

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO BONFIM SEGOBIA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE VERMICULITA
EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS MIÚDOS CONVENCIONAIS
PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2016

PEDRO BONFIM SEGOBIA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE VERMICULITA
EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS MIÚDOS CONVENCIONAIS
PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel, do curso de Engenharia
Civil, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. MSc. Carlos Eduardo
Tino Balestra.

TOLEDO

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 052

Contribuição ao estudo da aplicação da vermiculita em substituição aos agregados miúdos convencionais para produção de concretos estruturais.

por

Pedro Bonfim Segobia

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15:50 h do dia **8 de novembro de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado aprovado.

Profº Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)

Profª Dra Lúcia Bressiani
(UTFPR – TD)

Prof MSc. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. MSc Silvana da Silva Ramme
Coordenadora da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

À Deus pelas bênçãos, oportunidade, cuidado e esperança.

Às memórias de Davi Segobia pelo exemplo de pai, filho, esposo e amigo, pela paixão pelo estudo, pelos exemplos e contra-exemplos da vida.

À Rosely Carminatte pela confiança, amor e carinho.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade de cursar minha graduação em uma universidade pública, gratuita e de qualidade, pelos conhecimentos adquiridos nos últimos 5 anos, pela esperança de que Ele está no controle de tudo e principalmente pelo êxito da pesquisa pretendida neste trabalho.

Agradeço ao meu orientado professor MSc. Carlos Balestra pela orientação neste trabalho, sugestões e comentários valorosos, contribuição ao meu conhecimento e pela disposição e atenção com a qual sempre me atendeu.

Agradeço aos professores Dra. Lucia Bressiani e Dr. Gustavo Savaris pelas contribuições ao trabalho.

Agradeço aos técnicos de laboratórios Eng. Marcos Vinicius e Eng. Wilson Loebet e ao colega Valdeir de Caldas que me auxiliaram nas atividades de laboratório para realização dos ensaios e moldagem dos corpos de provas.

Agradeço aos companheiros de faculdade que estiveram comigo durante esse período me apoiando e dando forças a continuar.

E por fim, agradeço a minha família, Rosely Carminatte (mãe) e Danna Segobia (irmã), que esteve sempre me apoiando durante o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

SEGOBIA, Pedro Bonfim. Contribuição ao estudo da aplicação da vermiculita em substituição aos agregados miúdos para produção de concretos estruturais. 2016. – 71f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2016.

O mercado da construção civil tem avançado e aprimorado técnicas de construção que veem permitindo o acréscimo de novos materiais e componentes no seu setor. Com isso, a aplicação de agregados leves em substituição aos agregados do concreto tem se comportado de maneira satisfatória, apresenta-se uma alternativa eficiente. Esse trabalho mostra os efeitos da substituição dos agregados miúdos do concreto convencional pela vermiculita nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, ainda o impacto do custo gerado por esta substituição. Os agregados utilizados neste trabalho, vermiculita, areia e brita, foram caracterizados para que fosse determinado o traço do concreto pelo método da ABCP. O cimento utilizado na pesquisa foi o CII-Z-32. O traço de referência dosado pela ABCP foi 1:1,20:2,36:0,43, a partir deste traço foram feitas 5 variações de substituição da areia pela vermiculita, 20, 40, 60, 80 e 100%. A consistência do concreto perde trabalhabilidade quando adicionada vermiculita, contudo o intervalo de 0 a 60% de substituição apresentou abatimento mínimo de 100 mm, que foi o proposto na dosagem. Por ser um agregado leve, com microestrutura porosa, a vermiculita aumentou a absorção de água para todas as porcentagens de substituição, no intervalo de 0 a 40% de substituição o aumento passou de 3,48% para 4,75%, sendo este o melhor intervalo para de absorção de água. A resistência à compressão do concreto diminuiu, o intervalo de 0 a 40% de substituição manteve-se superior a resistência utilizada no cálculo do traço, para as porcentagens de 60 e 80% a resistência ficou abaixo, porém acima de 20 MPa, que é a resistência mínima para concreto estrutural, quando temos a substituição total da areia a resistência fica abaixo dos 20 MPa. O módulo de elasticidade também diminuiu com a substituição da areia pela vermiculita. A massa específica do concreto diminuiu de 2,5 a 13% com a substituição da areia pela vermiculita, porém este decréscimo não é suficiente para obter-se concreto leve estrutural. A aplicação da vermiculita em substituição a areia como agregado miúdo no concreto aumenta o custo em até 30%. Sendo assim, a substituição parcial da vermiculita aos agregados miúdos convencionais do concreto mostra-se viável.

Palavras-chave: Vermiculita expandida, agregado leve, concreto estrutural.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Austrália Square Tower (Austrália).....	10
Figura 2: Ponte Flutuante Nordhordland (Noruega).	11
Figura 3: Ponte da Baía de São Francisco (USA).....	12
Figura 4: Vermiculita expandida	13
Figura 5: Argila Expandida	18
Figura 6: Espectro de agregados leves.....	19
Figura 7: Processo de fabricação da vermiculita.....	21
Figura 8: Equipamentos para o ensaio de massa unitária	29
Figura 9: Agitador mecânico e conjunto de peneiras para o ensaio de granulometria do agregado graúdo	33
Figura 10: Conjunto de peneiras para o ensaio de granulometria do agregado miúdo	33
Figura 11: Materiais para realização do ensaio de massa específica do cimento.	34
Figura 12: Equipamentos para o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone	36
Figura 13: Máquina Universal para o ensaio de compressão.....	39
Figura 14: Abatimento vs substituição da areia.....	45
Figura 15: Abatimento do concreto com 0% de substituição.....	45
Figura 16: Abatimento do concreto com 100% de substituição.....	46
Figura 17: Absorção de água por imersão vs substituição da areia.	47
Figura 18: Resistência à compressão do concreto vs substituição da areia.	49
Figura 19: Gráfico da evolução da resistência à compressão do concreto.	50
Figura 20: Resistência à compressão e absorção de água vs substituição de areia.....	50
Figura 21: Módulo de elasticidade do concreto vs substituição da areia.....	51
Figura 22: Resistência à compressão e Módulo de elasticidade do concreto vs substituição da areia.	52
Figura 23: Resistência à compressão vs módulo de elasticidade.	53
Figura 24: Massa específica do concreto vs substituição da areia.....	54
Figura 25: Massa específica vs substituição de areia.	55
Figura 26: Custo por m ³ de concreto vs substituição da areia.....	56
Figura 27: Curva de Abrams.	64

Lista de Tabelas

Tabela 1: Consumo aproximado de água (l/m ³)	26
Tabela 2: Volume do agregado graúdo compactado por m ³ de concreto (m ³)	27
Tabela 3: Características da areia para a dosagem do concreto.	42
Tabela 4: Características da brita para a dosagem do concreto.	42
Tabela 5: Característica do cimento para a dosagem do concreto.	43
Tabela 6: Característica da vermiculita para a dosagem do concreto.....	43
Tabela 7: Abatimento do concreto.....	44
Tabela 8: Absorção de água do concreto.....	47
Tabela 9: Resistência média à compressão do concreto.	48
Tabela 10: Módulo de elasticidade do concreto.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE A APLICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES EM CONCRETOS	10
1.2 APLICABILIDADE DE AGREGADOS LEVES NO CONCRETO	13
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	14
1.4 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 AGREGADOS LEVES.....	17
2.1.1 VERMICULITA	20
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS LEVES	21
2.2.1 TRABALHABILIDADE	22
2.2.2 MASSA ESPECÍFICA.....	23
2.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	23
2.2.4 DURABILIDADE.....	24
2.3 DOSAGEM DE CONCRETO.....	24
2.3.1 MÉTODO DE DOSAGEM ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND).....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 MÉTODOS	28
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS	28
3.2.1.1 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA	29
3.2.1.2 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO.....	30
3.2.1.3 ENSAIO DE GRANULOMETRIA.....	32
3.2.1.5 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO	34
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA VERMICULITA.....	35
3.2.3 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	35
3.2.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	36

3.2.4.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	37
3.2.4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	38
3.2.4.4 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO CONCRETO	40
3.2.5 COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO	41
3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	42
4.2 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO.....	43
NO CÁLCULO DO TRAÇO FOI PRÉ-DETERMINADO UM ABATIMENTO DE 100 MM. TODAVIA, ESTE VALOR APENAS FOI OBSERVADO NAS PORCENTAGENS DE 40 E 60%. PARA AS PORCENTAGENS DE ATÉ 20%, O VALOR DO ABATIMENTO FOI MAIOR QUE O ESPERADO E PARA PORCENTAGENS SUPERIORES A 60% OBSERVOU-SE UM DECRÉSCIMO DO ABATIMENTO.....	44
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO	46
4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	48
4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	51
4.6 MASSA ESPECÍFICA.....	53
4.7 ANÁLISE DE CUSTO DO CONCRETO.....	55
4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS	56
5.1 TRABALHOS FUTUROS	59
ANEXO A – CURVA DE ABRAMS.....	64
ANEXO B – COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO	65
ANEXO C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE A APLICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES EM CONCRETOS

Segundo Rossignolo e Agnesini (2005), o concreto com agregado leve destaca-se como um material consagrado em todo o mundo atualmente devido a sua grande versatilidade de aplicação na construção civil. Segundo os autores, alguns exemplos de aplicação são: pontes, plataformas e estruturas pré-fabricadas conforme apresentado na Figura 1 e Figura 2, onde observa-se a construção de um edifício na Austrália e uma ponte na Noruega respectivamente.



Figura 1: Austrália Square Tower (Austrália).
Fonte: Emporis, 2005.



Figura 2: Ponte Flutuante Nordhordland (Noruega).
Fonte: Roadbook, 2012

Segundo Rossignolo (2009) as primeiras indicações conhecidas da aplicação de concreto com agregados leves são datadas de 1100 a.C., em construções pré-colombianas no México, onde na época, foram utilizadas mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal.

Contudo, foi durante a Primeira Guerra Mundial que o cimento Portland foi utilizado com agregados leves, onde a American Emergency Fleet Building Corporation executou embarcações de concreto com agregado leve, utilizando xisto expandido (ROSSIGNOLO E AGNESINI, 2005).

Na década de 30 surgiram diversos projetos com concreto de agregados leves, como a construção da pista superior da ponte da baía de São Francisco (EUA), conforme Figura 3, gerando uma economia de 3 milhões de dólares em aço (ROSSIGNOLO, 2009).



Figura 3: Ponte da Baía de São Francisco (USA)
Fonte: Profesiduo, 2015.

No Brasil, a utilização dos concretos com agregados leves teve início em 1968, quando foi implantada no interior do estado de São Paulo, na cidade de Jundiaí, uma unidade produtora de argila expandida, possibilitando a produção de elementos pré-fabricados (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Rossignolo (2009) diversas universidades têm desenvolvido pesquisas em torno da tecnologia do concreto com agregado leve. Observa-se que a pesquisa com aplicação do concreto com agregados leves tem aumentando nos laboratórios de pesquisa em todo o mundo, como observado nos artigos publicados, tais como: *Lightweight structural concrete with Aglite aggregate: mix design and properties* escrito por Dhir, Mays e Chua (1984) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Dundee, da Escócia, *The effects of aggregate properties on lightweight concrete* escrito por Lo, Tang e Cui (2006) do Departamento de Construção da Universidade de Hong Kong, da China, *Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent* escrito por Schackow *et al.* (2014) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina, do Brasil, *Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate* escrito por Bogas, Gomes e Pereira (2012) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, de Portugal, *Influência dos agregados leves de argila calcinada nas propriedades mecânicas de concretos estruturais* escrito por Santis e Rossignolo

(2012) da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, do Brasil.

1.2 APLICABILIDADE DE AGREGADOS LEVES NO CONCRETO

Conforme a NM 35/1995 os agregados leves para a produção de concreto leve devem possuir massa unitária menor que 1120 kg/m^3 , e para os agregados graúdos 880 kg/m^3 .

Os agregados leves são classificados em naturais e sintéticos, sendo os naturais produzidos através da britagem de rocha ígneas vulcânicas, e os sintéticos pelo tratamento térmico do material primário de origem do agregado leve sintético, como a argila, folhelho e outros. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Schackow *et al.* (2014) a vermiculita (Figura 4) é formada através da desintegração da mica. Quando a vermiculita é aquecida a $800 - 1100^\circ\text{C}$, esta divide-se em tiras finas, que pode ser utilizada como isolamento solto ou como agregado em um concreto com agregado leve.



Figura 4: Vermiculita expandida
Fonte: Cogumelos Mágicos, 2015.

O *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete* da *American Concrete Institute*, ACI 213R-87, define como Concreto Leve Estrutural o concreto que possui somente agregados leves ou a combinação de agregados leves e convencionais, e

que apresenta aos 28 dias massa específica menor que 1850 kg/m^3 e resistência a compressão acima de 17 MPa.

