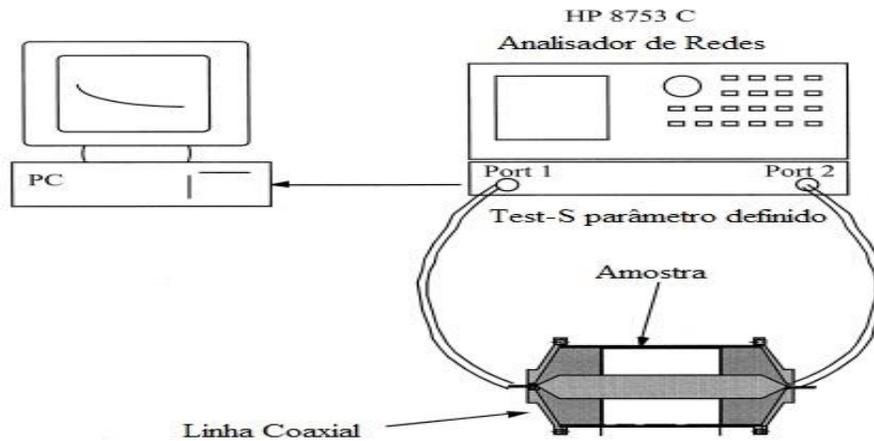
Figura 5 - Esquema de conexão utilizada para ensaio de permissividade.



Fonte: OLUTOLA e STAVROS (2013).

Antoine (1998) realizou ensaios para verificar a permissividade dielétrica do concreto na faixa de 50 MHz a 1 GHz com a utilização do HP 8753C montando um esquema fechado conforme esquematizado na Figura 6, onde o sinal é injetado por um lado da peça de concreto tendo de atravessá-la, e sendo recebido pelo conector que se encontra no lado oposto. Os corpos de prova de concreto foram fabricados com uma relação água/cimento de 0,55 e teor de cimento de 325 kg/m^3 , com espessura de 30 mm sendo analisados mediante a hidratação da pasta de cimento, relacionando-se permissividade do concreto versus umidade. Os resultados mostraram que em todos os corpos de prova a hidratação da pasta de cimento apresentou influência sobre o sinal medido. Observa-se a diminuição da permissividade maior no início da hidratação e menor depois de 28 dias da fabricação do corpo de prova quando a mesma apresenta quase a totalidade das partículas de cimento hidratadas pela água da mistura. Os mesmos corpos de prova testados após 1 ano de sua fabricação indicaram que a hidratação não foi encerrada, mas que o processo não teve efeito relevante quanto a permissividade. O autor ainda analisa os dados experimentais da permissividade do concreto com elevado teor de cloreto de sódio e observa que o efeito do cloreto é importante em baixa frequência, mas desaparece em 1 GHz.

Figura 6 - Esquema de conexão utilizada para ensaio de permissividade.



Fonte: ANTOINE (1998)

3.7.3 DIMENSIONAMENTO DA CAVIDADE PARA ENSAIO DE RADIOFREQUÊNCIA

Na realização do ensaio de radiofrequência, é necessário inicialmente dimensionar a cavidade que receberá o material a ser ensaiado. Esta cavidade deve ser feita de material metálico, como, por exemplo, o bronze ou o alumínio (que barram as ondas de radiofrequência) e impedem a sua saída para o meio externo. O diâmetro interno da cavidade deve ser compatível com a frequência de trabalho desejada. Para projetar a cavidade utilizou-se a Equação (3), de acordo com Oliveira e Pinho (2002), esta equação leva em consideração o diâmetro e a profundidade interna da cavidade para a faixa de frequência desejada.

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi} \left[\left(\frac{x_{nm}}{a} \right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

f é a frequência de ressonância da cavidade

c é a velocidade da luz

x_{nm} é a raiz da função de Bessel (usar raiz de primeira ordem)

a é o raio interno da cavidade cilíndrica

d é a profundidade da cavidade cilíndrica

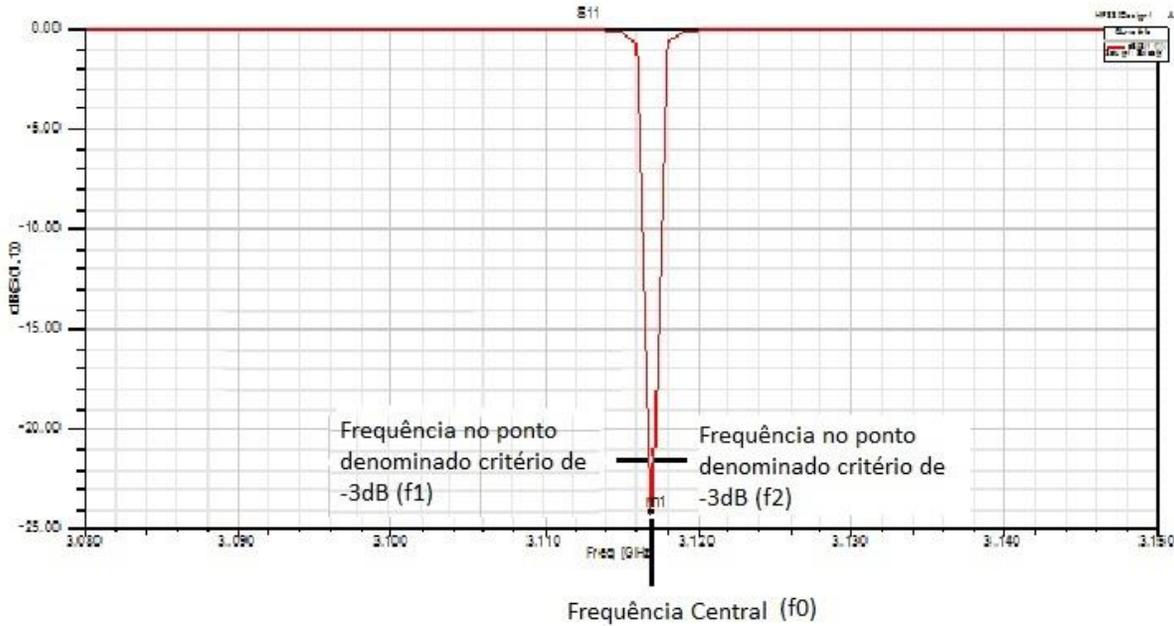
l é a altura total da cavidade

3.7.4 CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA TANGENTE DE PERDA

Para se determinar quão permeável um material é em relação à radiofrequência, faz-se necessário calcular a perda do sinal de radiofrequência quando a cavidade encontra-se com o corpo de prova em seu interior. Essa perda é dada através da relação entre a ressonância apresentada pela cavidade em vazio e perturbada com o corpo de prova em seu interior (FENSKE e MIRSA, 2000).

Quando a cavidade ressona a uma dada frequência, comumente chamada de frequência central, ela absorve energia não somente na frequência central, onde a absorção é máxima, mas também numa certa faixa de frequência, chamada de largura de banda da cavidade. Define-se como largura de banda a faixa de frequências compreendidas onde a absorção de potência da cavidade cai para a metade (diferença de 3 dB em relação a frequência máxima central). É importante explicar que, fora de ressonância, a cavidade reflete a potência que se injeta através do conector. É possível calcular e/ou medir o coeficiente de reflexão na entrada da cavidade, utilizando-se de um parâmetro denominado S11. Quando a reflexão na entrada da cavidade é máxima, pouquíssima potência consegue ser absorvida pela cavidade e pelo contrário naquela frequência em que a reflexão é mínima a absorção de potência da cavidade é máxima. Nesse caso diz-se que essa é a frequência de ressonância da cavidade. Porém a cavidade também absorve potência numa dada faixa de frequência na vizinhança da frequência de ressonância (Figura 7). Essa faixa é comumente chamada de largura de banda de trabalho e se define estabelecendo-se um limite de absorção de potência.

Figura 7 - Gráfico da Frequência de Ressonância, com ilustração da frequência central e da frequência nos pontos de -3 dB.



De posse dos valores de f_0 , f_1 e f_2 é possível calcular o fator de qualidade (Q), dado pela Equação (4), segundo Opn Calla *et al.* (2008) que especificam a seletividade de frequência e o desempenho de um ressoador.

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4)$$

Onde:

f_0 é a frequência central

f_1 é a frequência no ponto de -3 dB localizado a esquerda da frequência central

f_2 é a frequência no ponto de -3 dB localizado a direita da frequência central

De acordo com Fenske e Mirsa (2000), com as dimensões internas da cavidade, o volume dos corpos de prova, os valores de frequência e o fator de qualidade, é possível calcular ϵ' (parte real da permissividade) e ϵ'' (parte imaginária da permissividade), determinando assim os valores de permissividade complexa, os quais podem ser calculados segundo a Equação (5).

$$\epsilon' = 1 + \frac{V}{2v} \left(\frac{f_1 - f_2}{f_2} \right) \quad \epsilon'' = \frac{V}{4v} \left(\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1 \times Q_2} \right) \quad (5)$$

Onde:

ϵ' é a parte real da permissividade complexa

ϵ'' é a parte imaginária da permissividade complexa

V é o volume interno da cavidade ressonante

v é o volume do corpo de prova

f_2 é a frequência central da cavidade perturbada com o corpo de prova

f_1 é a frequência central da cavidade em vazio

Q_1 é o fator de qualidade da cavidade em vazio

Q_2 é o fator de qualidade da cavidade perturbada

A parte real da permissividade é comumente chamada de constante dielétrica e é um dos parâmetros utilizados para caracterizar o material. O outro parâmetro que completa a caracterização elétrica é a tangente de perda. De posse dos valores da parte real e imaginária da constante dielétrica, é possível relacioná-los e encontrar a tangente ($\tan \delta$) de perda. Com isso é possível constatar o quão permeável é o material analisado em relação aos sinais de radiofrequência das redes *wireless*. Esse valor de tangente de perda é dado pela Equação (6) (OPN CALLA *et al.*, 2008).