Além da redução da massa específica, a utilização dos agregados leves acarreta em mudanças significativas em importantes características do concreto como a trabalhabilidade, resistência mecânica, retração, isolamento térmico, resistência a altas temperaturas e a espessura da zona da transição entre o agregado e a matriz do cimento (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

Para Neville e Brooks (2013) quando o agregado leve for utilizado em concreto armado, cuidados para evitar a corrosão da armadura devem ser tomados devido à profundidade da carbonatação, sendo que esta espessura pode ser até duas vezes maior que a do concreto convencional, recomendando um aumento de 10 mm do cobrimento da armadura, quando utilizado agregado leve. Possan (2010) define a carbonatação como o principal fenômeno físico-químico que limita a vida útil do concreto armado, isto ocorre devido à redução da alcalinidade do concreto, favorecendo o processo corrosivo da armadura.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A indústria da construção civil possui grande potencial para o emprego de novos materiais e tecnologias visando à otimização de sua aplicação no setor da construção civil, por isso se fazem necessários estudos para garantir a qualidade do material e da sua aplicação.

A utilização de agregados leve no concreto para fins estruturais permite a possibilidade de utilização de um concreto com massa específica menor, acarretando na diminuição do peso próprio das estruturas, e com isto a redução dimensões dos elementos estruturais de fundação.

Segundo Silva *et al.* (2015) devido ao crescente aumento da demanda por areia natural, estes recursos estão ficando escassos. E essa escassez tem reflexos no custo do agregado e por consequência do concreto, seja fabricado em obra ou usinado. Por isso, é necessário o estudo de novos materiais que possam, substituir integral ou parcialmente a areia como agregado miúdo no concreto. Além disso, conforme citado anteriormente, para otimização da aplicação de novos materiais no

concreto é necessário o estudo dos efeitos da sua aplicação nas propriedades do mesmo tanto em estado fresco quanto em estado endurecido. Desta forma este trabalho visa contribuir com a pesquisa da aplicação da vermiculita como agregado ao concreto dosado segundo o Método da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) para fins estruturais.

A vermiculita, agregado leve que será utilizado neste trabalho, é um minério encontrado no Brasil, com suas principais jazidas localizadas no Nordeste e Centro-Oeste brasileiro, portanto, viabilizando o seu emprego em concretos com agregados leves no país.

No Brasil existem diversas pesquisas com o concreto com agregado leve, como exemplo os laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade de São Paulo. Sendo o agregado leve mais estudado a Argila Expandida, por isso o estudo da Vermiculita, pretendido neste trabalho, é um dos pioneiros no Brasil.

1.4 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é verificar a influência da vermiculita nas propriedades do concreto em estado fresco e endurecido através de substituições percentuais em relação ao agregado miúdo.

1.4.1 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência da vermiculita como agregado no concreto para fins estruturais.
- Avaliar o comportamento do concreto em estado fresco através do ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67/1998.
- Analisar a absorção de água no concreto com agregado leve através do ensaio de determinação da absorção de água por imersão (NBR 9778/1987).

- Analisar a resistência dos corpos de provas de concreto com agregado leve, conforme NBR 5739/1994 Ensaio de Compressão de corpos de provas cilíndricos, moldados conforme NBR 5738/2003.
- Analisar o módulo de elasticidade dos corpos de concreto, conforme NBR 8522:2008.
- Comparar a variação dos custos do concreto produzido com vermiculita, com relação ao concreto convencional.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Toledo.

Os materiais e equipamentos, necessários para os ensaios e moldagem dos corpos de provas, foram aqueles disponíveis no referido laboratório, com exceção da Vermiculita que foi adquirida para os fins da pesquisa.

A brita utilizada é de origem da Pedreira da CMIX Mineração, localizada na cidade de Toledo; e a areia é proveniente do Rio Paraná. A vermiculita utilizada é produzida pela empresa Terra Mater, localizada em Uberaba/MG, e o cimento utilizado é produzido pela empresa Votaram, localizada em Curitiba/PR.

O concreto que foi dosado para fins estruturais com resistência característica de 30 MPa e abatimento de 100 mm.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGREGADOS LEVES

Rossignolo (2009) afirma que os agregados naturais são obtidos através da extração do minério nas jazidas, sendo feita sua classificação granulométrica; já os artificiais em processos industrializados através da sinterização ou por forno rotativo, sendo classificados de acordo com a matéria-prima e o processo de fabricação utilizado.

De acordo com Neville e Brooks (2013) os agregados leves podem ser classificados como:

- Naturais: Diatomita, Pedra Pomes, Escórias, Cinzas Vulcânicas e Tufos;
- Artificiais: Folhelho Expandido, Argila Expandida, Perila e Vermiculita;

Os agregados naturais em sua maioria são de origem vulcânica, e por isso são encontrados somente em algumas regiões, fazendo com que eles sejam pouco utilizados (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Neville e Brooks (2013) explica que o folhelho expandido é obtido pelo aquecimento da matéria prima em forno rotativo, com temperatura de 1000 a 1200°C, com esta temperatura o material sofre expansão devido a geração de gases que ficam aprisionados.

A argila expandida (Figura 5) é produzida em forno rotativo com temperatura de 1100°C, apresenta formado redondo e estrutura esponjosa no núcleo, com baixa permeabilidade possuindo diversas faixas granulométricas para atender a indústria da construção civil (ROSSIGNOLO, 2009).



Figura 5: Argila Expandida
Fonte: Leroy Merlin, 2016.

A perila é uma rocha de origem vulcânica, que quando aquecida a temperaturas elevadas, 900 a 1000°C, expande devido a formação de vapor, formando um material com baixa massa específica, ente 30 e 240 kg/m³ (NEVILEE e BROOKS, 2013).

Segundo Regobello (2007) a vermiculita é um agregado mineral do grupo de minerais micáceos, com estrutura lamelar, e quando aquecida expande, obtendo uma densidade de 100 a 130 kg/m³.

Mehta e Monteiro (2014) apresentam uma comparação dos agregados leves e seus valores de massa específica entre 80 e 900 kg/m³ (Figura 6). A resistência do concreto aumenta se utilizados os agregados mais a direita do espectro, os quais são menos porosos comparados aos agregados à esquerda do espectro. Neste contexto, observa-se que a vermiculita, agregado a ser utilizado neste trabalho, é o agregado mais leve apresentado no espectro.

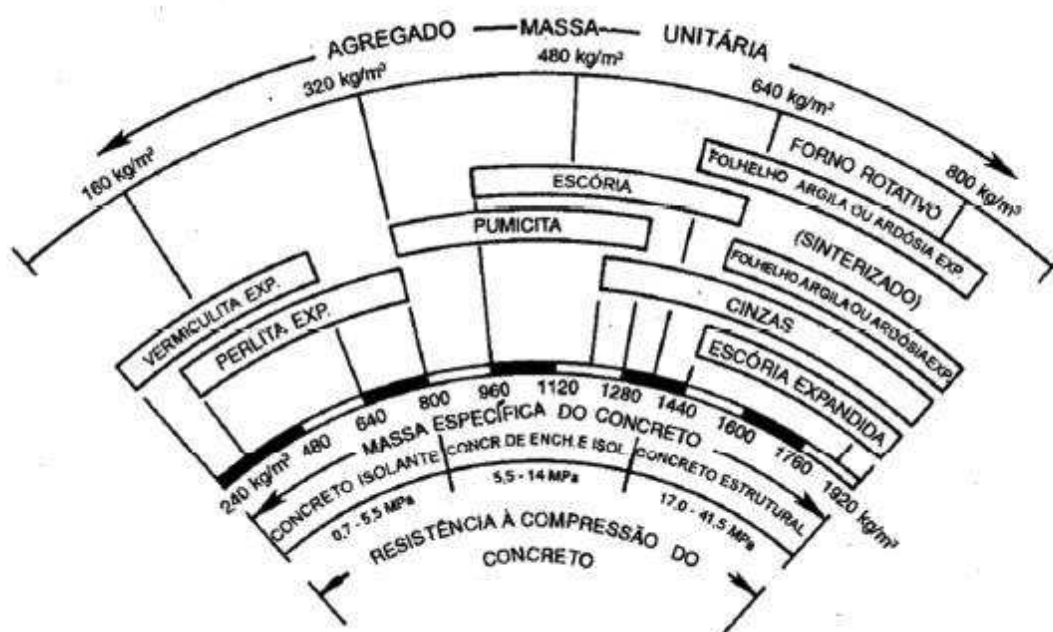


Figura 6: Espectro de agregados leves

Fonte: Mehta e Monteiro, 2014

Quanto às características dos agregados leves Rossignolo e Agensini (2005) ressaltam que suas massas específicas são inversamente proporcionais ao diâmetro, e sua estrutura interna têm importância significativa em sua resistência mecânica por conta de sua porosidade. Desta forma, é possível inferir que uma vez que a massa específica diminui, maior será a porosidade do agregado e menor será sua resistência mecânica.

Neville e Brooks (2013) destacam que os agregados leves para uso em concreto, são mais uniformes dos que os agregados convencionais, devido a sua produção industrializada. Portanto, o uso de agregados leves pode ser utilizado na produção de concretos com qualidade constante.

Conforme Rossignolo (2009) a porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos no estado fresco, no processo de hidratação e conseqüentemente no concreto em estado endurecido. A absorção de água dos agregados é proporcional à consistência do concreto, e no processo de hidratação a água absorvida pelo agregado pode ser desfavorável, influenciado no aumento da retração por secagem, porém há melhoria

na zona de transição entre o agregado e pasta de cimento, além de beneficiar a cura interna do concreto.

2.1.1 Vermiculita

Segundo Luz e Lins (2005) O Brasil possui 10% das reservas mundiais de vermiculita, sendo o país a quarta maior produção mundial, com 5%, sendo os depósitos e jazidas de vermiculita nos estados de Goiás, Paraíba e Piauí.

De acordo com Bauer (2008) a vermiculita é um dos minérios de argila, sendo estes caracterizados como grupos cristalinos, quimicamente inertes, constituído de óxidos de alumínio, silício, ferro e magnésio. Neville e Brooks (2013) complementam definindo a vermiculita com um material natural com estrutura lamelar, que quando submetida a elevadas temperaturas, entre 650 e 1000°C, expande e forma finas lâminas, sendo a que sua expansão pode chegar até 30 vezes do volume inicial, e sua massa específica é de 130 kg/m³.

Conforme com Bauer (2008) quando a vermiculita sofre o processo de expansão, ela se transforma no agregado leve, sendo denominada como vermiculita expandida, tendo a mesma aplicação da argila expandida.

A produção da vermiculita pode ser feita de duas maneiras, conforme Figura 7: o processamento a seco, fluxograma A, e o processamento úmido, fluxograma B.

O processamento a seco necessita de uma etapa de secagem antes da separação, sendo que no processamento úmido esta etapa de secagem não é necessária. No Brasil, o processo a seco é o mais utilizado (LUZ e LINS, 2005).

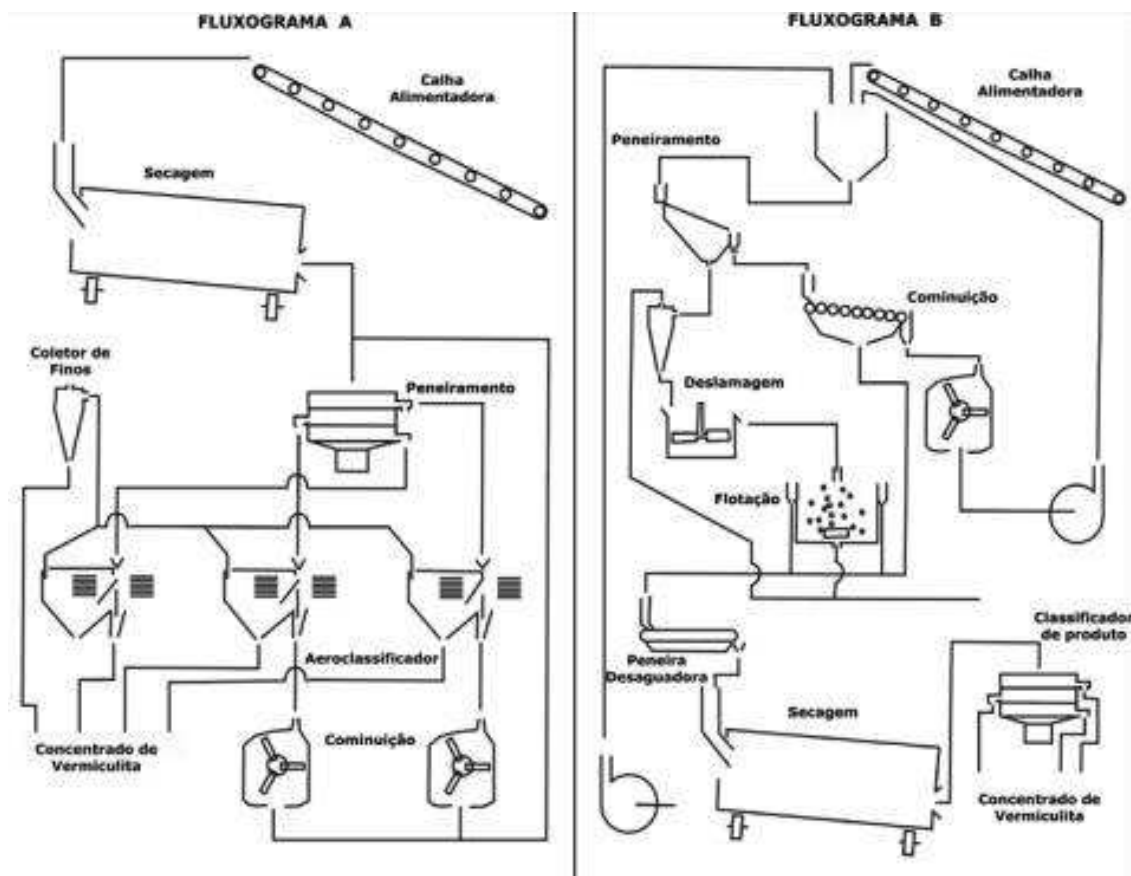


Figura 7: Processo de fabricação da vermiculita

Fonte: Luz e Lins (2005)

O processo de fabricação da vermiculita de acordo com Luz e Lins (2005) consistem basicamente nas seguintes etapas gerais: Extração da matéria prima, secagem ou não dependendo do processo, moagem em moinhos de martelo, e peneiramento para classificação granulométrica.

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS LEVES

O concreto com agregado leve pode ser constituído inteiramente em agregados leves ou em uma combinação de agregados leves e normais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Neville e Brooks (2013) destacam que a substituição parcial dos agregados miúdos convencionais por agregados leves também é possível. Em todo caso, a

substituição deve ser feita pelo mesmo volume, tendo em vista que a massa específica da areia e dos agregados leves pode apresentar grande disparidade.

Assim como para os concretos tradicionais, podem ser utilizados aditivos e adições minerais para modificações de algumas propriedades e características dos concretos estruturais com agregados leves (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

A massa específica e a trabalhabilidade são as duas propriedades geralmente especificadas para o concreto com agregado leve em seu estado fresco (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A massa específica é definida como sendo a relação entre a massa do concreto e seu volume, sendo importante, pois quanto maior for a massa específica, maior será o esforço necessário ao operador para realizar os procedimentos de concretagem. A trabalhabilidade é entendida como a facilidade com que um material pode ser manuseado, assim, este conceito também está relacionado ao esforço do operador para realizar os procedimentos de concretagem.

Para Rossignolo e Agnesini (2005) a massa específica e a resistência à compressão são as propriedades mais utilizadas na caracterização dos concretos com agregados leves, pois estão diretamente relacionadas com o tipo e granulometria do agregado leve utilizado. A massa específica por conta dos efeitos supracitados e a resistência à compressão por conta da resistência que o concreto deve apresentar para a manufatura de um elemento estrutural.

2.2.1 Trabalhabilidade

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o lançamento, compactação e acabamento com concreto com agregado leve exigem menos esforços, para isto sugerem que o abatimento, medido no ensaio de slump, seja entre 50 a 70 mm, ao passo que no concreto convencional o abatimento equivalente seria de 100 a 125 mm.

Contudo Rossignolo e Agnesini (2005) afirmam que concretos com agregados leves com abatimento de 80 mm, possuem trabalhabilidade parecida com concretos convencionais de abatimento de 100 mm.

Rossignolo e Agnesini (2005) afirmam que a variação dos valores de abatimento dos concretos com agregados leves é menor que dos concretos normais, isto ocorre devido à característica de absorção de água pelos agregados leves.

Além do abatimento de tronco de cone, o espalhamento do troco de cone é uma forma de análise para avaliar a trabalhabilidade dos concretos com agregados leves, verificando a deformação do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

Conforme Mehta e Monteiro (2014) a perda do abatimento pode ser causado quando o agregado continua a absorver água depois da mistura, por outro lado este problema pode ser solucionado com a adição do agregado leve na condição úmida, adequando ao fator água-cimento (a/c).

2.2.2 Massa Específica

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que, é normalmente aconselhável ter a maior relação entre resistência mecânica e a massa específica, visando diminuir o peso próprio da estrutura, mas atendendo as restrições quanto à resistência requerida em projeto. Neste contexto, quanto menor a massa específica do concreto produzido, mais leve será a estrutura e conseqüentemente menor será a carga que será transmitida às fundações, permitindo reduzir sua profundidade e tornando a estrutura mais econômica sob uma perspectiva global.

2.2.3 Resistência à compressão

Para Rossignolo e Agnesini (2005) o concreto com agregado leve, utiliza com mais eficiência a resistência mecânica da matriz de cimento, quando comparada com o concreto convencional, em função da similaridade entres os módulos de deformação do agregado e da matriz de cimento. Com isto o concreto tende a romper atravessando o agregado, portanto o agregado é o material determinante na resistência a compressão do concreto.

A evolução dos valores de resistência à compressão dos concretos com agregados leves apresenta uma maior estabilidade dos valores finais de resistência à compressão, quando comparada com o concreto tradicional (ROSSIGNOLO, 2009).

2.2.4 Durabilidade

Rossignolo e Agnesini (2005) afirmam que a durabilidade do concreto depende da permeabilidade, os poros e fissuras dos concretos são os responsáveis pela permeabilidade do mesmo.

O concreto de agregado leve apresenta um grau maior de absorção de água, o que não significa alta permeabilidade; a permeabilidade do concreto com agregado leve é baixa, por isso sua durabilidade a soluções químicas agressivas é bastante satisfatória (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A avaliação da durabilidade do concreto deve-se atentar a estrutura porosa do concreto, se é constituída por poros conectados ou não; este sistema de poros fechados ou abertos afetará a permeabilidade no concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

2.3 DOSAGEM DE CONCRETO

De acordo com Rossignolo (2009) os métodos aplicados para dosagem dos concretos convencionais podem ser utilizados para concretos com agregados leves, contudo devem ser considerados fatores adicionais:

- a) A necessidade de projeto um concreto com massa específica particular;
- b) A absorção de água dos agregados leves;
- c) A variação da massa específica do agregado leve em função da sua dimensão;
- d) A influência das características dos agregados leves nas propriedades dos concretos.

Um ponto importante do processo de dosagem dos concretos com agregados leves é a definição da relação água/cimento efetiva, devido à absorção de água dos agregados. O procedimento mais utilizado é acrescentar na mistura a quantidade de água que é absorvida pelo agregado (ROSSIGNOLO, 2009).

Neville e Brooks (2013) destacam que a substituição parcial do agregado miúdo por agregado leve é possível, e que neste caso a substituição deve ser feita pelo mesmo volume, conforme supracitado.

2.3.1 Método de Dosagem ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland)

Conforme Rodrigues (1983) o método prático de dosagem racional do concreto, elaborado pela ABCP, deriva do método racional proposto pelo *American Concrete Institute* (ACI).

Para a aplicação do método ABCP é necessária à caracterização dos materiais que serão utilizados, agregado miúdo e graúdo e cimento, a fixação das características desejadas do concreto, como a plasticidade e a resistência mecânica, seguir os seguintes procedimentos (RODRIGUES, 1983):

1º Fixação do fator água/cimento, sendo determinado através do ábaco da resistência do concreto pelo fator água/cimento, curva de Abrahms (Anexo A), considerando o tipo do cimento que será utilizado.

2º Determinação do consumo de água (C_w) por metro cúbico, a quantidade de água necessária para o concreto será determinada em função do abatimento desejado e da dimensão máxima característica do agregado graúdo, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Consumo aproximado de água (l/m³)

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (mm)	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRÚDO (mm)			
	9,5	19,0	25,0	32,0
40 a 60	215	185	180	175
60 a 80	220	190	185	180
80 a 100	225	195	190	185

Fonte: Rodrigues (1983)

3º O consumo de cimento (C_c) por metro cúbico, é obtido pela divisão do consumo de água pelo fator água/cimento, conforme Equação 1.

$$C_c = \frac{C_w}{a/c} \quad (1)$$

Onde:

C_c : Consumo de cimento (kg/m³)

C_w : Consumo de água (l/m³)

a/c : Fator água/cimento

4º Determinação do agregado graúdo (C_b) por metro cúbico é dado pela multiplicação do volume aparente, que é função da dimensão máxima característica e do módulo de finura a areia, conforme Tabela 2, pela massa unitária compactada do agregado, de acordo com a Equação 2.

$$C_b = V_c \times M_c \quad (2)$$

Onde:

C_b : Consumo de agregado graúdo (kg/m³)

V_c : Volume aparente (m³/m³)

M_c : Massa unitária compactada (kg/m³)

Tabela 2: Volume do agregado graúdo compactado por m³ de concreto (m³)

MF	Dmax (mm)			
	9,5	19,0	25,0	32,0
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660

Fonte: Rodrigues (1983)

5º O consumo de agregado miúdo, areia, (Ca) por metro cúbico de concreto é dada pela Equação 3:

$$C_a = \left[1 - \frac{C_c}{\rho_c} - \frac{C_b}{\rho_b} - \frac{C_w}{\rho_w} \right] \times \rho_a \quad (3)$$

Onde:

C_a : Consumo de areia (kg/m³)

C_c : Consumo de cimento (kg/m³)

ρ_c : Massa específica do cimento (kg/m³)

C_b : Consumo de agregado graúdo (kg/m³)

ρ_b : Massa específica do agregado graúdo (kg/m³)

C_w : Consumo de água (kg/m³)

ρ_w : Massa específica da água (kg/m³)

ρ_a : Massa específica da areia (kg/m³)

O método da ABCP tem grande aceitação e é empregado em toda América Latina nos dias atuais (HELENE e TUTIKIAN, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os agregados areia e brita e o aglomerante cimento Portland CP II-Z-32 que foram utilizados nesta pesquisa são aqueles disponíveis no laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR Toledo

A vermiculita foi adquirida junto à empresa HumusFértil.

3.2 MÉTODOS

A dosagem do concreto, que foi utilizado como traço inicial, foi feita pelo método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) através do item 2.3.1, sendo ele 1:1,20:2,36:0,43.

Foram realizados ensaios com o concreto com a substituição do agregado miúdo pelas seguintes porcentagens de Vermiculita: 0, 20, 40, 60, 80 e 100%. A substituição foi feita em volume, conforme recomendado por Neville e Brooks (2013).

3.2.1 Caracterização física dos materiais

Para realizar a dosagem do concreto em estudo foi necessário a caracterização física dos agregados.

As características físicas encontradas são: Massa Unitária, Massa Específica Aparente, Granulometria.

3.2.1.1 Ensaio para Determinação da Massa Unitária

A NBR NM 45/2006 (ABNT, 2006) define massa unitária como a relação da massa de agregado lançado em um recipiente pelo volume do recipiente.

Para a dosagem pelo método ABCP, é necessária a determinação da massa unitária compactada da brita.

De acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) os equipamentos necessários para a realização do ensaio de determinação da massa unitária compactada da brita são: balança, haste de adensamento, recipiente e pá, conforme Figura 8. Para a realização do ensaio a amostra deve estar seca. Deve ser determinada a massa e o volume do recipiente, o recipiente deve ser preenchido em 1/3 do seu volume, e com a haste de adensamento compactar a amostra com 25 golpes, fazer o mesmo procedimento para 2/3 e para o enchimento completo do recipiente, e determinar a massa o recipiente com a amostra compactada, sendo a massa unitária dada pela Equação 4.



Figura 8: Equipamentos para o ensaio de massa unitária

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (4)$$

Onde:

ρ_{ap} : Massa unitária (kg/m³)

m_{ar} : Massa do recipiente com o agregado (kg)

m_r : Massa do recipiente (kg)

V : Volume do recipiente (m³)

3.2.1.2 Ensaio para Determinação da Massa Específica Aparente do Agregado Miúdo e Graúdo

A NBR NM 52 (ABNT, 2009) define como massa específica aparente como a relação da massa seca do agregado pelo volume, incluindo os poros permeáveis.

A determinação da massa específica aparente do agregado miúdo foi feita conforme NBR NM 52/2009. Para os agregados graúdos a determinação da massa específica aparente foi feita conforme os procedimentos da NBR NM 53/2009 (ABNT, 2009).

A NM 52 (ABNT, 2009) traz como materiais necessários para a realização do ensaio a balança, frasco, picnometro, com volume de 500 cm³ (V) e estufa. Para a realização do ensaio é necessário secar a amostra na estufa até a constância de massa a uma temperatura de 110°C, após, determinar a massa da amostra seca (m), preencher e aferir a massa do conjunto frasco e amostra (m1), preencher com água o conjunto e aferir a massa (m2).

A NBR NM 52 (ABNT, 2009) apresenta para a determinação da massa específica aparente do agregado miúdo é dada pela Equação 5:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (5)$$

Onde:

d_1 : Massa específica aparente (g/cm³)

m : Massa da amostra seca (g)

V : Volume do frasco (cm³)

V_a : Volume de água adicionada ao frasco (cm³)

O volume de água adicionado ao frasco (V_a) é dada pela Equação 6:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (6)$$

Onde:

V_a : Volume de água adicionada ao frasco (cm³)

m_1 : Massa do conjunto agregado e frasco (g)

m_2 : Massa do conjunto agregado, frasco e água (g)

ρ_a : Massa específica da água (g/cm³)

Para o agregado graúdo a NM 53 (ABNT, 2009) traz como procedimento para a realização do ensaio a secagem da amostra em estufa a uma temperatura de 110°C, aferindo a sua massa, depois saturar a amostra e aferir a massa, e aferir a massa saturada submersa da amostra.