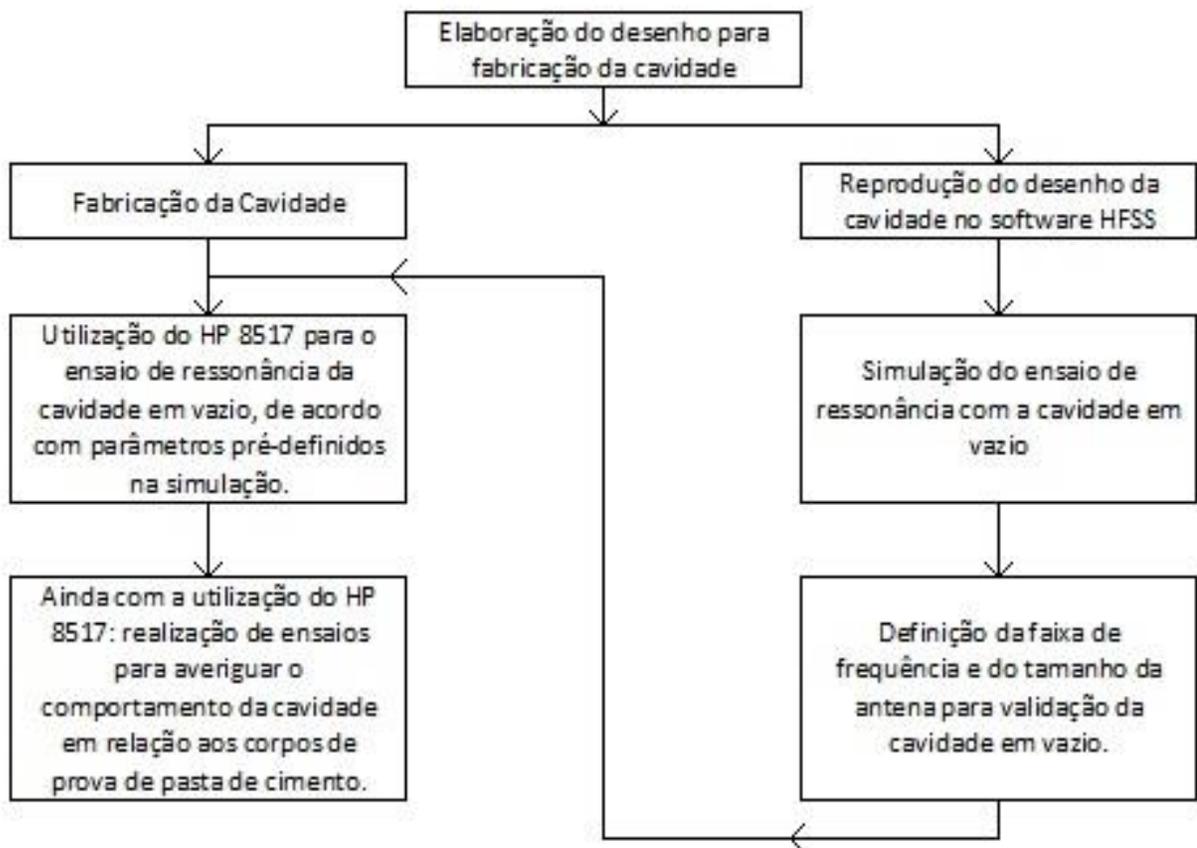
$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (6)$$

4. PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental deste trabalho iniciou-se com a fabricação da cavidade de bronze utilizada para a medição de permissividade de materiais em radiofrequência. Esta cavidade inicialmente foi usinada com as medidas referenciadas por Oliveira e Pinho (2002).

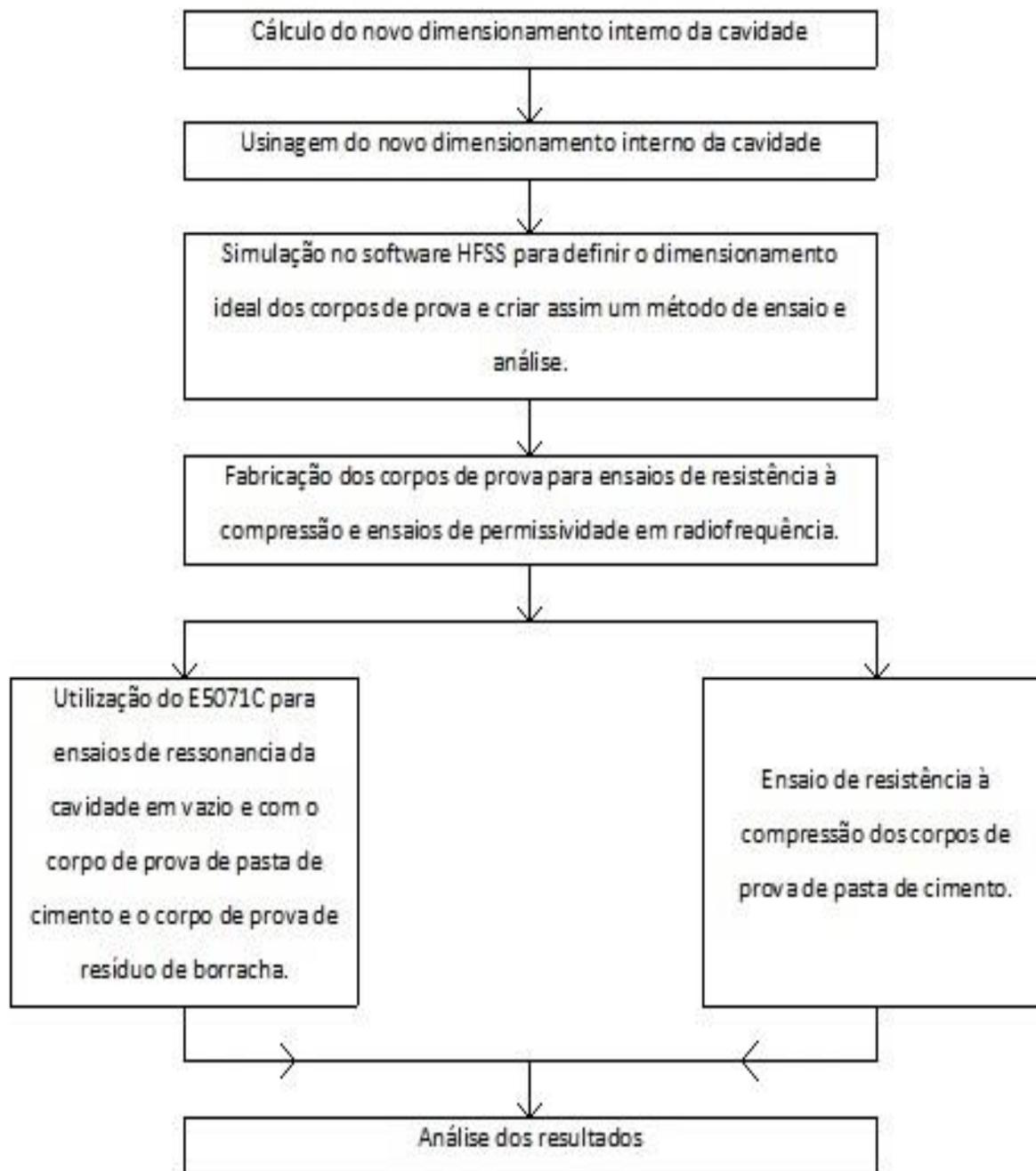
Na sequência, foram fabricados corpos de prova de pasta de cimento, os quais foram ensaiados quanto à permissividade com a finalidade de averiguar o comportamento da cavidade em relação a esses corpos de prova. Simulações em software foram feitas em paralelo à fabricação da cavidade e dos corpos de prova a fim de obter um método e dimensionamento adequado conforme ilustra o esquema representativo da Figura 8.

Figura 8 – Esquema representativo da primeira parte das atividades experimentais da pesquisa.



Na sequência desses ensaios, a cavidade teve a sua dimensão interna recalculada e reusinada para trabalhar em uma faixa de frequência de redes *Wireless* (de 2,45 a 3 GHz) com os corpos de prova de pasta de cimento. Inicialmente os ensaios foram realizados com a cavidade em vazio e, posteriormente, com os corpos de prova, conforme ilustra a Figura 9.

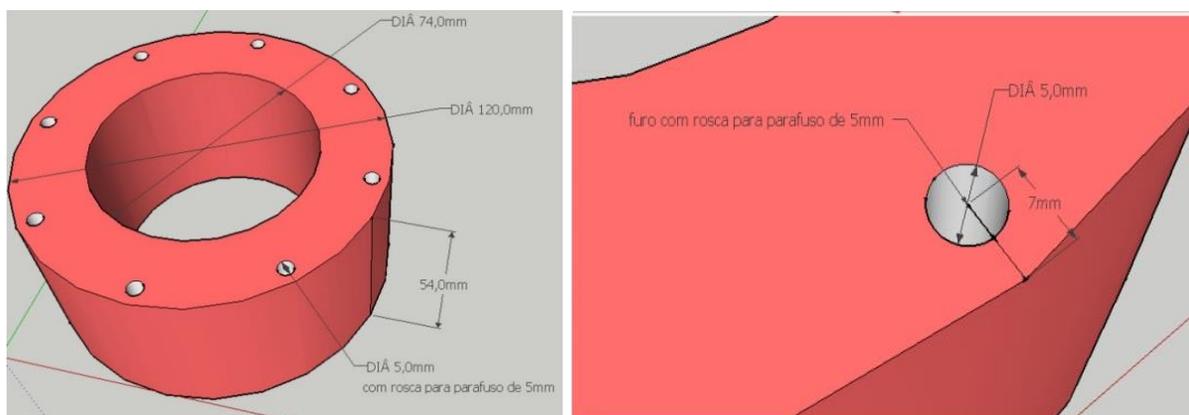
Figura 9 – Esquema representativo da segunda parte das atividades experimentais da pesquisa.



4.1 CONSTRUÇÕES DA CAVIDADE RESSONANTE

O trabalho realizado pelos pesquisadores Oliveira e Pinho (2002), sugere a utilização de uma cavidade de bronze para analisar a permissividade de materiais dielétricos. Dessa forma, nesta pesquisa desenvolveu-se uma cavidade ressonante circular em bronze para ensaiar pastas de cimento. A cavidade inicialmente foi usinada com diâmetro externo de 120 mm e diâmetro interno de 74 mm e profundidade de 54 mm para a realização de testes preliminares com a frequência de 3 GHz, conforme Figura 10.

Figura 10 - Corpo da cavidade com as furações laterais em ambos os lados.



A cavidade conta com duas tampas, uma inferior conhecida como tampa cega (Figura 11) e uma tampa superior (Figura 12) na qual se encontram três furos para o posicionamento e a fixação do conector SMA - conector comumente utilizado nas redes *wireless* (Figura 13).

Figura 11- Tampa inferior com furações laterais sem rosca.