De acordo com a NBR NM 53/2009 (ABNT, 2009) a massa específica aparente será calculada com a Equação 7:

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (7)$$

Onde:

d_a : Massa específica aparente (g/cm³)

m : Massa da amostra seca (g)

m_s : Massa da amostra saturada (g)

m_a : Massa da amostra saturada submersa (g)

3.2.1.3 Ensaio de Granulometria

A granulometria do agregado miúdo e graúdo serão determinadas através do ensaio de composição granulométrica com uso de peneiras com diferentes aberturas de malhas (ABNT NBR NM 248/2003).

Para a dosagem do concreto pelo método da ABCP, é necessário o Módulo de Finura (MF) da areia e o Diâmetro Máximo Característico (DMC) da brita, sendo assim a NM 248/2003 define como módulo de finura a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, considerando somente as peneiras da série normal, dividida por 100.

O diâmetro máximo característico é dado pela máxima abertura da peneira, de série normal ou intermediária, onde apresenta uma porcentagem igual ou inferior a 5% da amostra em massa retida (ABNT, 2003).

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) os equipamentos necessários para a realização do ensaio são a balança, estufa, peneiras da série normal e intermediária, agitador mecânico de peneiras e pincel. Nas Figuras 9 e 10 são apresentados o agitador mecânico e o conjunto de peneiras necessárias para o ensaio de composição granulométrica, respectivamente. Foram utilizadas as peneiras com abertura de malha 12,5, 9,5, 6,3, 4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 milímetros para a caracterização do agregado miúdo e 19, 12,5, 9,5 e 6,3 milímetros para a caracterização do agregado graúdo.



Figura 9: Agitador mecânico e conjunto de peneiras para o ensaio de granulometria do agregado graúdo



Figura 10: Conjunto de peneiras para o ensaio de granulometria do agregado miúdo

O procedimento do ensaio consiste na secagem da amostra em estufa, colocar a amostra nas peneiras e agitar com o agitador mecânico, pesar a massa retida em cada peneira, utilizando o pincel para juntar o material que ficar na peneira e determinar esta massa denominada como massa retida. De posse destes resultados são calculadas as porcentagens retidas e retidas acumuladas.

O ensaio deve ser feito duas vezes, sendo que o a dimensão máxima característica não podem ser diferentes, e a porcentagem em cada peneira não pode divergir em mais de 4%, caso isto repetir o peneiramento (ABNT NBR NM 248/2009). Com os dados de massa retira nas peneiras procede com o cálculo do módulo de finura e do diâmetro máximo característico.

3.2.1.5 Ensaio para determinação da massa específica do cimento

A NBR NM 23 (ABNT, 2001) define como massa específica do cimento Portland a massa de unidade de volume do material.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio, conforme Figura 11, são: frasco volumétrico de *Le Chatelier*, balança, recipiente e termômetro. A amostra deve ser ensaiada deve passar pela abertura da peneira de 150 mm, após isto o frasco de Le Chatelier será cheio com querosene até o nível zero indicado no frasco, registrando a primeira leitura (V1), adicionar a massa da amostra (m) em pequenas porções, após a estabilização registrar a segunda leitura (V2) (ABNT NBR NM 23, 2001).



Figura 11: Materiais para realização do ensaio de massa específica do cimento.

De acordo a NBR NM 23 (ABNT, 2001) a massa específica é dada pela Equação 8:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (8)$$

Onde:

ρ : Massa específica do cimento (g/cm³)

m : Massa da amostra ensaiada (g)

V_1 : Volume da primeira leitura (cm³)

V_2 : Volume da segunda leitura (cm³)

3.2.2 Caracterização física da vermiculita

Foi realizado o ensaio o ensaio de massa unitária, conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006) e o procedimento é o mesmo descrito no item 3.2.1.1.

3.2.3 Ensaio do concreto no estado fresco

Foi realizado o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67/1998), para os concretos com as diferentes porcentagens de Vermiculita.

A NBR NM 67 (ABNT, 1998) determina que o molde do corpo de prova deve ser um tronco de cone oco, com as seguintes dimensões: diâmetro da base inferior de 200 mm, diâmetro da base superior de 100mm e altura de 300mm; e ainda a haste compactação de 16mm de diâmetro com 600mm de comprimento, bem como a placa de base com lados de 500mm e espessura de 3mm, apresentados na Figura 12.



Figura 12: Equipamentos para o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

O procedimento adotado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) é umedecimento do molde e da placa de base, com o molde sobre a placa de base encher o molde com 3 camadas, sendo que cada camada deve ser compactada com 25 golpes da haste de compactação, a retirada do molde deve ser feita em 5 a 10 segundos. Após retirar o molde deve-se medir o abatimento do concreto.

O ensaio será repetido corretamente 3 vezes para cada concreto com a mesma porcentagem de vermiculita.

Conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), o abatimento do concreto será determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado, aproximando aos 5 mm mais próximos. Caso ocorra um desmoronamento ou deslizamento da massa de concreto durante o desmolde de forma que impeça a medição de abatimento será realizado novamente o procedimento. Caso ocorra duas vezes seguidas o concreto não é necessariamente plástico e coeso para aplicar o ensaio de abatimento.

3.2.4 Ensaios do concreto no estado endurecido

Os corpos de provas para os ensaios no estado endurecido serão moldados conforme NBR 5738/2003, sendo a dimensão dos corpos de provas cilíndricos 10 cm x 20 cm. Estes corpos de prova foram adensados manualmente com duas

camadas, sendo aplicados doze golpes em cada camada. Foram feitos 3 corpos de prova para o ensaio de Absorção, 6 para o ensaio de Resistência à Compressão e 3 corpos para o ensaio de Módulo de Elasticidade, conforme descritos nos itens que seguem.

3.2.4.1 Ensaio de Absorção de Água Por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778/2005) foi realizado para determinar o grau de absorção de água decorrente do uso da Vermiculita.

Foram ensaiados 3 corpos de provas para cada concreto com dosagem diferente de vermiculita.

Conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), os aparelhos necessários para a realização do ensaio são: balança hidrostática, estufa e recipiente para imersão dos corpos de provas.

Os procedimentos para realizar o ensaio consistem em determinar a massa da amostra ao ar ambiente, após determinar a massa da amostra com permanência na estufa de 24h, 48h e 72h. Determinada a massa após a secagem em estufa manter nas primeiras 4h os corpos de provas imersos em água em 1/3 do seu volume, nas próximas 4h subsequentes completar os 2/3 do volume, determinar a massa com 24h, 48h e 72h a partir do início da imersão.

O ensaio de absorção de água é necessário para a análise da durabilidade do concreto, uma vez que quanto maior a taxa de absorção de água do concreto, maior será sua degradação por conta do ingresso de substâncias agressivas ao interior do mesmo.

Segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005) absorção de água por imersão é dada pela Equação 9:

$$Ab\% = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

Ab : Absorção de água (%)

M_{sat} : Massa saturada (g)

M_s : Massa seca (g)

3.2.4.2 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão de corpos de prova seguiu a NBR 5739/2007, e tem como objetivo determinar a resistência do concreto dosado com vermiculita e o de referência.

Conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007) para a realização do ensaio é necessário da Máquina de compressão, apresentada na Figura 13, e do paquímetro para determinação das medidas dos corpos de provas. O procedimento do ensaio é: determinar as dimensões de diâmetro e altura dos corpos de provas, romper os corpos de prova as idade de 7, 14, 21 e 28 dias, sendo 6 amostras ensaiadas para cada idade.

Foram ensaiados 24 corpos de provas para cada concreto com variação de vermiculita na sua composição. Os corpos de provas foram moldados conforme a NBR 5738/2003 com diâmetro de 10 cm, sendo suas extremidades retificadas antes do ensaio para regularização de seus topos.

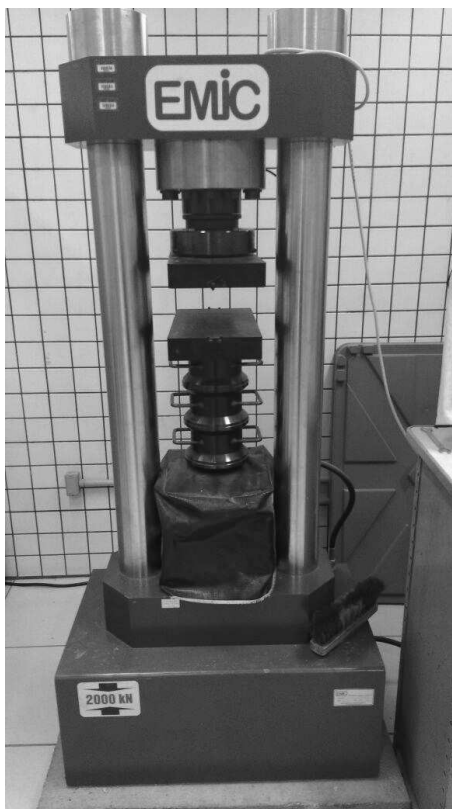


Figura 13: Máquina Universal para o ensaio de compressão

A resistência à compressão foi calculada através da Equação 10, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007):

$$f_c = \frac{F}{\left(\frac{\pi \times D^2}{4}\right)} \quad (10)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão (MPa)

F : força máxima resistida (N)

D : diâmetro do corpo de prova (mm)

3.2.4.3 Ensaio de módulo de elasticidade à compressão

O ensaio de módulo de elasticidade à compressão de corpos de prova seguiu a NBR 8522/2008, e tem como objetivo determinar o módulo de elasticidade

do concreto dosado com vermiculita e compara-lo com o módulo de elasticidade obtido para o concreto de referência.

Conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008) para a realização do ensaio é necessário da Máquina de compressão, apresentada na Figura 13, medidores de deformação, bases de medida e do paquímetro para determinação das medidas dos corpos de provas.

Foram ensaiados 3 corpos de provas para cada concreto com variação de vermiculita na sua composição, na idade de 48 dias para as porcentagens de 0 e 20% de substituição, 46 dias para 40 e 60% de substituição e 41 dias para 80 e 100% de substituição da areia pela vermiculita.

3.2.4.4 Determinação da massa específica aparente do concreto

Para isto foi seguidos os procedimentos da NM 35/1995, ou seja, pesar os corpos de provas após a cura aos 28 dias, posteriormente a mostra é saturada para pesar sua massa nesta condição, e depois é aferida a massa através da balança hidrostática, onde o corpo de prova fica submerso.

Foi calculada a massa específica aparente do concreto com as diferentes porcentagens de vermiculita. A massa específica aparente será calculada com a Equação 11:

$$\rho_{ah} = \frac{m_a}{m_b - m_c} \times \rho_a \quad (11)$$

Onde:

ρ_{ah} : Massa específica aparente (g/cm³)

m_a : Massa do corpo de prova, após a cura, 28 dias (g)

m_b : Massa do corpo de prova saturada (g)

m_c : Massa do corpo de prova saturada submerso (g)

ρ_a : Massa específica da água (g/cm³)

3.2.5 Composição do custo unitário

Segundo Helene e Terzian (1992) é possível determinar a correlação entre o consumo de cimento e o traço através de dados experimentais, baseando-se na Lei de Molinari; com isto apresentam a Equação 12 para determinação do consumo de cimento por m³ de concreto.

$$C = \frac{\gamma}{1+a+p+a/c} \quad (12)$$

Onde:

C : Consumo de cimento (kg/m³)

γ : Peso específico do concreto (kg/m³)

a : Traço de areia

p : traço de brita

a/c : Fator água-cimento

Com o consumo de cimento, multiplicar-se pelo traço e encontrar o consumo dos agregados necessários para a produção de 1 m³ de concreto.

Para determinação do custo unitário será utilizada o Relatório de Preço de Insumo do mês de Agosto de 2016 do Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices da Construção Civil – SINAPI, com exceção da vermiculita que foi cotada em 3 empresas da região do oeste paranaense, utilizando-se a média.

3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os resultados dos ensaios experimentais foram analisados através da Análise de Variância, ANOVA, com o programa ASSISTAT através do parâmetro F de Levene.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TRAÇO DE REFERÊNCIA

Para a dosagem do concreto utilizado foi necessário realizar a caracterização dos materiais que foram empregados na produção do concreto, os ensaios realizados são os descritos no item 3.2.1, ficando o material assim caracterizado:

Areia:

Tabela 3: Características da areia para a dosagem do concreto.

Característica	Valor
Massa Específica Aparente	2,63 g/cm ³
Massa unitária solta	1,57 g/cm ³
Módulo de Finura	2,02

Brita:

Tabela 4: Características da brita para a dosagem do concreto.

Característica	Valor
Massa Específica Aparente	2,65 g/cm ³
Massa unitária compacta	1,67 g/cm ³
Dimensão Máxima Característica	19 mm

Cimento:

Tabela 5: Característica do cimento para a dosagem do concreto.

Característica	Valor
Massa Específica Aparente	3,10 g/cm ³

Vermiculita:

Tabela 6: Característica da vermiculita para a dosagem do concreto.

Característica	Valor
Massa unitária solta	0,139 g/cm ³

Para o cálculo do traço do concreto, feito conforme item 3.2.1, foi preciso definir o valor de abatimento de 100 mm, resistência de projeto (fck) de 30 MPa e um desvio padrão de qualidade na produção do concreto de 5,5%, quando o concreto será feito em massa, com cuidados medianos. Com isto, determinou-se o traço do concreto utilizado neste trabalho:

1:1,20::2,36:0,43.

O trabalho propôs analisar 6 variações de porcentagem de substituição da areia pela vermiculita, em volume.

4.2 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO

A consistência do concreto foi analisada pelo ensaio de abatimento de tronco de cone. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Abatimento do concreto.

Substituição	Abatimento (mm)
0%	120
20%	110
40%	100
60%	100
80%	75
100%	60

Como observado na Tabela 7, o abatimento do concreto diminui conforme a substituição da areia pela vermiculita, e esta diminuição pode ser descrito através de uma relação linear conforme observado na Figura 14. Isto acontece, pois a vermiculita absorve água durante a mistura.

No cálculo do traço foi pré-determinado um abatimento de 100 mm. Todavia, este valor apenas foi observado nas porcentagens de 40 e 60%. Para as porcentagens de até 20%, o valor do abatimento foi maior que o esperado e para porcentagens superiores a 60% observou-se um decréscimo do abatimento.

O concreto com as 6 variações de vermiculita apresentou-se visualmente coeso.

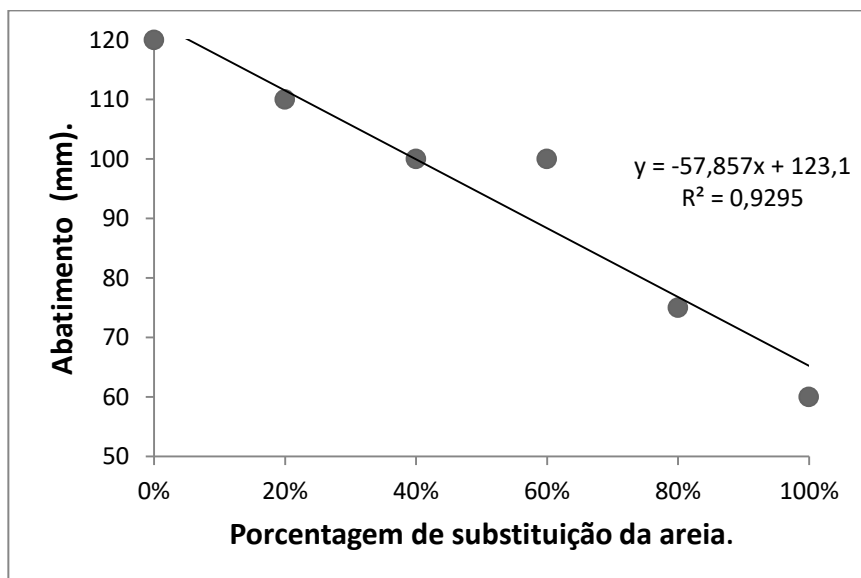


Figura 14: Abatimento vs substituição da areia.

É possível descrever o abatimento do concreto através de uma equação linear, com R^2 de 0,9295, sendo $y = -57,857x + 123,1$.

O abatimento diminuiu 50% quando foi substituída integralmente a areia pela vermiculita, como pode ser observado na Figura 15 e Figura 16.



Figura 15: Abatimento do concreto com 0% de substituição.



Figura 16: Abatimento do concreto com 100% de substituição.

Assim sendo, a vermiculita diminui a trabalhabilidade do concreto, portanto as substituições de 80 e 100% não são interessantes para fins estruturais, pois sua baixa trabalhabilidade poderá acarretar em dificuldade nas etapas de lançamento e adensamento do concreto.

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO

A absorção de água no concreto foi determinada pelo ensaio de absorção de água por imersão e os resultados são apresentados na Tabela 8.

É possível observar na Figura 17 o aumento da absorção de água com a maior a substituição da areia pela vermiculita.

Tabela 8: Absorção de água do concreto.

Substituição	Absorção de Água (%)
0%	3,48
20%	4,75
40%	4,28
60%	6,24
80%	5,45
100%	8,43

A diminuição dos valores de absorção de 20 % para 40% e de 60% para 80% acontece devido ao adensamento do concreto, uma vez o adensamento é fundamental na determinação de vazios do concreto.

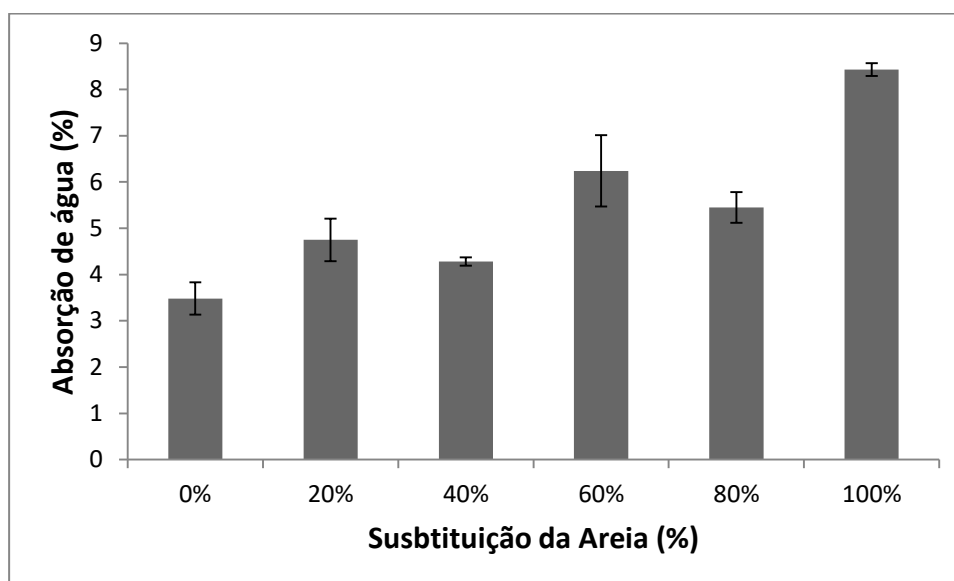


Figura 17: Absorção de água por imersão vs substituição da areia.

A absorção de água no concreto aumenta com a substituição de areia pela vermiculita. Isto ocorre devido a maior absorção de água que a vermiculita possui dada sua microestrutura porosa. A substituição integral da areia acarretou em um aumento de 142% do valor da absorção.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência à compressão do concreto é a sua principal propriedade, e neste trabalho ela foi determinada através do ensaio de compressão uniaxial. Os dados obtidos passaram pelo tratamento de análise de variância através do programa ASSISTAT, sendo os valores determinados neste estudo a um nível de 1% de probabilidade. Os valores das médias de resistência à compressão são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resistência média à compressão do concreto.

% de Substituição	Resistência à Compressão (MPa)			
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
0	37,83	41,84	42,10	45,88
20	28,92	34,38	34,84	38,45
40	27,81	30,82	33,27	35,08
60	22,20	23,16	27,06	26,46
80	21,32	20,96	24,16	27,12
100	13,82	16,03	18,38	19,86

O concreto com 100% de substituição não alcançou 20 MPa de resistência aos 28 dias, que é a resistência mínima para concreto estrutural, portanto não pode ser empregado para fins estruturais.

O concreto com substituições de 60 e 80% de vermiculita, embora apresentem resistência superior a 20 MPa, estão mais de 10% a baixo da resistência à compressão (fck) de 30 MPa, determinada no cálculo do traço.

Nas substituições de 20 e 40% o concreto está mais de 10% acima da resistência de projeto, que é de 30 MPa, porém até 30% menor do que a resistência do concreto sem vermiculita. Portanto, a vermiculita foi responsável por diminuir a resistência do concreto.

Conforme a Figura 18 descrever-se o decréscimo de resistência em uma equação do 1º grau de forma satisfatória com R^2 igual a 0,9697, sendo $y = -25,285x + 44,547$.

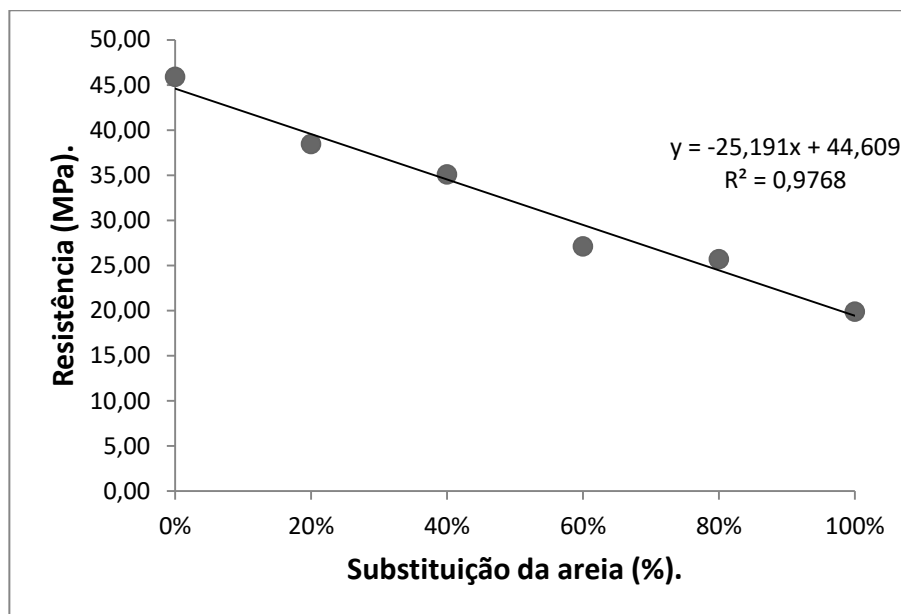


Figura 18: Resistência à compressão do concreto vs substituição da areia.

A evolução da resistência à compressão do concreto, apresentada na Figura 19, quando utilizada a vermiculita os valores são mais estabilizados, ou seja, a variação da resistência entre as idades finais são menores que a do concreto sem vermiculita, principalmente aos 28 dias.

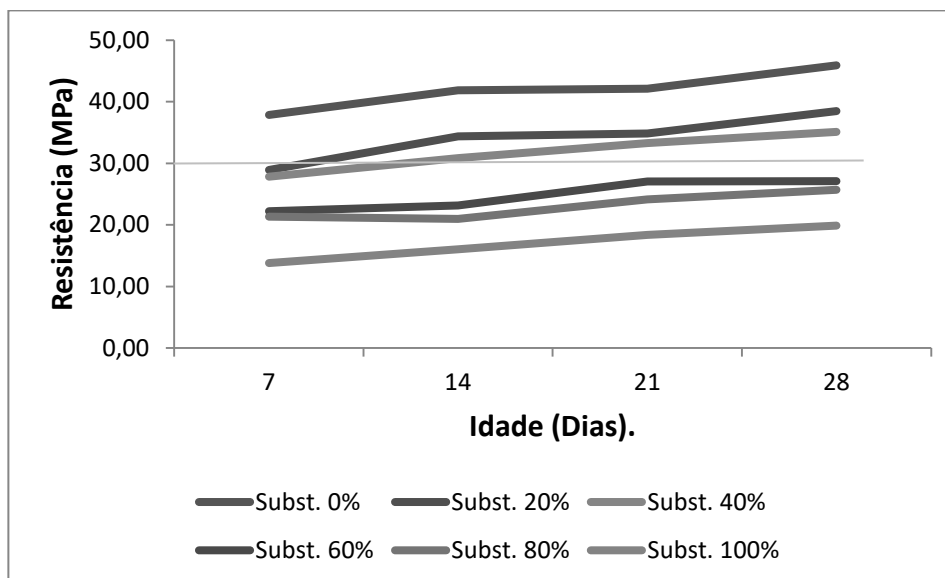


Figura 19: Gráfico da evolução da resistência à compressão do concreto.

A absorção de água do concreto é inversamente proporcional à resistência à compressão, devido a quantidade de vazios no concreto, conforme pode ser visto na Figura 20.