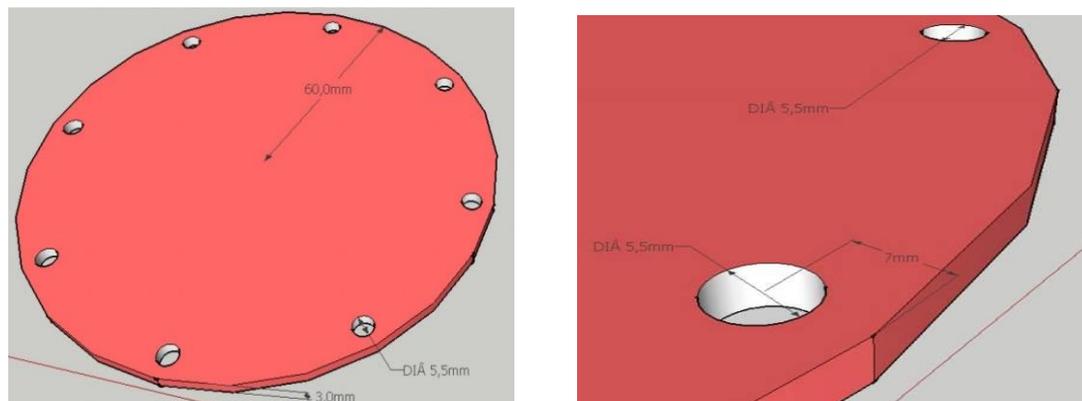
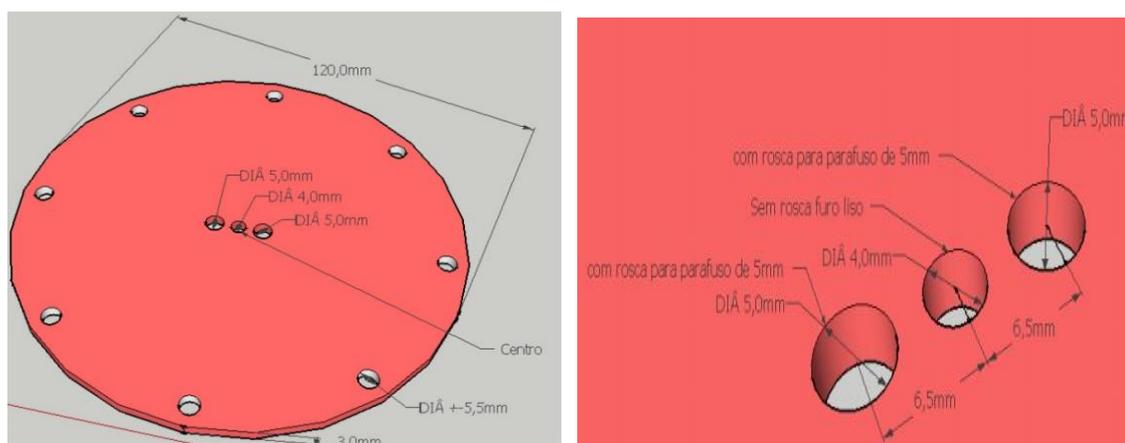


Figura 12 - Tampa superior com furações laterais sem rosca e furação ao centro para o conector SMA.



O conector SMA é o componente que permite a entrada do sinal proveniente do equipamento analisador de rede, que insere um sinal de rádio em uma frequência pré-definida no interior da cavidade, e recebe o sinal de retorno.

Figura 13 - Conector SMA



Fonte: HUBER+SUHNER, DATA SHEET, Coaxial Panel Connector: 23_SMA-50-0-3/111_N

A parte branca do conector vista na Figura 13 é a isolamento de teflon que é cortada de modo a facear a tampa da cavidade na parte interna. O conector é introduzido na cavidade pelo orifício feito na tampa superior. Sua base é parafusada, deixando a conexão com rosca voltada para a parte externa da cavidade onde se acopla o conector proveniente do equipamento gerador de frequência. Inicialmente, o conector usado teve uma antena soldada em sua extremidade que se localiza na parte interna da cavidade. Porém, os ensaios preliminares realizados com a cavidade vazia acusaram valores inferiores ao previsto na simulação com o software HFSS oscilando a cada repetição do ensaio. O conector foi substituído por um SMA cuja antena é prolongada de fábrica, não necessitando de solda, o que apresentou eficiência nos resultados, pois reduziu a possibilidade de perda. Ambos os conectores podem ser observados nas Figuras 14 e 15. Na tampa superior da superfície externa ficou a parte fêmea do conector, por onde é introduzido o sinal de radiofrequência (Figura 16).

Figura 14 - Vista interna do primeiro conector fixado na tampa superior da cavidade.



Figura 15 - Vista interna do Segundo conector fixado na tampa superior da cavidade.

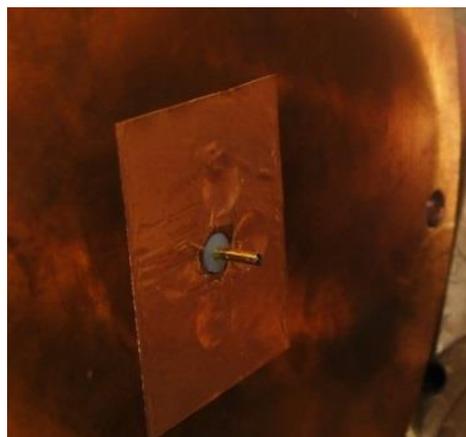


Figura 16 - Vista superior da cavidade concluída para início da validação.



Tendo concluído a construção da cavidade (Figura 16), os ensaios foram iniciados utilizando um analisador de redes, também conhecido como *S-Parameter Test Set*, da Hewlett Packard (HP), equipamento que injeta uma frequência dentro da cavidade conforme faixa pré-determinada de atuação, analisando o sinal inserido e recebido da rede.

Para esses testes, foi utilizado equipamento denominado conjunto e testes HP Agilent 8517B que trabalha numa faixa de frequência de 45 MHz a 50 GHz. Foi necessário o uso de uma câmera fotográfica para registrar as imagens geradas no ensaio, tendo em vista que o equipamento não disponibiliza recurso para salvar imagens.

4.2 SIMULAÇÕES E ENSAIOS PRÁTICOS COM A CAVIDADE EM VAZIO

Para que fosse possível uma informação prévia de ajustes de comprimento de antena e afins, utilizou-se o HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), um simulador de campo eletromagnético de onda completa com alto desempenho para modelagem volumétrica em 3D. Este software integra simulação, visualização e modelagem de sólidos e automação, obtendo retorno rápido e preciso dos resultados. Ansoft HFSS pode ser usado para calcular parâmetros como S-Parameters, frequência de ressonância e campos eletromagnéticos de dispositivos tais como Antenas, Conectores, Filtros, Transmissores e Cavidades. Para este trabalho, foi usada a versão 13 desse software. Após ter sido feito o desenho em 3D da cavidade (Figura 17), ajustou-se a frequência para uma faixa de 3,08 a 3,15 GHz (Figura 18).

Figura 17 - Cavidade desenhada em 3D no software HFSS.

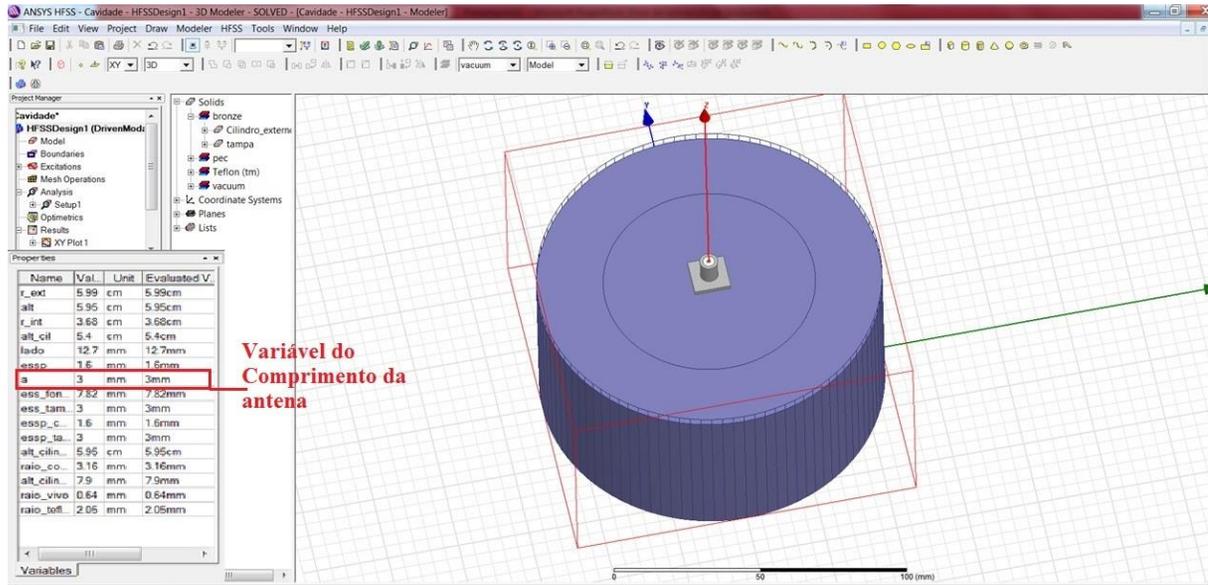
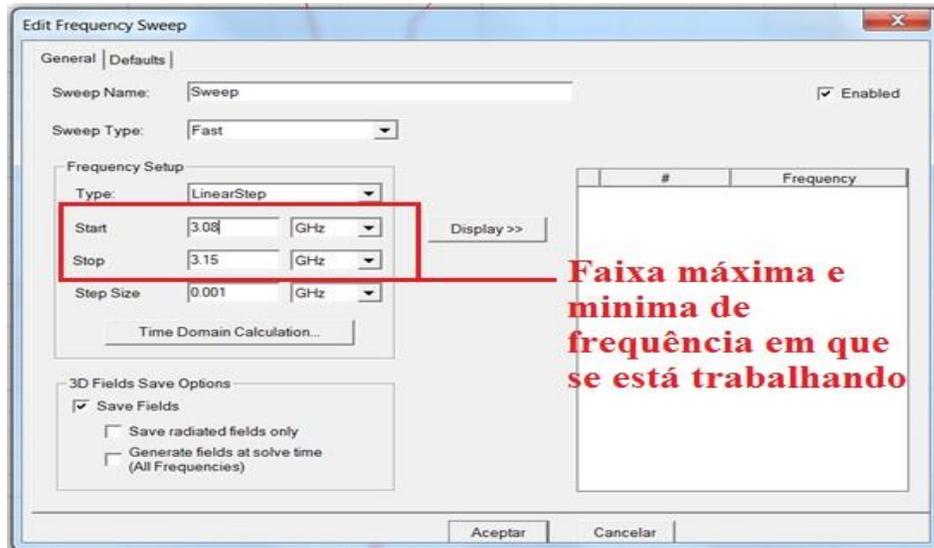
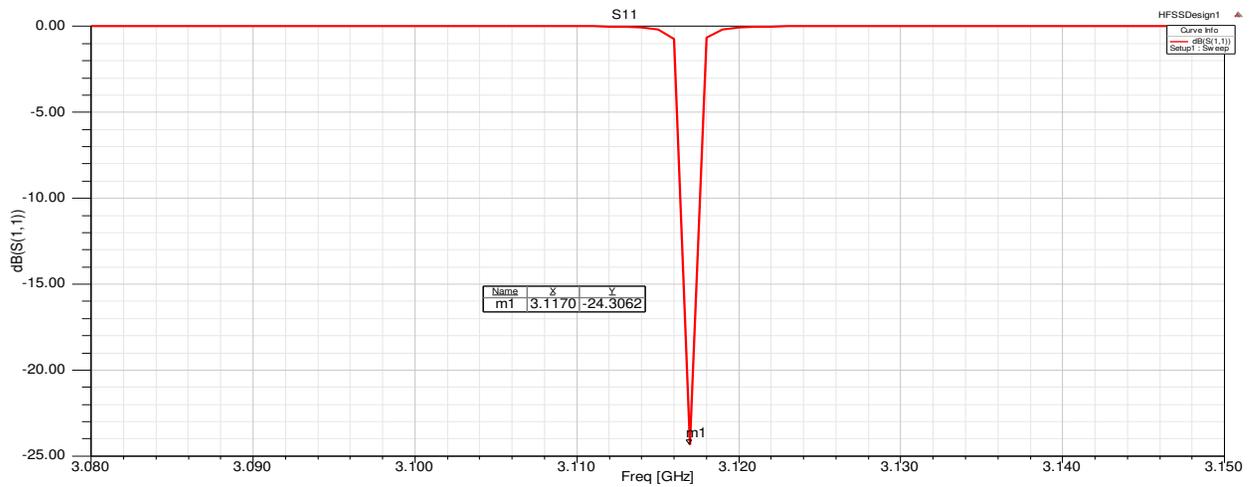


Figura 18 - Ajuste da faixa de frequência na qual o software trabalhou.