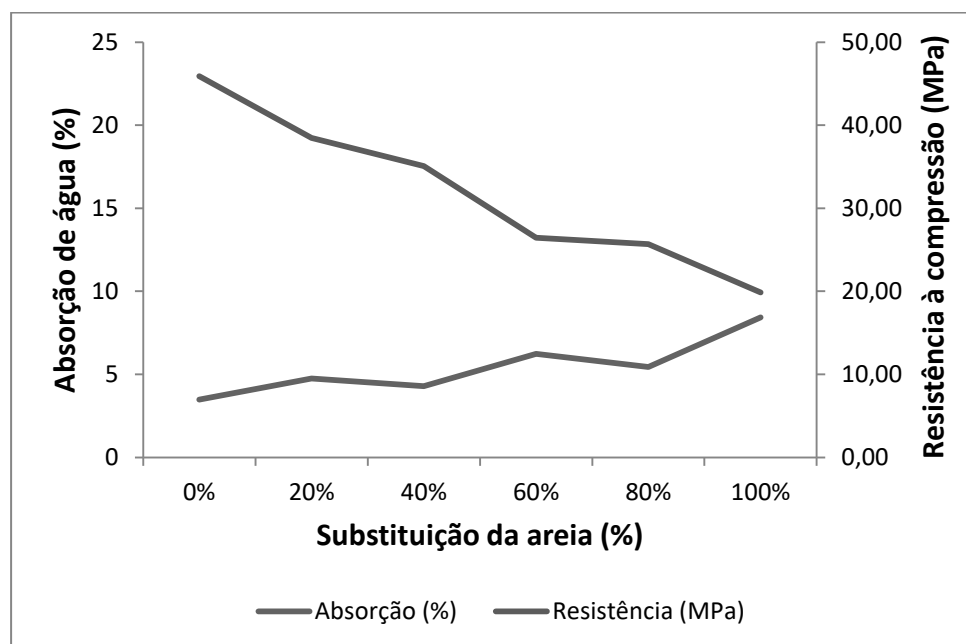


Figura 20: Resistência à compressão e absorção de água vs substituição de areia.

4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

A determinação do módulo de elasticidade do concreto é apresentada na Tabela 10.

É possível observar o decaimento do valor do módulo de elasticidade do concreto, conforme o aumento da porcentagem de substituição da areia pela vermiculita na Figura 21.

Tabela 10: Módulo de elasticidade do concreto.

Substituição	Módulo de Elasticidade (GPa)
0%	30,13
20%	26,53
40%	23,30
60%	18,67
80%	17,87
100%	13,60

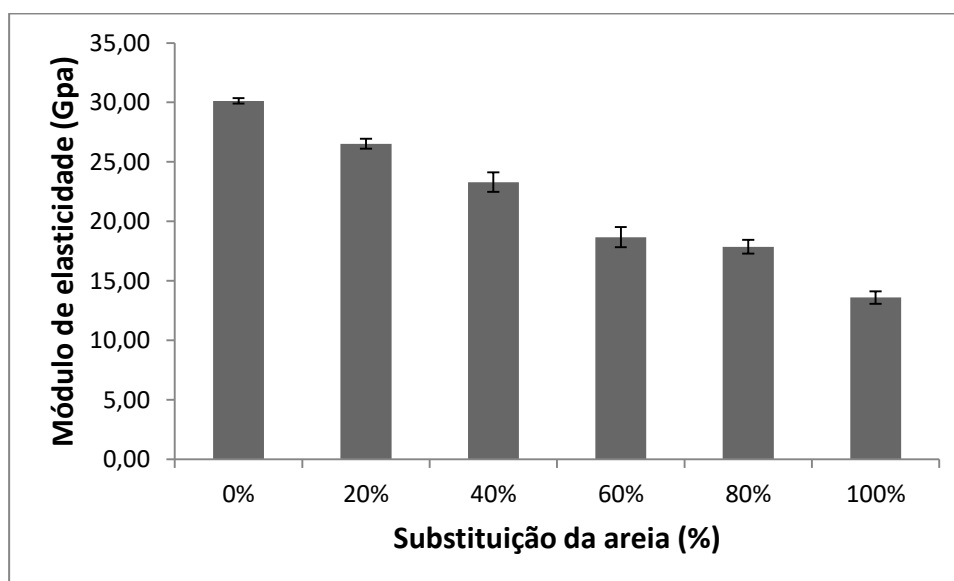


Figura 21: Módulo de elasticidade do concreto vs substituição da areia.

O decréscimo do módulo de elasticidade do concreto com vermiculita é considerável, sendo de mais de 10% para o concreto com 20% de substituição e 45% para o concreto com substituição total da areia.

Esta diminuição no valor do módulo de elasticidade acontece devido à estrutura interna da vermiculita, bem como da diminuição da resistência à compressão, pois o módulo de elasticidade e a resistência à compressão são diretamente proporcionais, ou seja, aumentam quando a outra aumenta, conforme Figura 22.

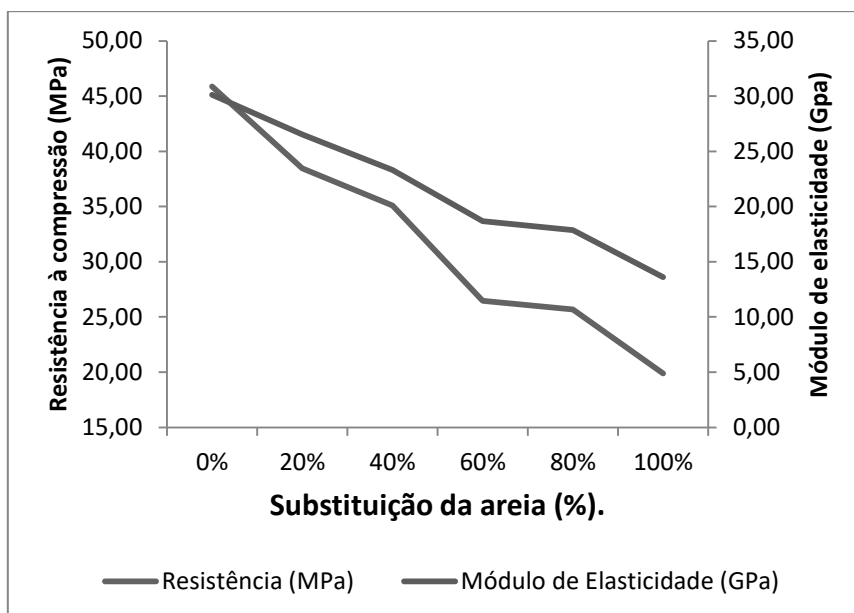


Figura 22: Resistência à compressão e Módulo de elasticidade do concreto vs substituição da areia.

A relação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão foi descrita de forma satisfatória através de uma equação do 1º grau, conforme pode ser observado na Figura 23. A equação possui um R^2 de 0,9934, sendo ela $y = 0,6339x + 1,4573$.

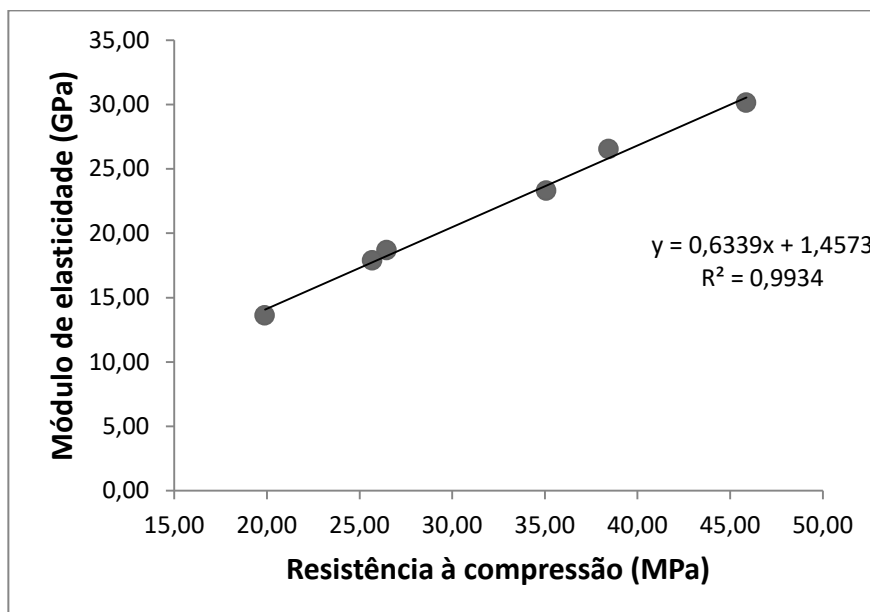


Figura 23: Resistência à compressão vs módulo de elasticidade.

4.6 MASSA ESPECÍFICA

A utilização da vermiculita no concreto gerou uma redução de até 300 kg/m³ na massa específica do concreto. Além disso é importante ressaltar que apesar de existir uma redução na massa específica do concreto, ela não é considerável ao ponto de obter-se um concreto leve estrutural, pois conforme NBR NM 35/1995 o valor da massa específica deve ser de 1840 kg/m³.

Na Figura 24 é possível observar a variação da massa específica em função da variação do percentual de vermiculita no concreto.

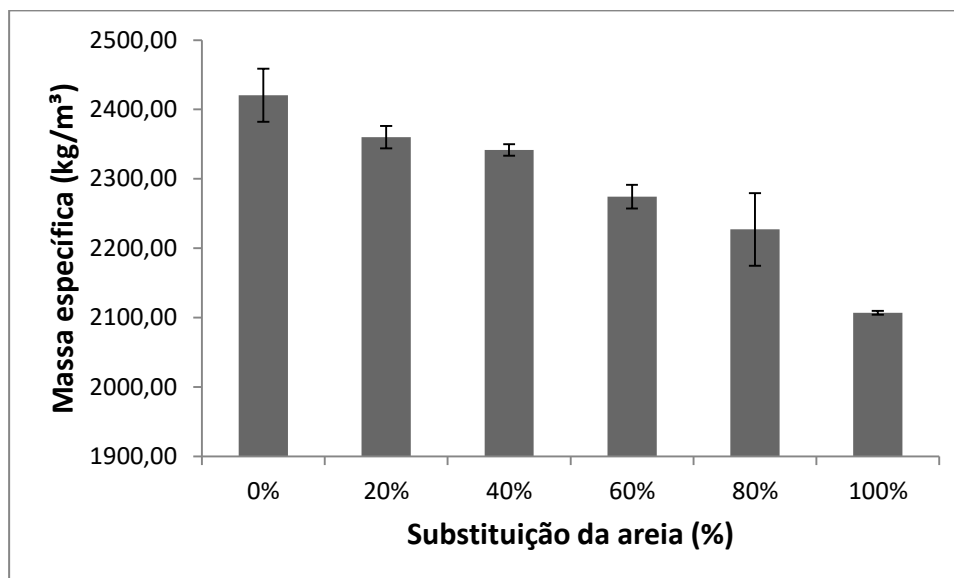


Figura 24: Massa específica do concreto vs substituição da areia.

Quando feita a substituição de 20% da areia pela vermiculita houve uma redução de 2,5% da massa específica, e quando esta substituição é integral ocorreu uma redução de 13% da massa específica do concreto.

A ocorrência da substituição de 100% da areia pela vermiculita, como agregados miúdos no concreto, resulta apenas uma redução de 13% da massa específica, em conjunto ao fato da vermiculita ser um dos agregados leves com menor massa específica, pode concluir que a substituição dos agregados miúdos do concreto convencional para a produção de concreto leve é ineficaz.

De acordo com a Figura 25 é possível relacionar a substituição de areia pela vermiculita com a massa específica de forma satisfatória. Esta relação gerou uma equação linear com R^2 igual a 0,9487, sendo: $y = -290,36x + 2433,7$.

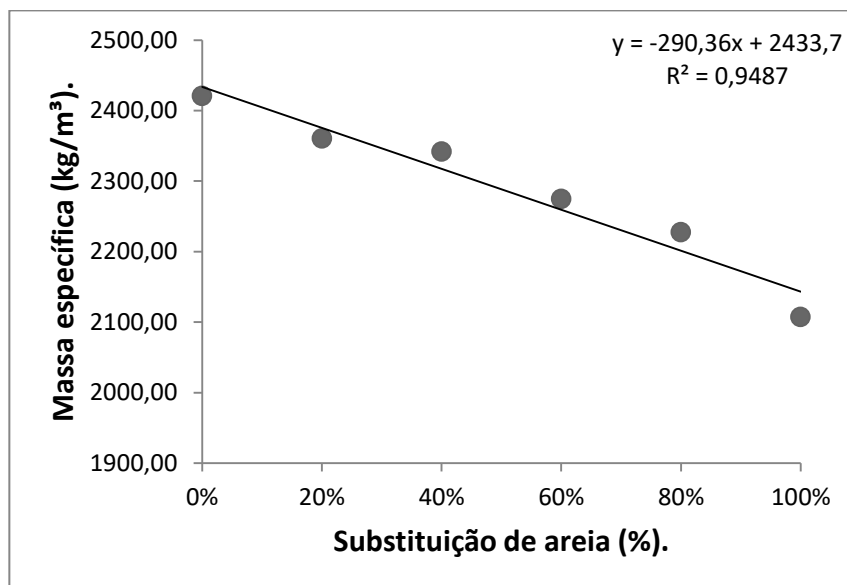


Figura 25: Massa específica vs substituição de areia.

4.7 ANÁLISE DE CUSTO DO CONCRETO

O custo do concreto varia para cada porcentagem de vermiculita que é substituída no lugar da areia. Isto ocorre, pois o consumo de areia e vermiculita muda para cada traço de concreto. A composição do custo unitário para cada porcentagem de variação de vermiculita é apresentada no Anexo B.

A Figura 26 apresenta o consumo para cada uma das 6 variações de porcentagens de vermiculita, sendo possível observar que o custo aumenta com o uso da vermiculita. Isto acontece, pois a substituição da areia pela vermiculita é feita em volume, como a massa unitária da vermiculita é de $0,139 \text{ g/cm}^3$ e 90% menor que a massa unitária da areia, $1,50 \text{ g/cm}^3$, o consumo de vermiculita é consideravelmente maior, além do custo unitário da vermiculita ser mais caro que o da areia.