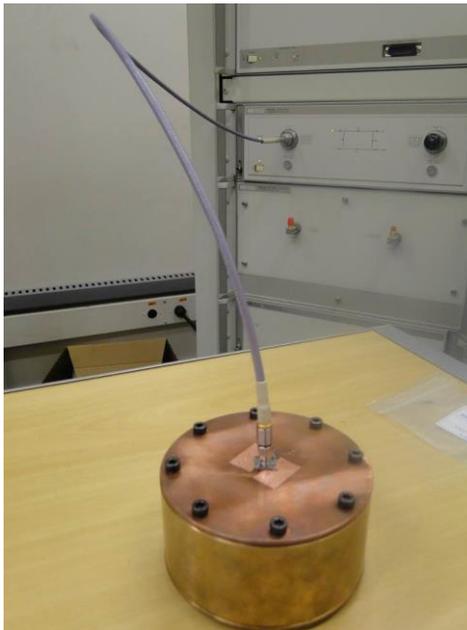
Com 3 mm de comprimento de antena, a faixa de frequência entre 3,08 e 3,15 GHz e com a cavidade nas dimensões já especificadas acima, o parâmetro S11 alcançou um valor de -24,3062 dB na frequência central de 3,1170 GHz (Figura 19). Esses resultados são satisfatórios de acordo com a pesquisa de OLIVEIRA e PINHO (2002).

Figura 19 - Gráfico resultante da simulação com antenas de 3 mm de comprimento, na faixa de frequência de 3,08 a 3,15 GHz.



Após as simulações, foram realizados os ensaios práticos, iniciados pela calibração do HP8517 e posteriormente foi feita a conexão do cabo proveniente do equipamento na parte fêmea do conector da antena (Figura 20). Os primeiros ensaios com a cavidade conectada no analisador foram realizados com a cavidade em vazio, da mesma forma como foi feito na simulação.

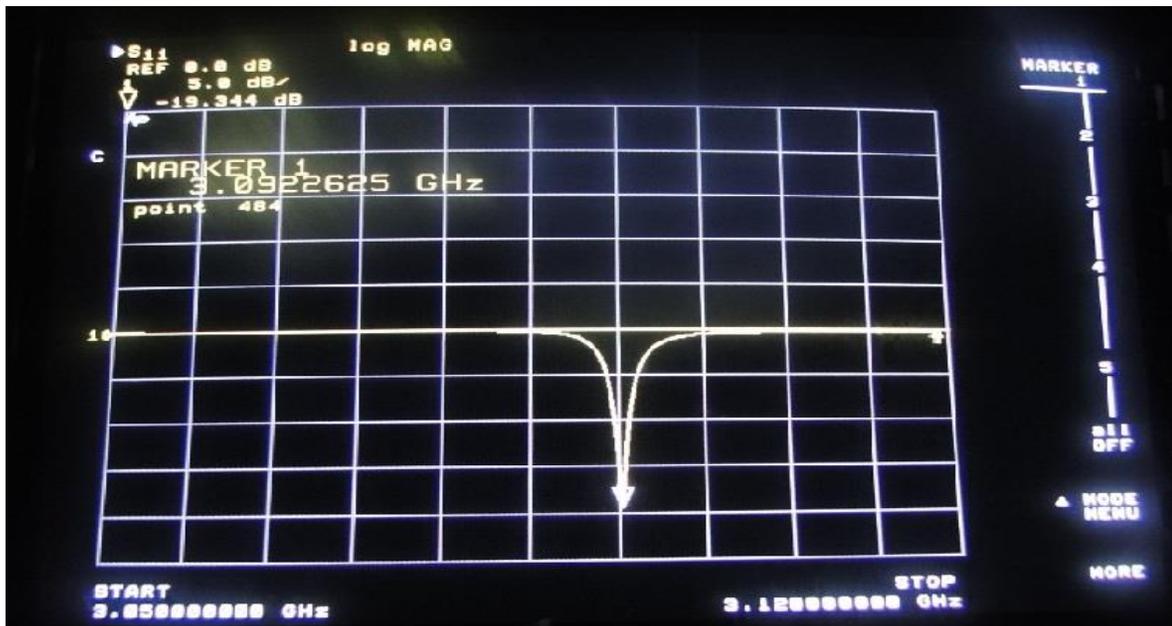
Figura 20 - Conexão da cavidade ao equipamento HP8517.



Estes ensaios práticos, quando realizados com o conector 1, não mantinham a constância de resultados de radiofrequência. Após substituir o conector 1 (cuja antena era soldada) pelo conector 2 (agora parafusado na tampa da cavidade) os resultados apresentaram constância indicando que a fixação da antena é fundamental para a injeção do sinal na cavidade e o retorno do mesmo.

Após a calibração do equipamento HP8517, ele foi ajustado para uma faixa de frequência de 3,05 a 3,12 GHz, conforme Figura 21. Desta forma, foi possível observar que a cavidade ressonou numa frequência central de 3,0922625 GHz apresentando um valor de coeficiente de reflexão (S11) satisfatório de -19,344 dB equiparando-se com os valores simulados.

Figura 21 - Análise da cavidade em vazio, gráfico da frequência central.



Comparando-se os ensaios simulados e os práticos verificou-se que ambos atendem o que foi exposto na pesquisa de OLIVEIRA e PINHO (2002) para a cavidade em vazio. A partir desse resultado positivo de comparação foi possível iniciar os testes com a cavidade perturbada.

4.3 ENSAIOS PRÁTICOS COM A CAVIDADE PERTURBADA

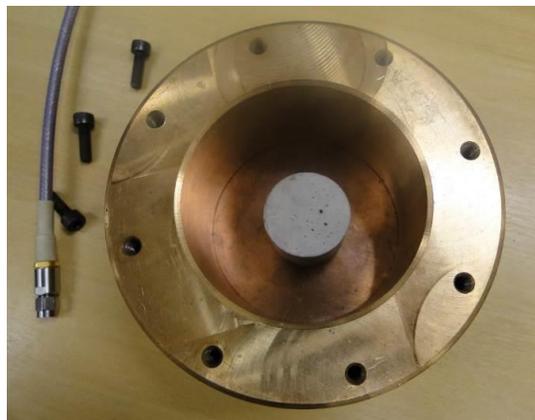
O início dos ensaios com a cavidade perturbada se deu com corpos de prova de pasta de cimento em duas dimensões: 30 mm de diâmetro x 10 mm de altura e 30 mm de diâmetro x 30 mm de altura (Figura 22).

Figura 22 - Corpos de Prova para validar a cavidade com perturbação.



Individualmente foram ensaiados os quatro corpos de prova com o intuito de identificar se esse tamanho de corpo de prova seria adequado para os ensaios. Cada corpo de prova foi colocado de forma centralizada na cavidade conforme a Figura 23.

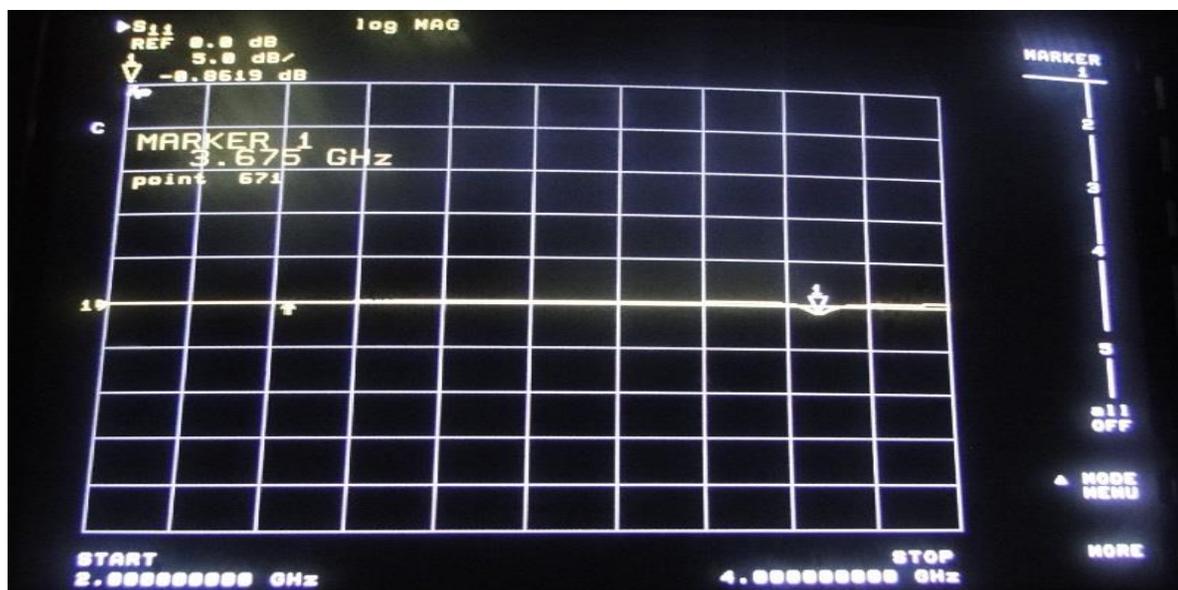
Figura 23 - Corpo de prova disposto no centro da cavidade.



Em nenhum dos quatro corpos de prova foi identificado um resultado satisfatório no ensaio da cavidade perturbada. Novas aferições foram feitas no HB8517 e a faixa de frequência de trabalho foi ampliada de 2 a 4 GHz para de 2 a 10 GHz para verificar a possibilidade de se encontrar o sinal da ressonância. O único sinal de ressonância identificado foi na frequência

central de 3,675 GHz apresentando um retorno de -0,8549 dB, que caracteriza que o corpo de prova provocou uma reflexão quase total do sinal, conforme visualização na Figura 24.

Figura 24 - Cavidade perturbada com o corpo de prova de pasta de cimento de ambas as alturas.



Com esses ensaios entendeu-se que os corpos de prova estavam com dimensões superiores aos permitidos pelo tamanho da cavidade. Os ensaios de OLIVEIRA e PINHO (2002) sugerem trabalhar com um corpo de prova de 0,56 cm de diâmetro e 5,4 cm de comprimento. Seguindo essa recomendação foram moldados corpos de prova de pasta de cimento com traço de 1:0,5 (cimento:água/cimento) (Figura 25), utilizando-se um tubo de alumínio como molde de diâmetro interno de 8,4 mm x 10 mm de altura (Figura 26) e canudos plásticos de diâmetro interno é de 9,30 mm e comprimento de 14 mm (Figura 27).

Figura 25 - Pasta de cimento com traço de 1:0,5.



Figura 26 - Molde de alumínio

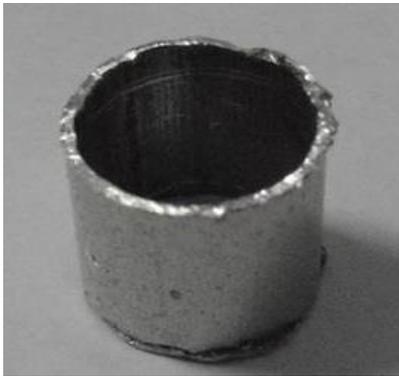


Figura 27 - Molde de canudo plástico.



Figura 28 - Corpos de prova provenientes do molde de alumínio.



Figura 29 - Corpos de prova provenientes do molde de plástico.



Observando-se o acabamento dos corpos de prova e analisando-se a facilidade para deformá-los foram escolhidos os corpos de prova provenientes do molde de tubo plástico (Figura 29), cujo volume é de $950,5251 \text{ mm}^3$ e desconsiderados os corpos de prova provenientes do molde de alumínio (Figura 28). Para serem testados os corpos de prova selecionados, foi substituído o analisador de redes pelo Agilent Techniligies E5071C (Figura 30) o qual trabalha em uma banda de 300 kHz a 20 GHz. Esse Analisador realiza a mesma função do anterior, porém em uma banda de frequência menor, o que não apresenta problema para o ensaio, já que a ressonância está ocorrendo na faixa de 3 a 4,15 GHz, tendo como vantagem a possibilidade de gravar as imagens.

Após calibrar o equipamento, a cavidade foi analisada em vazio onde apresentou uma ressonância central de 3,0920582 GHz e -11,829 dB (Figura 32). Na sequência foi ensaiada a cavidade perturbada com o corpo de prova de pasta de cimento (Figura 31), a qual apresentou uma frequência central de ressonância de 4,1365105 GHz e -4,7459 dB (Figura 33).

Figura 30 - Ensaio na cavidade em vazio conectado ao analisador de redes Agilent Techniligies E5071C.

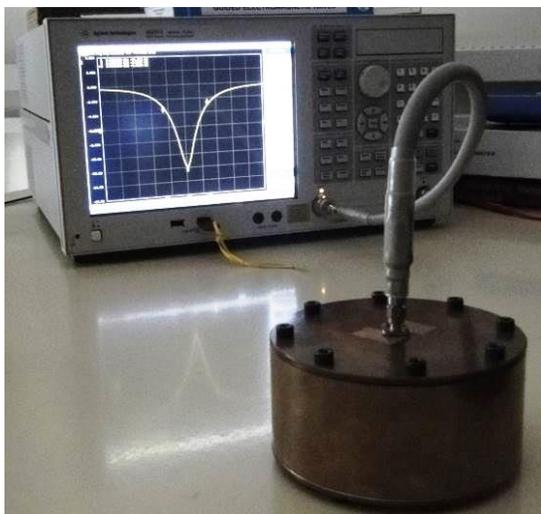


Figura 31 - Corpo de prova no centro da cavidade.



Figura 32 - Análise da ressonância com a cavidade em vazio.

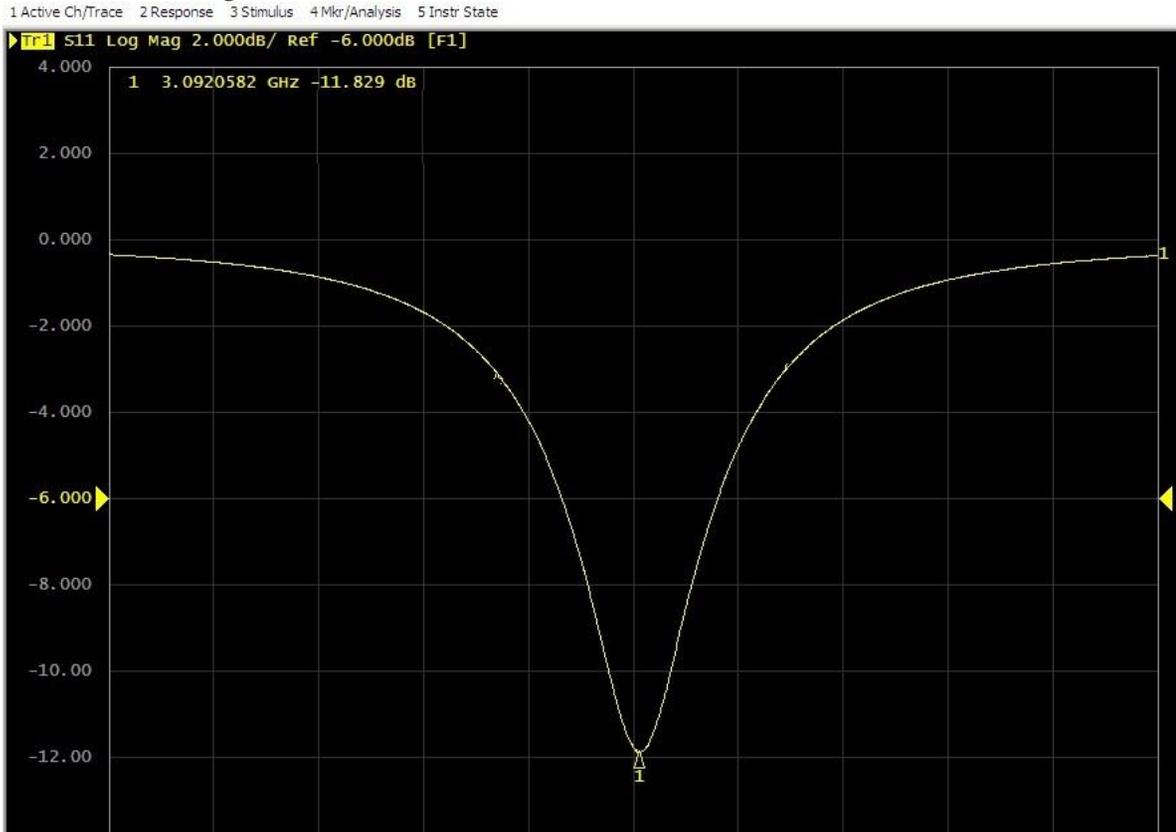
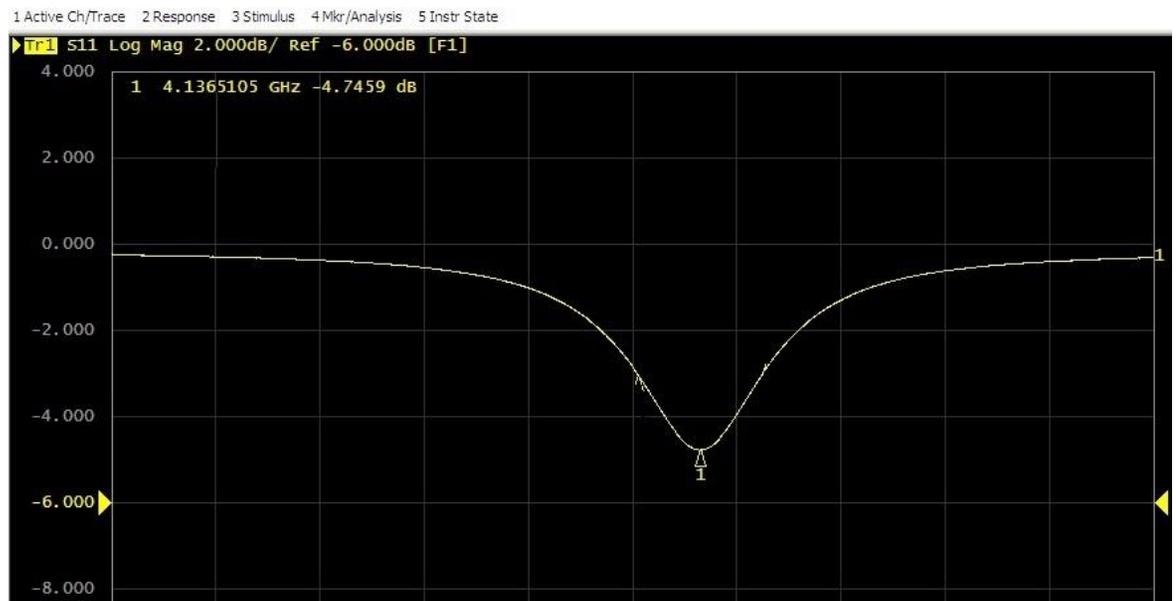


Figura 33 - Análise da ressonância com o corpo de prova no centro da cavidade.



Com o ensaio desses últimos corpos de prova de pasta de cimento, comprovou-se que a cavidade de bronze é própria para essa análise. No entanto, observou-se que a frequência central de ressonância da cavidade em vazio (3,0920582 GHz) é menor que a frequência central de ressonância da cavidade quando perturbada (4,1365105 GHz). Interpretando-se este resultado, concluiu-se que o corpo de prova ainda estava com um volume superior ao compatível com as dimensões internas da cavidade.

4.4 REDIMENSIONAMENTO DA CAVIDADE PARA TRABALHO EM FREQUÊNCIA DE WI-FI E FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Conforme previsto no fluxograma da segunda parte das atividades experimentais da pesquisa, o novo diâmetro interno da cavidade de bronze foi calculado para que a mesma trabalhasse em uma frequência de rede *wireless* (em torno de 2,45 GHz), o que implica num diâmetro de 96 mm, resultando em um volume interno (V) de 520888,32 mm³.

Enquanto a cavidade foi re-usinada para adequá-la ao novo diâmetro interno, os corpos de prova de pasta de cimento também foram redimensionados.

Foram então produzidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, corpos de prova de pasta de cimento sem e com borracha (Figura 37) os quais foram ensaiados à compressão, corpos de prova de pasta de cimento (Figura 38) e outro de borracha (Figura 39) destinados aos ensaios de radiofrequência.

A temperatura no laboratório estava em 22,1°C e a umidade relativa do ar em 62%. Os traços desenvolvidos foram de pasta de cimento com relação água/cimento de 0,5 e de 0,4. A mistura resultante do traço com relação água/cimento de 0,4 apresentou melhor trabalhabilidade, portanto a mesma foi adotada como traço de referência para a adição do resíduo de borracha nos teores de 10% e 25%. Sendo assim trabalhou-se com 4 traços distintos, na caracterização mecânica, onde foram moldados 8 corpos de prova para cada traço. Para o ensaio de radiofrequência, foi utilizada somente pasta de cimento com relação água/cimento de 0,40.

Com base na especificação da ABNT NBR 7215:1997, os moldes cilíndricos de dimensão 50mmx100mm para fabricação dos corpos de prova foram limpos e untados com óleo mineral. Cada material usado na mistura foi individualmente pesado em uma balança com resolução de 0,1g e colocado no misturador metálico, a argamassadeira. O cimento foi acrescentado por último

no misturador já em funcionamento em velocidade baixa. Imediatamente após a mistura de cada traço, o material foi colocado nos moldes em quatro etapas, recebendo em cada uma delas trinta golpes com um soquete metálico. Para os corpos de prova de menor dimensão (6 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura), usados para o ensaio de radiofrequência esse golpeamento foi realizado com uma haste metálica na proporção do molde.

Para a produção dos corpos de prova de pasta de cimento, foi utilizado o cimento de alta resistência inicial, CPV-ARI, cuja massa específica é de $3,08 \text{ g/cm}^3$, ensaios realizados segundo a ABNT NBR NM 23:2001 (Figura 34). Com base na mesma norma foi ensaiada a massa específica da borracha (Figura 35), cujo valor resultante é de $1,2 \text{ g/cm}^3$.