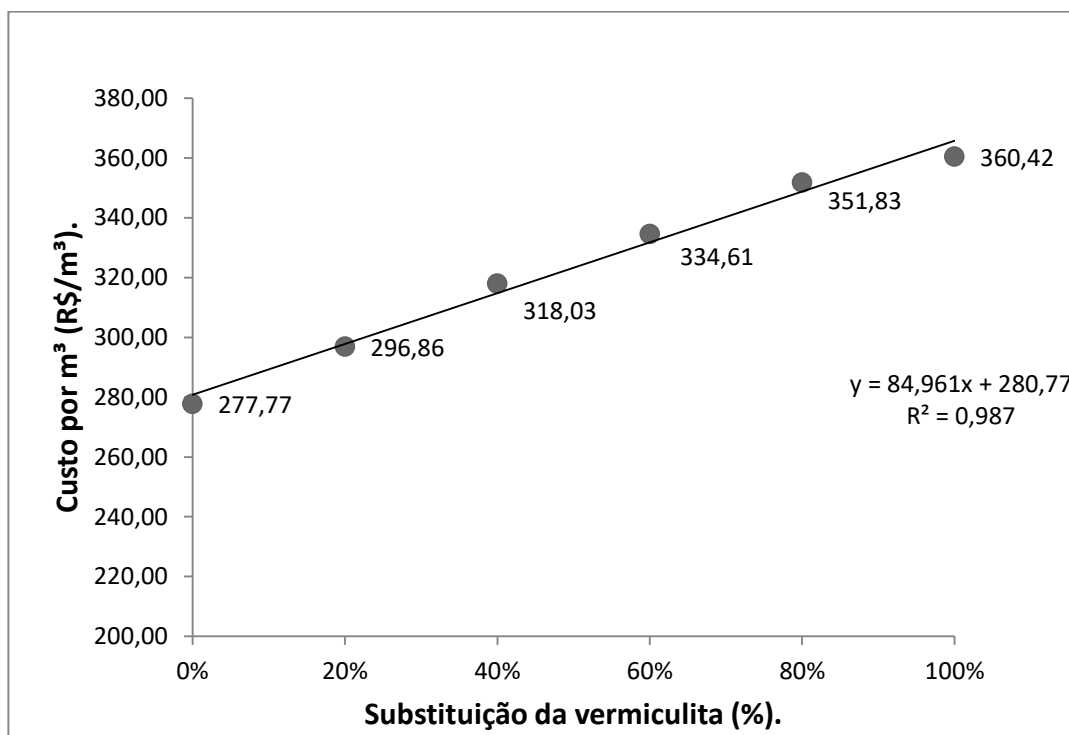


Figura 26: Custo por m3 de concreto vs substituição da areia.

Ainda analisando a Figura 26 destaca-se que o aumento do custo do concreto varia de 6 a 23%. Sendo assim, a aplicação da vermiculita visando tão somente o custo de produção não é viável. Porém é importante destacar que para as porcentagens de 20, 40 e 60% a variação é de até 17%, sendo estas porcentagens com as propriedades anteriormente analisadas com melhor aplicação no concreto para fins estruturais.

É possível como uma equação linear relacionar o custo unitário do concreto com vermiculita com o percentual de substituição da areia, conforme pode ser observado na Figura 26.

4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A consistência do concreto manteve-se entre 120 e 100 mm de abatimento para o intervalo de 0 e 60% de substituição da areia, ao passo que os concretos com

substituição de 80 e 100% levaram à reduções de abatimento significativas, portanto a um concreto com baixa trabalhabilidade. Sendo assim, o intervalo de 0 a 60% mostrou-se eficiente quanto à consistência.

No intervalo de 0 a 40% de substituição houve aumento 1/3 do valor da absorção de água em relação ao concreto de referência, ao passo que no concreto com substituição de 60%, o valor da absorção de água dobrou, aumentando em 141% para a substituição total da areia pela vermiculita. Portanto, o intervalo de substituição da areia mais eficiente na absorção de água é entre 0 e 40%.

A resistência do concreto decaiu 23% em relação ao concreto de referência para o intervalo de 0 a 40% de substituição da areia por vermiculita expandida, e neste mesmo intervalo os valores das resistências foram superiores ao f_{ck} utilizado no cálculo da dosagem do concreto; o intervalo de substituição de 60 a 80% ficou abaixo do f_{ck} adotado no cálculo da dosagem, porém são superiores a 20 MPa que é a menor resistência empregada em estruturas de concreto armado, conforme NBR 6118/2014. Em relação ao concreto de referência a resistência decresceu 44% para uma substituição de areia por vermiculita expandida de 60 a 80%.

Na substituição integral da vermiculita o valor de resistência ficou abaixo do permitido pela norma e 56% menor que o de referência. Sendo assim, o intervalo de 0 a 40% é o mais eficiente, e o intervalo de 60 e 80% pode ser utilizado com menos eficiência que o primeiro intervalo apontado. Além disso, os resultados mostraram que, sob a perspectiva estrutural, a vermiculita não pode substituir completamente a areia segundo os valores de resistência obtidos.

A estimativa do cálculo do módulo de elasticidade sugerido pela NBR 6118/2014 é de 30 GPa, o concreto de referência, 0% de substituição da areia, tem um módulo de elasticidade de 30 GPa, mostrando que o cálculo proposto pela norma é condizente com o real. Quando acrescentamos vermiculita o módulo de elasticidade diminui em até 22% para uma substituição de até 40%, 30% para uma substituição de 60 à 80% e quando há a substituição total diminui 71%. Portanto, sempre que for utilizar a substituição da areia pela vermiculita é necessário o ensaio de módulo de elasticidade para a determinação do mesmo.

Com a utilização da vermiculita expandida na substituição dos agregados miúdos do concreto, há uma redução na massa específica do concreto de 2,5 a 13%, sendo que esta redução de 13% não é suficiente para a produção de um concreto leve estrutural. A vermiculita expandida é um dos agregados leves com

menor massa específica no concreto, entretanto, neste trabalho observou-se que a substituição dos agregados miúdos do concreto em volume não é eficaz para a produção de concreto leve.

A aplicação da vermiculita expandida aumenta os custos de produção do concreto de 7 a 30%, dependendo da porcentagem de substituição.

5 CONCLUSÃO

O uso da vermiculita expandida em substituição parcial ou total aos agregados miúdos do concreto para fins estruturais apresentou desempenho satisfatório, em relação às propriedades estudadas: abatimento, resistência mecânica, absorção de água, massa específica e módulo de elasticidade.

De uma forma geral, a aplicação da vermiculita expandida alterou as propriedades do concreto, diminuindo a sua trabalhabilidade, uma vez que diminui o abatimento do concreto à medida que sua proporção é aumentada.

Além disso, o uso da vermiculita aumentou a absorção de água, o que pode favorecer o processo de corrosão das armaduras do concreto estrutural decrescendo a capacidade portante das estruturas em concreto armado.

A vermiculita ainda contribuiu para a diminuição da resistência do concreto e por consequência do módulo de elasticidade do mesmo, e ainda aumenta o custo de produção do concreto.

A maior eficiência de aplicação da vermiculita expandida na produção de concreto estrutural está no intervalo de 0 a 60%. O intervalo entre 80 e 100% de substituição da areia pela vermiculita não é viável a sua aplicação para concreto estrutural, e o intervalo entre 60 e 80% deve ser estudado para que se obtenha um parecer técnico sobre a eficiência da sua aplicação.

Desta forma, a vermiculita expandida mostra-se viável na substituição parcial da areia do concreto estrutural, e esta substituição pode minimizar os problemas de escassez de areia para a construção civil.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como possíveis trabalhos futuros:

Estudar a produção de concreto auto-adensável com vermiculita para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

Estudar as propriedades de resistência acústica, térmica e abrasão da vermiculita .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. ACI 213R-87 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. Estados Unidos: ACI, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9778 Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248 Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52 Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53 Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9939 Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 67 Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45 Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 23 Cimento Portland e outros materiais em pó**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8522 Concreto – Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118 Projeto de Estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM 35 Agregados leves para concreto estrutural – Especificação**. Mercosul: AMN, 1995.

BAUR, L. A. Facção. **Materiais de Construção Volume 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BOGAS, Alexandre J., GOMES, Augusto, PEREIRA, M. F. C. **Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate**. Construction and Building Materials, 2012.

Clube do Concreto, Método de Dosagem da ABCP. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2015/10/metodo-de-dosagem-da-abcp.html>>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

Cogumelos Mágicos, vermiculita. Disponível em <<https://cogumelomagicos.org/comunidade/wiki/vermiculita/>>. Acesso em 10 de maio de 2016.

DHIR, K., MAYS, R. G. C., CHUA, H. C. **Lightweight structural concrete with Aglite aggregate: mic design and properties**. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 6, Number 4, 1984.

Emporis, Australia Square Tower, Sydeney, View from George Streer. Disponível em: <<https://www.emporis.com/images/details/342011/exterior-view-from-george-street>>. Acesso em 10 de maio de 2016.

HELENE, Paulo. TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: PINI, 1992.

HELENE, Paulo. TUTIKIAN, Bernardo F. **DOSAGEM DOS CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

Leroy Merlin, Argila Expandida. Disponível em: < http://www.leroymerlin.com.br/argila-expandida-20kg_87328570>. Acesso em 10 de maio de 2016.

ROSSIGNOLO, João Adriano. AGNESINI, Marcos V. C. **Concreto Estrutural Leve**. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Concreto: Ensaio, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

LO, Tommy Y., TANG, W. C., CUI, H. Z. **The effects of aggregate properties on lightweight concrete**. Elsevier, 2006.

LUZ, Adão Benvindo da, LINS, Antonio Freitas. **Rochas & Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

METHA, P. Kumar, MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M., BROOKS J.J. **Tecnologia do concreto - 2ª edição**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265f. Tese de Doutorado – Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Profresiduo, Cidade da Califórnia em busca da meta de resíduo zero até 2020. Disponível em: < <http://www.profresiduo.com/news/116/6/cidade-da-california-em-busca-da-meta-de-residuo-zero-ate-2020>>. Acesso em 10 de maio de 2016.

REGOBELLO, Ronaldo. **Análise Numérica de Seções Transversais e de Elementos Estruturais de Aço e Misto de Aço e Concreto em Situação de Incêndio**. 2007. 269f. Tese de Mestrado – Engenharia de Estruturas – Universidade de São Paulo, 2007.

Roadbook, *Het ruige noorden*. Disponível em: < <http://roadbook.nl/het-ruige-noorden/>>. Acesso em 10 de maio de 2016.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros da Dosagem Racional do Concreto**. 34ª Reunião dos Técnicos da Indústria do Cimento, 1983.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestruturas e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009.

SANTIS, Bruno Carlos de, ROSSIGNOLO, João Adriano. **Influência dos agregados leves de argila calcinada nas propriedades mecânicas de concretos estruturais**. Revista Matéria V.20 N.02, 2015.

SCHACKOW, Adilson, EFFTING, Carneane. FOLGUERAS, Marilena. V. GÜTHS, Saulo. MENDES, Gabriela. A. ***Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agnte***. *Constuction and Building Materials*, 2014.

SILVA, L. S., DEMETRIO, J. C. C., DEMETRIO, F. J. C. **Concreto Sustentável: Substituição da Areia Natural por Pó de Brita para Confecção do Concreto Simples**. *International Workshop Advances in Cleaner Production*, 2015.