Figura 34 - Ensaio de Massa Específica do cimento CPV-ARI.

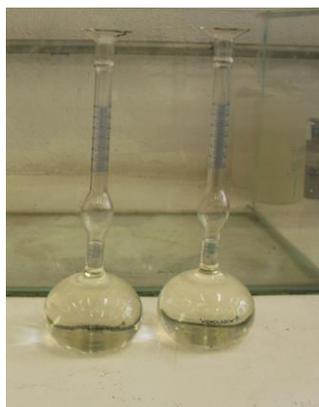
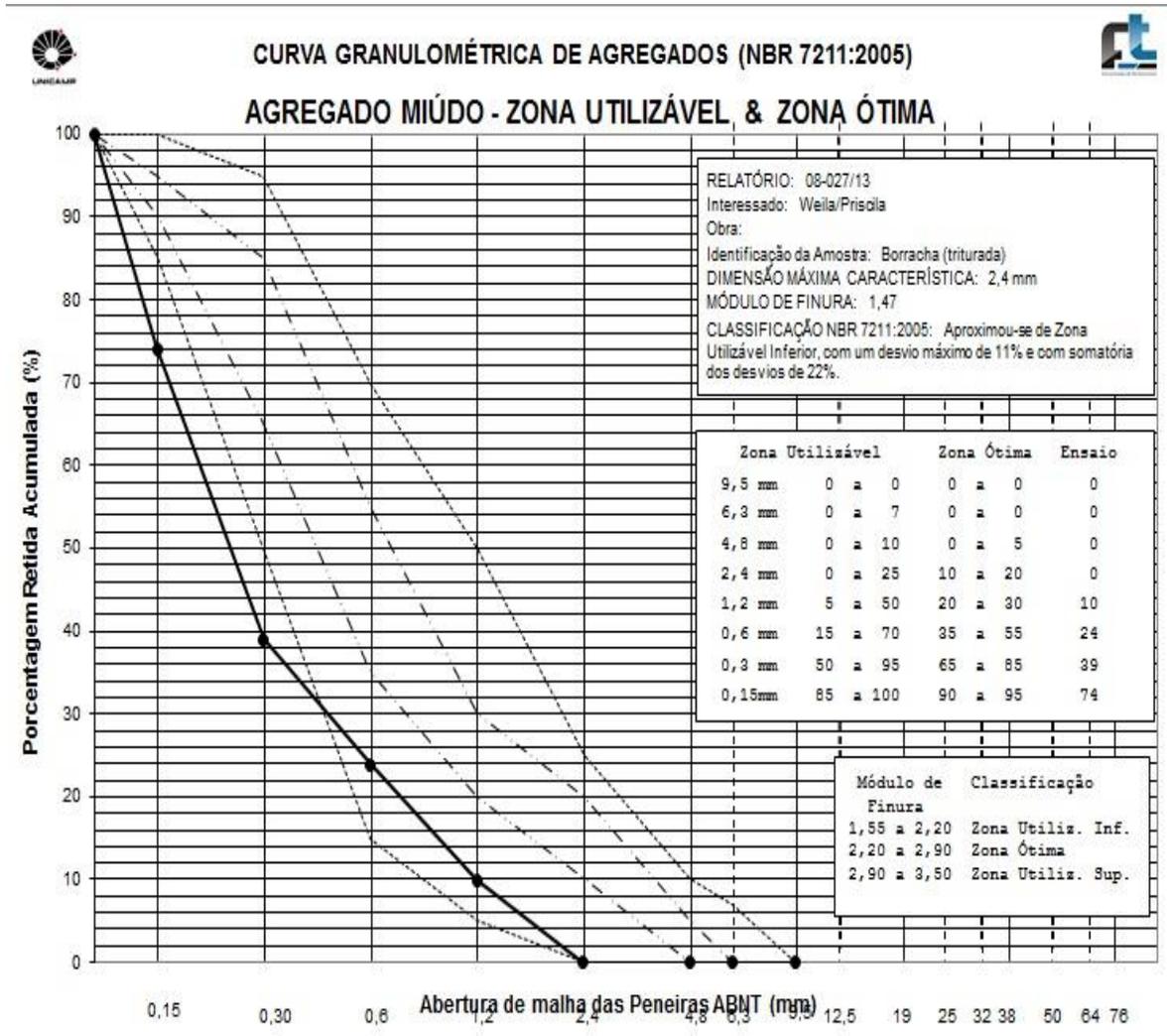


Figura 35 - Ensaio de Massa Específica do resíduo de borracha.



Para a moldagem dos corpos de prova com resíduo de borracha, foram incorporados à mistura borracha com granulometria em torno de 0,15 a 1,2 mm, conforme Figura 36 (ABNT NBR 7211:2005).

Figura 36 - Granulometria do Resíduo de Borracha.



Todos os moldes foram desmoldados após 24h e colocados em câmara úmida até o momento da realização dos ensaios, com exceção do corpo de prova utilizado para o ensaio de radiofrequência, pois como a umidade interfere na medição, o mesmo foi retirado dois dias antes do ensaio e passou por um processo de secagem com ar quente.

Para os ensaios de compressão, foram moldados corpos de prova de dimensão de 50 x 100 mm, conforme ABNT NBR 7215:1997, os quais posteriormente foram ensaiados à compressão aos 7 e 28 dias. A Figura 37 apresenta alguns dos corpos de prova.

Figura 37 - Corpos de prova de pasta de cimento sem e com resíduo de borracha para a realização do ensaio de compressão.



Já para a fabricação dos corpos de prova utilizados para os ensaios de radiofrequência, foram empregados moldes plástico de 6 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura. Dos 4 corpos de prova moldados foi selecionado o de melhor acabamento superficial para ser testado (Figura 38). O corpo de prova de resíduo de borracha proveniente de pneu inservível foi fabricado através da compactação desse resíduo dentro do molde de tubo plástico, conforme ilustra a Figura 39.

Figura 38 - Corpos de prova de pasta de cimento a ser ensaiado quanto à radiofrequência.



Figura 39 - Corpo de Prova de Borracha.



4.4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Conforme ABNT NBR 7215:1997, foram ensaiadas as pastas de cimento sem e com borracha quanto à resistência à compressão aos 7 e 28 dias, sendo rompidos 4 corpos de prova de cada traço para cada uma das duas idades, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de resistência à compressão com os corpos de prova sem e com resíduo de borracha aos 7 e 28 dias.

Peça Concretada	Dimensões do CP		Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)
	d (cm)	h (cm)		
Pasta de Cimento a/c 0,50	5	10	44	46
			41	35
			46	47,9
			44	44
Pasta de Cimento a/c 0,40	5	10	55,9	61,9
			48,9	50,9
			49,9	54,9
			54,9	56,9
Pasta de Cimento a/c 0,40 com 10% de resíduo de borracha	5	10	30	44
			30	39
			30	38
			30	40
Pasta de Cimento a/c 0,40 com 25% de resíduo de borracha	5	10	10	12
			10	11
			10	11
			10	11

Com base nos ensaios de resistência à compressão, é possível observar que quanto maior a relação água/cimento, menor é a resistência à compressão das pastas. Aumentando-se o teor de borracha, verifica-se uma queda na resistência à compressão.

Os corpos de prova de pasta de cimento sem borracha cuja relação a/c é de 0,50 apresentaram uma resistência à compressão muito próxima daquela dada pelos corpos de prova onde a relação a/c é de 0,40 com adição de 10% de resíduo de borracha. Esse ensaio justifica os motivos pelos quais as pastas de cimento com a/c 0,5 foram descartadas como traço de referência pois, além de apresentarem consistência muito fluída, apresentaram também resistência à compressão inferior àquelas obtidas pelas pastas de relação a/c igual a 0,4.

4.4.2 ENSAIOS DE RADIOFREQUÊNCIA

Após usar a cavidade para seu novo dimensionamento interno, algumas melhorias de fixação entre a tampa da cavidade e o conector foram realizadas com o intuito de uma medição mais precisa. Tendo em vista que a cavidade deve ser de material metálico, levando-se em consideração a facilidade de aquisição e usinagem do alumínio em relação ao bronze, e por não haver divergência funcional entre esses materiais, para esses ensaios foi adotado o alumínio para a usinagem de uma nova tampa, que permitiu uma melhor fixação do conector (Figura 40).

Uma segunda ação foi prolongar o comprimento da antena do conector SMA para que ficasse compatível com o comprimento solicitado pelo ensaio. Para isso foi utilizado um fio rígido de cobre com a mesma espessura da antena. A extremidade fixada foi usinada de forma a ficar plana e proporcionar uma solda reta e precisa, conforme mostra a Figura 41. Dando sequência as melhorias, o fundo interno da cavidade foi polido de forma a eliminar os riscos e ranhuras, conforme mostra a Figura 42, evitando-se que o sinal sofresse qualquer perturbação ou desvio.

Figura 40 - Novo Sistema de Fixação do Conector na Tampa da Cavidade



Figura 41 - Conector SMA Fêmea com prolongação da antena.



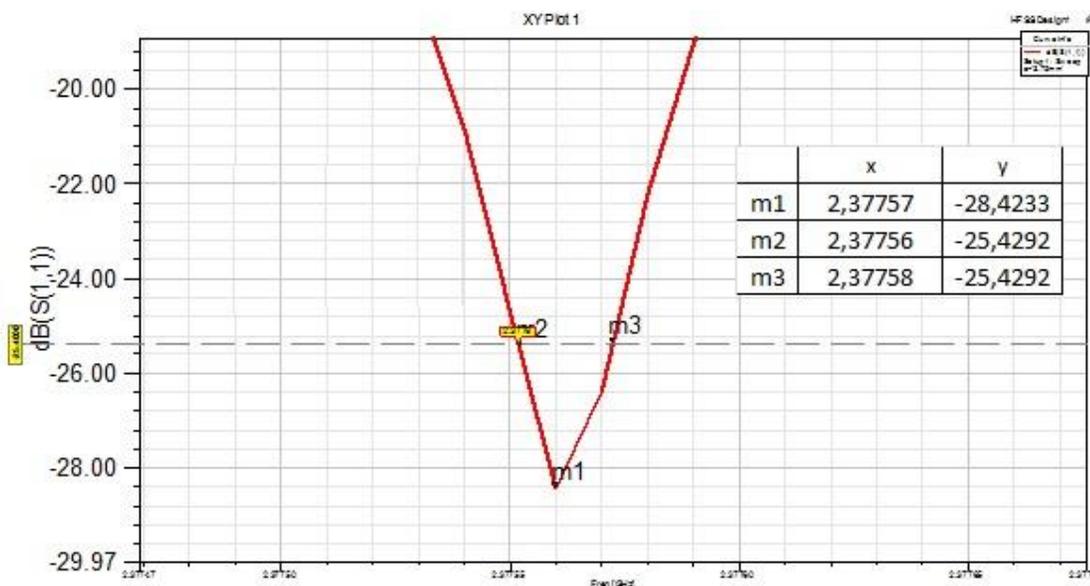
Figura 42 - Cavidade com o interior isento de ranhuras e riscos.



Foram realizadas simulações com a cavidade em vazio utilizando o software HFSS para prever seu comportamento. Também foram realizados ensaios experimentais com a cavidade em vazio para compará-los com a simulação.

Na simulação, cada material que compõe o sistema para o ensaio (cavidade e conector, por exemplo) são tidos como ideais. Essa idealização possibilita um comprimento de antena na ordem de 3,75 mm o que resultou em uma frequência de ressonância central de 2,37757 GHz e a magnitude do parâmetro S11 da ordem de -28,4233 dB, conforme ilustra Figura 43.

Figura 43 - Gráfico da Frequência da Ressonância da cavidade em vazio simulada no HFSS.



Ao efetuar os ensaios físicos com a cavidade e o analisador de redes E5071C, os resultados da frequência de ressonância central são da ordem de 2,3769694 GHz e a magnitude do parâmetro S11 é da ordem de -21,373 dB. Esses valores foram obtidos com uma antena cujo comprimento é de 8,5 mm. A Figura 44 ilustra essas medições.

Figura 44 - Gráfico da Frequência da Ressonância da cavidade em vazio ensaiada com o analisador de redes E5071.



Comparando-se os gráficos apresentados nas Figuras 43 e 44, observa-se que na simulação a largura da curva de resposta da cavidade é mais estreita que a largura da curva de resposta medida na prática, enquanto a frequência central de ressonância permanece quase constante. Isso se explica pela presença de perdas associadas aos materiais no âmbito físico, as quais não foram consideradas na simulação. Por essa mesma razão, na prática, o comprimento da antena se diverge daquele considerado na simulação da cavidade ideal.

Tomando-se por base a Tabela 6, onde de acordo com Fenske e Misra (2000) estão discriminadas as constantes dielétricas e a tangente de perda para cada material, foi escolhido o material teflon para ser ensaiado com o intuito de validar o método de medição que está sendo utilizado. A escolha desse material se deu pela facilidade de obtê-lo e usá-lo em forma de corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 5,45 mm e altura de 10,67 mm, o que resultou em um volume de 248,912843 mm³, conforme Figura 45.

Tabela 6 - Parâmetros característicos de materiais dielétricos a uma frequência de 2,45 GHz.

Material	Constante Dielétrica	Tangente de Perda
Alumina	9	0,0006
Solo arenoso (seco)	2,55	0,0062
Ovo Branco	35	0,5
Quartzo	4	0,0001
Vitro-cerâmica	6	0,005
Nylon	2,4	0,0083
Óleo de Oliva	2,46	0,061
Papel	3 a 4	0,0125 - 0,0333
vidro de soda cal	6	0,02
teflon	2,1	0,0003
poliéster endurecido	4	0,005
Madeira	1 a 2,5	0,004 - 0,4167

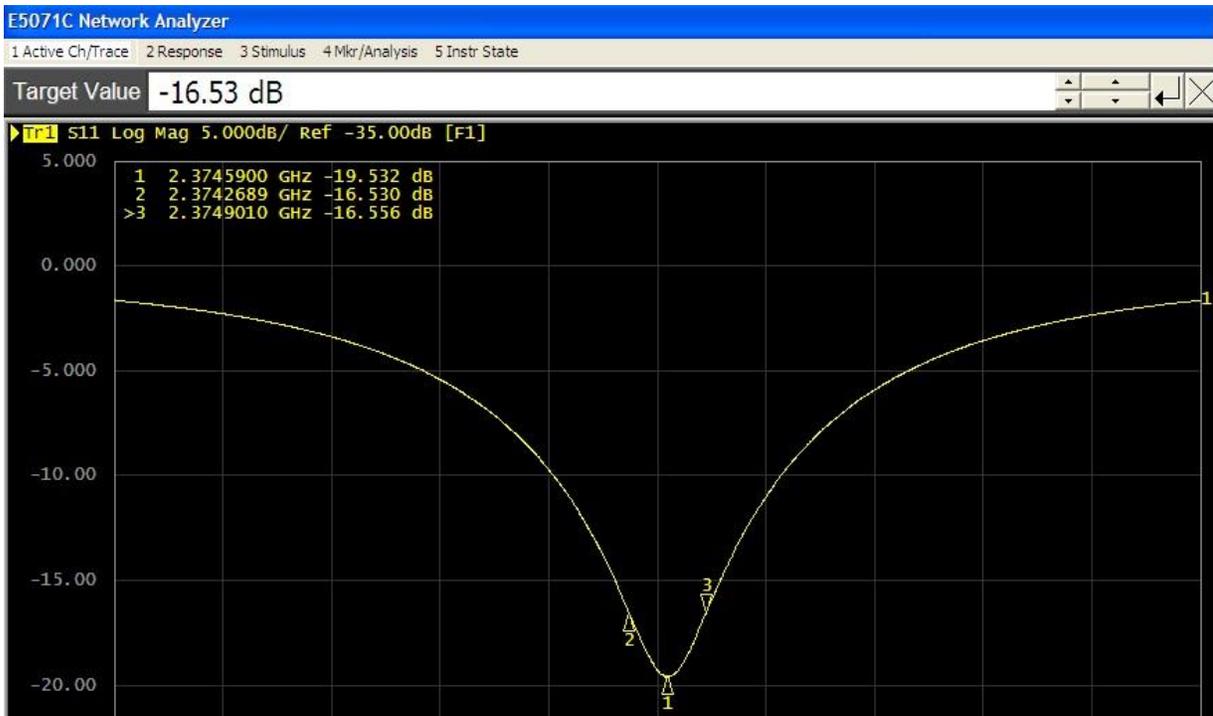
Fonte: Adaptado de FENSKE e MISRA (2000).

Figura 45 - Corpo de prova de Teflon ensaiado como elemento de referência.



Antes de dar sequência ao ensaio de radiofrequência, tanto a cavidade quanto o corpo de prova passaram por um processo de secagem ao ar quente. O resultado do ensaio de radiofrequência para o corpo de prova de teflon pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 - Gráfico do ensaio de frequência da ressonância da cavidade com o corpo de prova de Teflon utilizando o analisador de redes E5071.



Para definir o volume do corpo de prova de pasta de cimento foi preciso ensaiar um corpo de prova de teflon (material cujo valor de constante dielétrica e da tangente de perda já é

conhecido pela literatura conforme mostra tabela 6), para que de posse dos valores obtidos neste ensaio fosse calculada a constante dielétrica e a tangente de perda (conforme item 2.7.4).

Os valores calculados presentes na Tabela 7 foram então comparados com os valores da Tabela 6 para o teflon.

Tabela 7 - Valores de Constante Dielétrica e Tangente de Perda para o Teflon por meio de cálculo com os valores medidos.

V/v	Cálculo do Fator de Qualidade (Q)	ϵ' (Constante Dielétrica)	ϵ''	Tangente de Perda
2092,653451	3756,668249	2,048446179	j0,000271463	0,000132521

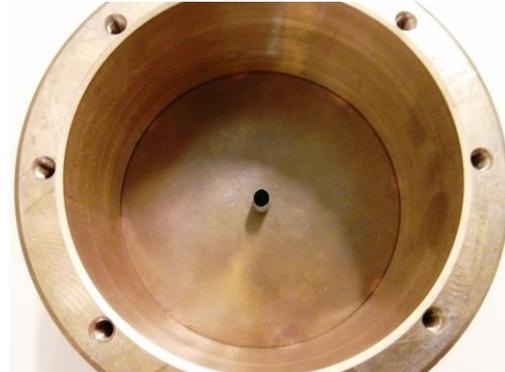
A comparação entre os valores teóricos mostrados na Tabela 6 para o material teflon e os valores medidos experimentalmente, mostrados na Tabela 7, para o mesmo material, apresentam uma correspondência muito boa, ou seja, satisfatória tanto para a constante dielétrica como para a tangente de perda. Este foi um dos principais resultados do trabalho, pois valida a metodologia de pesquisa que está sendo seguida. Vale destacar que foi necessário percorrer um longo caminho de assimilação de todo *KnowHow* para obter esse resultado. Expressa-se como *KnowHow* o treinamento e assimilação com o software e com os instrumentos de medição de RF, bem como toda a preparação dos corpos de prova em dimensões inferiores as normalizadas para os ensaios mecânicos, a descoberta do diâmetro e altura adequada desse então corpo de prova e a detecção das causas que provocaram erros nas medições em inúmeras ocasiões, etc.

Após a secagem dos corpos de prova para garantir que os mesmos estivessem isentos de umidade, estes foram testados sendo colocados no centro da cavidade conforme ilustra as Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Corpo de Prova de Pasta de Cimento dentro da cavidade



Figura 48 - Corpo de Prova de Borracha dentro da cavidade.



Os resultados dos ensaios de radiofrequência nos corpos de prova de pasta de cimento e do corpo de prova de resíduo de borracha tiveram seus valores apresentados em gráficos no analisador de redes *Agilent Technilgies E5071C* conforme ilustram as Figuras 49 e 50.

Figura 49 - Ensaio do Corpo de Prova de Pasta de Cimento.

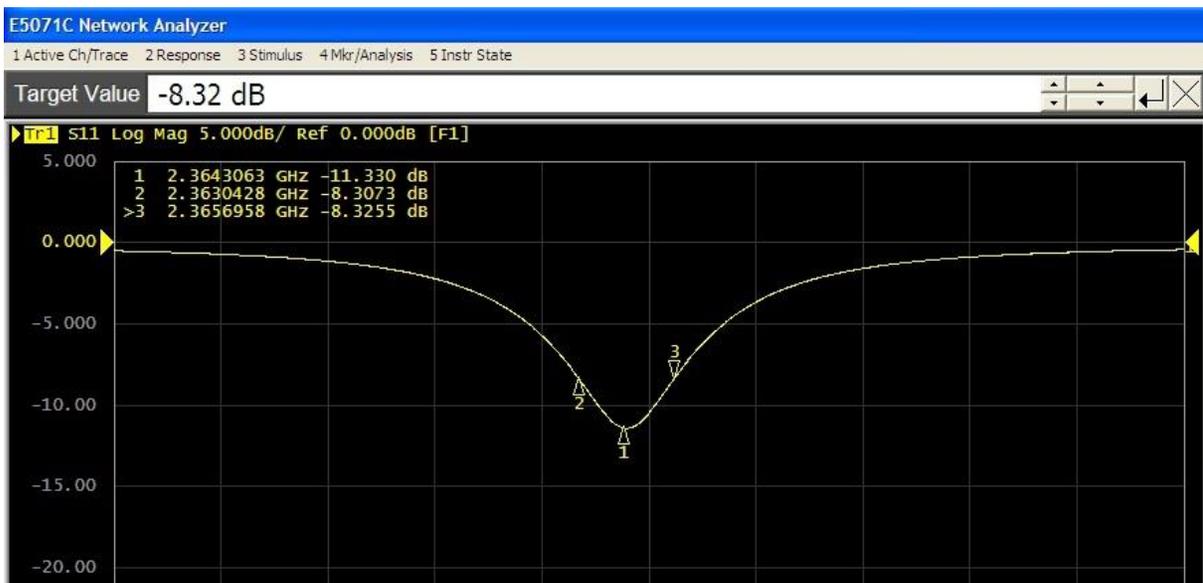


Figura 50 - Ensaio do Corpo de Prova de borracha.