ANEXO A – CURVA DE ABRAMS

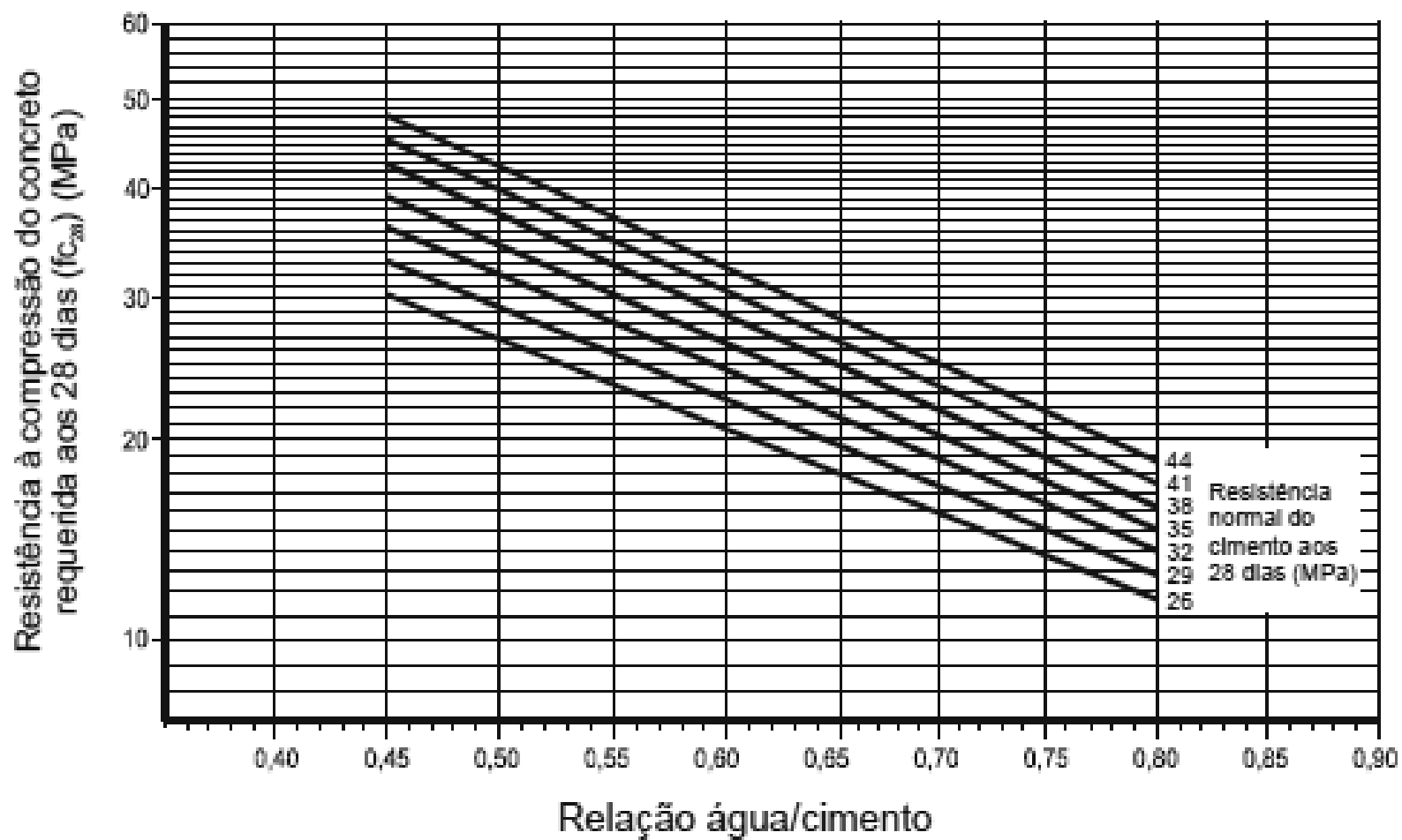


Figura 27: Curva de Abrams.
Fonte: Clube do Concreto, 2015.

ANEXO B – COMPOSIÇÃO DE CUSTO UNITÁRIO

Substituição	Massa Específica (Kg/m ³)	Traço					Consumos			
		Cimento	Areia	Brita	Água	Vermiculita	Cimento (Kg)	Areia (m ³)	Brita (m ³)	Vermiculita (l)
0%	2420,408	1	1,20	2,36	0,43	0,00	485,052	0,370	0,761	0,000
20%	2360,196	1	0,96	2,36	0,43	0,24	472,985	0,288	0,742	81,291
40%	2341,630	1	0,72	2,36	0,43	0,48	469,265	0,215	0,736	155,087
60%	2274,396	1	0,48	2,36	0,43	0,72	455,791	0,139	0,715	230,721
80%	2227,198	1	0,24	2,36	0,43	0,96	446,332	0,068	0,700	301,637
100%	2107,153	1	0,00	2,36	0,43	1,20	422,275	0,000	0,662	369,669

Composição de Custo Unitário - Substituição 0%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	485,052	0,47	227,974
Areia	m ³	0,370	56,50	20,886
Brita	m ³	0,761	38,00	28,909
Vermiculita	l	0,000	0,37	0,000
Total (R\$/m ³)				277,77

Composição de Custo Unitário - Substituição 20%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	472,985	0,47	222,303
Areia	m ³	0,288	56,50	16,293
Brita	m ³	0,742	38,00	28,190
Vermiculita	l	81,291	0,37	30,078
Total (R\$/m ³)				296,864

Composição de Custo Unitário - Substituição 40%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	469,265	0,47	220,554
Areia	m ³	0,215	56,50	12,124
Brita	m ³	0,736	38,00	27,969
Vermiculita	l	155,087	0,37	57,382
Total (R\$/m ³)				318,029

Composição de Custo Unitário - Substituição 60%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	455,791	0,47	214,222
Areia	m ³	0,139	56,50	7,851
Brita	m ³	0,715	38,00	27,165
Vermiculita	l	230,721	0,37	85,367
Total (R\$/m ³)				334,605

Composição de Custo Unitário - Substituição 80%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	446,332	0,47	209,776
Areia	m ³	0,068	56,50	3,844
Brita	m ³	0,700	38,00	26,602
Vermiculita	l	301,637	0,37	111,606
Total (R\$/m ³)				351,827

Composição de Custo Unitário - Substituição 100%				
Insumos	Unidade	Consumo	Custo Unitário	Custo
Cimento	kg	422,275	0,47	198,469
Areia	m ³	0,000	56,50	0,000
Brita	m ³	0,662	38,00	25,168
Vermiculita	l	369,669	0,37	136,777
Total (R\$/m ³)				360,415

ANEXO C – RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Ensaio de Compressão Axial

	Substituição			0%
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	40,48	41,61	32,42	44,17
CP 2	34,47	38,02	39,11	46,96
CP 3	37,00	48,10	34,55	48,48
CP 4	39,43	44,12	44,24	45,28
CP 5	39,18	40,03	39,63	41,75
CP 6	36,41	39,14	45,43	48,69
Média	37,828	41,837	39,230	45,888
Desvio	2,254	3,731	5,138	2,689
Coef. Var.	5,96%	8,92%	13,10%	5,86%

	Substituição			20%
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	30,99	34,12	34,92	38,58
CP 2	27,17	36,56	32,86	36,38
CP 3	28,23	34,62	34,96	39,81
CP 4	30,66	32,99	36,59	39,11
CP 5	27,61	34,06	35,04	37,3
CP 6	28,84	33,95	34,75	39,51
Média	28,917	34,383	34,853	38,448
Desvio	1,586	1,191	1,187	1,344
Coef. Var.	5,48%	3,46%	3,41%	3,50%

	Substituição			40%
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	26,47	31,15	32,63	34,16
CP 2	27,08	30,12	32,37	34,59
CP 3	27,53	31,66	33,62	35,23
CP 4	28,62	30,94	34,51	36,06
CP 5	28,06	31,32	33,44	34,96
CP 6	29,07	29,73	33,02	35,45
Média	27,805	30,820	33,265	35,075
Desvio	0,971	0,743	0,771	0,666
Coef. Var.	3,49%	2,41%	2,32%	1,90%

	Substituição		60%	
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	22,32	20,46	26,66	27,15
CP 2	22,58	25,37	27,90	26,62
CP 3	20,48	26,14	26,79	25,78
CP 4	20,72	21,65	26,36	27,23
CP 5	23,71	24,18	26,70	27,48
CP 6	23,41	21,13	27,94	24,52
Média	22,203	23,155	27,058	26,463
Desvio	1,345	2,387	0,683	1,128
Coef. Var.	6,06%	10,31%	2,52%	4,26%

	Substituição		80%	
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	22,03	16,94	24,85	25,26
CP 2	20,56	21,91	23,77	25,03
CP 3	20,65	22,38	23,64	26,16
CP 4	22,74	21,89	24,87	24,38
CP 5	19,75	18,59	22,22	26,55
CP 6	22,19	24,05	25,59	26,78
Média	21,320	20,960	24,157	25,693
Desvio	1,164	2,650	1,201	0,947
Coef. Var.	5,46%	12,64%	4,97%	3,69%

	Substituição		100%	
	7 Dias	14 Dias	21 Dias	28 Dias
CP 1	13,04	16,77	18,66	20,01
CP 2	13,09	16,87	17,82	20,20
CP 3	14,56	14,28	19,13	19,34
CP 4	14,77	16,04	17,29	19,61
CP 5	12,63	16,29	17,88	18,40
CP 6	14,80	15,95	19,52	19,95
Média	13,815	16,033	18,383	19,585
Desvio	0,997	0,937	0,859	0,657
Coef. Var.	7,22%	5,84%	4,67%	3,35%

Ensaio de Absorção de água por imersão

	Massa Seca	Massa Úmida 24h	Massa Úmida 48h	Massa Úmida 72h	Absorção % 24h	Absorção % 48h	Absorção % 72h	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CP1 0%	3764,9	3888,6	3891,1	3890,8	3,29%	3,35%	3,34%			
CP2 0%	3842,2	3964,0	3965,4	3966,0	3,17%	3,21%	3,22%	3,48%	0,35%	9,99%
CP3 0%	3776,9	3919,9	3923,5	3923,3	3,79%	3,88%	3,88%			
CP1 20%	3714,4	3903,8	3906,5	3907,4	5,10%	5,17%	5,20%			
CP2 20%	3759,5	3917,0	3918,5	3920,0	4,19%	4,23%	4,27%	4,75%	0,46%	9,78%
CP3 20%	3753,6	3930,2	3933,8	3933,5	4,70%	4,80%	4,79%			
CP1 40%	3740,7	3894,5	3896,6	3897,7	4,11%	4,17%	4,20%			
CP2 40%	3636,0	3788,7	3789,9	3790,8	4,20%	4,23%	4,26%	4,28%	0,09%	2,18%
CP3 40%	3741,7	3902,9	3904,5	3905,6	4,31%	4,35%	4,38%			
CP1 60%	3629,3	3820,5	3822,7	3824,1	5,27%	5,33%	5,37%			
CP2 60%	3556,8	3794,0	3796,8	3799,4	6,67%	6,75%	6,82%	6,24%	0,77%	12,36%
CP3 60%	3562,2	3792,1	3794,9	3795,4	6,45%	6,53%	6,55%			
CP1 80%	3521,1	3704,4	3707,0	3711,8	5,21%	5,28%	5,42%			
CP2 80%	3467,8	3660,6	3663,5	3668,7	5,56%	5,64%	5,79%	5,45%	0,33%	6,04%
CP3 80%	3569,7	3745,3	3749,5	3753,1	4,92%	5,04%	5,14%			
CP1 100%	3249,1	3511,6	3516,0	3518,9	8,08%	8,21%	8,30%			
CP2 100%	3299,8	3570,0	3574,4	3577,0	8,19%	8,32%	8,40%	8,43%	0,14%	1,66%
CP3 100%	3299,9	3576,5	3580,9	3583,0	8,38%	8,52%	8,58%			

Ensaio de Massa específica do concreto

	Massa Seca	Massa Saturada	Massa Submersa	Massa Específica (kg/m ³)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CP1 0%	3764,9	3890,8	2312,0	2384,659			
CP2 0%	3842,2	3966,0	2404,6	2460,74	2420,41	38,2471	1,58%
CP3 0%	3776,9	3923,3	2359,9	2415,824			
CP1 20%	3714,4	3907,4	2326,5	2349,548			
CP2 20%	3759,5	3920,0	2321,8	2352,334	2360,2	16,0914	0,68%
CP3 20%	3753,6	3933,5	2355,5	2378,707			
CP1 40%	3740,7	3897,7	2304,1	2347,327			
CP2 40%	3636,0	3790,8	2231,6	2331,965	2341,63	8,41484	0,36%
CP3 40%	3741,7	3905,6	2310,4	2345,599			
CP1 60%	3629,3	3824,1	2241,5	2293,252			
CP2 60%	3556,8	3799,4	2225,7	2260,151	2274,4	17,0252	0,75%
CP3 60%	3562,2	3795,4	2226,0	2269,785			
CP1 80%	3521,1	3711,8	2172,5	2287,468			
CP2 80%	3467,8	3668,7	2088,9	2195,088	2227,2	52,2326	2,35%
CP3 80%	3569,7	3753,1	2129,8	2199,039			
CP1 100%	3249,1	3518,9	1977,6	2108,026			
CP2 100%	3299,8	3577	2012,6	2109,307	2107,15	2,69884	0,13%
CP3 100%	3299,9	3583	2014,7	2104,125			

Ensaio de Módulo de Elasticidade do Concreto

Substituição	0%
	Ec (Gpa)
CP 1	30,40
CP 2	30,00
CP 3	30,00
Média	30,133
Desvio	0,231
Coef. Var.	0,008

Substituição	20%
	Ec (Gpa)
CP 1	26,20
CP 2	26,90
CP 3	26,20
Média	26,433
Desvio	0,404
Coef. Var.	0,015

Substituição	40%
	Ec (Gpa)
CP 1	22,40
CP 2	23,50
CP 3	24,00
Média	23,300
Desvio	0,819
Coef. Var.	0,035

Substituição	60%
	Ec (Gpa)
CP 1	18,70
CP 2	17,80
CP 3	19,50
Média	18,667
Desvio	0,850
Coef. Var.	0,046

Substituição	80%
	Ec (Gpa)
CP 1	17,40
CP 2	18,50
CP 3	17,70
Média	17,867
Desvio	0,569
Coef. Var.	0,032

Substituição	100%
	Ec (Gpa)
CP 1	13,0
CP 2	13,9
CP 3	13,9
Média	13,600
Desvio	0,520
Coef. Var.	0,038