Os valores apresentados na leitura dos gráficos acima (Figuras 49 e 50) permitiram o cálculo para a determinação da constante dielétrica e da tangente de perda (fórmulas vistas no capítulo 2) as quais são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros característicos de materiais dielétricos a uma frequência de 2,45 GHz.

Descrição do corpo de Prova	(v) Volume do corpo de Prova em mm ³	V/v	Cálculo do Fator de Qualidade (Q)	ϵ' (Constante Dielétrica)	ϵ''	Tangente de Perda
Pasta de Cimento	263,195159	1979,095368	8911821711	6,299965269	j0,423739458	0,067260602
Resíduo de Borracha	243,522518	2138,973941	2027,772315	3,38407572	j0,12164215	0,035945459

5. CONCLUSÕES

Conseguiu-se adequar o método da cavidade ressonante para a determinação da permissividade de pastas de cimento e de resíduos de borracha.

Foi concebido um novo procedimento para a fabricação de corpos de prova de pastas de cimento em pequenas escalas, que não está contemplado nas normas comumente empregadas no setor da construção civil.

Foram determinadas experimentalmente as dimensões adequadas dos corpos de prova para serem compatíveis com a utilização do método da cavidade para a caracterização eletromagnética destes materiais.

Com base nos ensaios realizados é possível afirmar que no ensaio de resistência à compressão quanto maior a porcentagem de adição de resíduo de borracha proveniente de pneus inservíveis na pasta de cimento, menor é a sua resistência. Isso se deve provavelmente a capacidade de deformação da borracha e a sua baixa resistência comparada aos sólidos hidratados do cimento.

Em relação aos resultados das medições dos ensaios de radiofrequência, o que se observa é que os valores da tangente de perda e da constante dielétrica do corpo de prova de borracha são praticamente a metade dos valores apresentados pelo corpo de prova de pasta de cimento.

Esse resultado sugere que a mistura de ambos os materiais em proporções adequadas apresentará valores de permissividade intermediários, que poderão apresentar melhores características quanto à propagação de ondas de rádio na faixa de frequência estudada (redes *wireless*).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, **Guia básico de utilização do cimento Portland**, 7º edição. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

AITCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1º edição. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 13116: Cimento Portland de baixo calor de hidratação – Especificação**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 12989: Cimento Portland branco – Especificação**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 9831: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **ABNT NBR 11578: Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos**, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 15498 – Placa plana cimentícia sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio**, 2007.

ANIP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE PNEUMÁTICOS, 2013 –

Disponível em

http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o, acesso em Maio de 2014.

ANTOINE, Robert. **Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1Ghz and GPR measurements for building materials evaluation** 1998. Departamento de Construção Civil, Escola de tecnologia superior, Montreal, Quebec, Canadá, 1998. - Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985198000093>>. Acesso em: Maio/2013.

BAUER, L.A.F. - **Materiais de Construção 1**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ltda., 2007.

BRICKA. **Manual de Placas Cimentícia**, 2012. Disponível em: <www.bricka.com.br/downloads/placas.pdf>. Acesso em: 20.Junho.2013

EDEL, G. **Pneus inservíveis e asfalto: união que beneficia estradas e o meio ambiente**. Anais do SIMPÓSIO SOBRE OBRAS RODOVIÁRIAS – RODO, 2., 2002, São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2002, p.105.

ETERPLAC, **Catálogo Técnico referente a Placas Cimentícia**, São Paulo, 2010. Disponível em: http://www.eternit.com.br/userfiles/ETERPLAC_final%20060110.pdf. Acesso em: 26. Junho. 2013.

FENSKE, Kurt; MISRA, Devendra. **Dielectric Materials at Microwave Frequencies**, The effects of microwave energy on materials are important in industry, biology, medicine and your microwave oven. Applied Microwave & Wireless, University of Wisconsin – Milwaukee, 2000.

FIORITI, Cesar F.; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge L. **Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduo do processo de recauchutagem de pneus**. Acta Scientiarum Technology, Maringá , 2010.

GALLO, Michael A.; HANCOCK, W. M.: **Comunicação entre Computadores e Tecnologias de Rede**, São Paulo, 2003.

GOODYEAR, **Fabricar um pneu, desde a mistura à inspeção**, Disponível em <http://www.goodyear.eu/pt/tire-advice/tire-information/make-a-tire.jsp>, acesso em Maio de 2013.

HANAI, João Bento de - Construções de Argamassa Armada. **São Paulo, SP, Brasil – PINI Publicação: 06/04/2009**, Disponível em: <http://sp.quebarato.com.br/sao-paulo/construcoes-de-argamassa-armada-joao-bento-de-hanai_2CB255.html> Acesso em: Maio/2014.

ISAIA, Geraldo Cechella **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais** Editora IBRACON (instituto Brasileiro do Concreto), volume 1 e 2, São Paulo, 2010.

KATTAR, J. E. & ALMEIDA, N. J. – Cimento Portland, Publicação da Holdercim do Brasil. São Paulo, 1997.

LAGARINHOS, Carlos A. F. **Descarte inadequado de pneus velhos causa problema ambiental. Envolverde Jornalismo & Sustentabilidade.** Redação Agencia USP (Universidade de São Paulo), SP, 2011. Disponível em: < <http://envolverde.com.br/ambiente/residuos/descarte-inadequado-de-pneus-velhos-causa-problema-ambiental/> >, acesso em: 11.2012.

LAGARINHOS, Carlos A. F. **Reciclagem de Pneus: Análise do Impacto da Legislação Ambiental Através da Logística Reversa**, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2011, 291p.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. **Logística Reversa dos Pneus Usados no Brasil**, Polímeros, v. 23, nº 1, p. 49-58, 2013.

LIMA, João Filgueiras. **Escola Transitória – Modelo Rural: experiência com argamassa armada.** Brasília, MEC, 1984.

LINTZ, Rosa C.C.; SEYDELL, Maria R. R.; **Evaluation of tire rubber disposal in concrete for pavements.** Journal of Urban and Environmental Engineering, v.3, n.2 (2009), p.52-57. ISSN 1982-3932. doi: 10.4090/, Campinas, SP, Brasil.

LINTZ, Rosa C.C.; GACHET – BARBOSA, L. A.; SEYDELL, Maria R. R.; JACINTHO, Ana E. P.G. de A. **Avaliação do Comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados.** Artigo Desenvolvido pela Faculdade de Tecnologia da UNICAMP em parceria com o Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da PUC-CAMPINAS, publicado na Revista de Engenharia Civil UMINHO, n37,

2010. Disponível em: < [http://www.civil.uminho.pt/revista/n37/Artigo%202%20\(pag17-26\).pdf](http://www.civil.uminho.pt/revista/n37/Artigo%202%20(pag17-26).pdf) >. Acesso em: novembro/2013.

MATTOS, Marluza; **Pneu velho, Problema novo, fórum associação civil alternativa terrazul**, 2006. Disponível em: <www.terrazul.m2014.net/spip.php?article407> acesso em: 12.Junho.2012
MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3ª Edição, São Paulo, IBRACON, 2008.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. Editora IBRACON, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, Jesiel A.; PINHO, João T. **Medição da Permissividade Elétrica de Produtos Naturais** 2002. Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica – Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002. Disponível em: < http://www.ufpa.br/gedae/SBMO2002_02.PDF >. Acesso em: Outubro/2012.

OLUTOLA, Jonah; STAVROS V. Georgakopoulos. **Wireless Power Transmission to Sensors in Reinforced Concrete Via Magnetic Resonance** 2012. Departamento de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Internacional da Florida, Miami, Florida, 2012. Disponível na Base de Dados ieeexplore.ieee.org. Acesso em: Fevereiro/2013.

OLUTOLA, Jonah; STAVROS V. Georgakopoulos. **Wireless Power Transfer in Concrete via Strongly Coupled Magnetic Resonance** 2013. Departamento de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Internacional da Florida, Miami, Florida, 2013. Disponível na Base de Dados ieeexplore.ieee.org. Acesso em: Fevereiro/2013.

OPN CALLA, S. K. Mishra, BOHRA, Dinesh et al., **Design a tunable cavity resonator for complex permittivity measurement of low-loss material at L band**. Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 46, pp 134-138, Fevereiro/2008.

PAULA, Adriano L.de **Método Para Determinação da Permissividade Elétrica e Permeabilidade Magnética de Materiais Isotrópicos Com Suporte Computacional**, 2010. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, INPE, São José dos Campos, SP, 2010.

PELLEGRINI, Alberto L. M. **Análise de Propagação de Sinais de Radiofrequência 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. Disponível em: <<http://repositorio.uniceub.br/bitstream/123456789/1009/1/20387365.pdf>>. Acesso em 29.junho.2013.

PEZENTE, Jorge H. **Placas Cimentícias**, disponível em: <www.escolher-e-construir.eng.br>. Acesso em 20/Junho/2013.

PONTES, Gabriel. **A Utilização de placas cimentícia em sistemas construtivos** 2010. Arquiteto do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Arquitetônico (IBDA) – Fórum da Construção. Disponível em <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=8&Cod=770>>. Acesso em: Junho/2013.

Resolução CONAMA nº 416/2009 - **Relatório de Pneumáticos 2012, Dados Apresentados no Relatório de Pneumáticos** (relativo ao ano de 2011) - Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/category/4?download=5702%3Arelatrio-pneumticos-2012>>. Acesso em: Abril/2013.

RODRIGUES, Josiane do. C. **Planejamento de Redes de Comunicação Sem Fio para Ambientes Indoor Considerando os Efeitos da Polarização das Antenas: Abordagem Baseada em Medições**, 2011. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Tecnologia (ITEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Belém, Pará, 2011.

RODRIGUES, Mara R. P. **Reaproveitamento de pneus inservíveis na construção civil.** I Simpósio sobre Resíduos Sólidos da USP – São Carlos, 2006.

RODRIGUES, Mara R. P.; FERREIRA, Osny P. **Compósito Cimentício com Adição de Partículas de Borracha de Pneus Inservíveis.** Pesquisa e Tecnologia Minerva, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, Brasil, 2006.

SEGRE, Nádia Cristina. **Reutilização de Borracha de Pneus usados como Adição em Pasta de Cimento.** Tese de Doutorado do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1999.

SILVA, Anderson Porto; SOARES, Bruno Tarouco. A. **Wi-Fi e WiMAX I: Características do Wi-Fi.** Trabalho de Graduação Interdisciplinar da Faculdade de Computação e Informática, da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2009. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialww1.pdf>>. Acesso em: 05.06.2013

TAVIERA, Alberto F da S.; BARRETO, Mauro J.M.; NAMORANDO, Margareth N.; CAMPELO, Nilton de S.; VASCONCELOS, Raimundo P. de, **Avaliação da Utilização do Agregado de Concreto Reciclado (ACR) e Resíduo de Borracha na Fabricação de Argamassa.** 2012. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON – Maceió, Alagoas, 2012.

VASCONCELOS, A. R. B. - **Análise experimental da durabilidade de concretos de alto desempenho com adição de resíduo de borracha de pneu e cinza da casca de arroz.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira –SP, 2009