

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

NICOLE LUBACHEVSKI FESTUGATO

**AVALIAÇÃO DO FATOR VAZIOS/CIMENTO NA ESTIMATIVA
DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO
POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CONCRETOS
CONVENCIONAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NICOLE LUBACHEVSKI FESTUGATO

**AVALIAÇÃO DO FATOR VAZIOS/CIMENTO NA ESTIMATIVA DA
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada Programa de Graduação em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção de título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Msc^a. Eloíse Aparecida Langaro

Co-orientador: Prof. Dr. Lucas Festugato

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DO FATOR VAZIOS/CIMENTO NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CONCRETOS CONVENCIONAIS

NICOLE LUBACHEVSKI FESTUGATO

No dia 22 de junho de 2017, às 10h20min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº17-TCC/2017.

Orientador: Prof^a. Msc. ELOÍSE APARECIDA LANGARO (DACOC/UTFPR-PB)

Co-orientador: Prof. Dr. LUCAS FESTUGATO (PPGEC/UFRGS)

Membro 1 da Banca: Prof^a. Dr^a. CAROLINE ANGLUSKI DA LUZ (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. JOSÉ ILO PEREIRA FILHO (DACOC/UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Durante a realização desse trabalho muitas pessoas se esforçaram por mim e junto comigo. Sendo assim, posso dizer que esse estudo é resultado da influência de todas essas pessoas.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por estar perto em todos os momentos e nunca permitir que um desânimo vencesse os objetivos desse trabalho. Essa é mais uma das muitas vezes em que eu vou dizer: Valeu Deus!

Também gostaria de agradecer aos meus pais e a toda minha família pelo amor e por me capacitarem para chegar até aqui. Em especial, agradeço à minha mãe, Angela Maria Lubachevski, que fez uma faculdade junto comigo e enxergou em mim um potencial que muitos duvidam. Além disso, sempre me ouviu e me ajudou a solucionar os problemas relacionados a esse trabalho.

À minha orientadora, Prof^a. Msc^a. Eloíse Aparecida Langaro gostaria de agradecer por todas as horas de conversas e pelas válidas sugestões. E ao meu irmão e co orientador, Prof. Dr. Lucas Festugato, gostaria de dizer que sou muito grata pela sugestão do tema, pelas considerações, e pelo tempo e atenção dedicada às minhas dúvidas. Muito obrigada mesmo!

Aos Prof. Dr. Gustavo Lacerda e Prof^a. Dr^a. Elizângela Siliprandi que, além de me passar conhecimento, me ouviram com paciência e me ajudaram quando precisei. Bem como aos membros da banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Caroline Angluski da Luz e Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho, deixo minha imensa gratidão.

À Claudia Baldin, estagiária do laboratório de materiais da UTFPR-PB, agradeço por todo o auxílio prestado no rompimento dos corpos de prova.

Estendo meus agradecimentos ao meu namorado, Eng. Eduardo Parpinelli Teles. Obrigada pela estadia e hospitalidade, por todos os dias em que deixou os teus afazeres para me ajudar a rodar concreto, por todas as vezes que leu cada trecho desse trabalho e pelos dias que me fez parar e respirar. Obrigada por ser você por completo em tudo o que faz!

Agradeço também ao colega Alexandre Manfro que me auxiliou no feitiço dos corpos de prova. E aos demais amigos agradeço pelas conversas, conselhos e risadas, foram de grande incentivo, principalmente na etapa final desse estudo. A todos vocês: Muito obrigada!

RESUMO

FESTUGATO, Nicole Lubachevski. **Avaliação do fator vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral de concretos convencionais**. 2017. 69p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.

Como o processo de produção do concreto é simples e seus materiais constituintes são acessíveis e relativamente baratos o concreto pode ser considerado um material de fácil obtenção e baixo custo. Sendo assim, a utilização técnica do concreto para fins diversificados justifica o interesse permanente em seu estudo. Uma das etapas básicas do processo produtivo do concreto, que busca satisfazer as necessidades específicas bem como os requisitos de projeto, é a dosagem. Isto é, a escolha e o proporcionamento dos materiais constituintes do concreto. Nesse contexto, apresenta-se o fator água/cimento como um dos principais parâmetros para dosagens de concretos convencionais, uma vez que este se caracteriza como parâmetro determinante no alcance da resistência final desejada. No entanto, é visto que a relação água/cimento possui abrangência restrita, tanto em faixa de valores como em tipos de concreto. Nesse sentido, o presente trabalho se desenvolve de forma à ampliar o universo de um novo conceito no que diz respeito à dosagem de diferentes tipos de concretos, fator vazios/cimento, pois trata-se de um índice cuja a abrangência tende a ser superior ao fator água/cimento comumente utilizado. O estudo abrange a avaliação da influência do teor de cimento, da porosidade e do fator vazios/cimento na resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral de diferentes traços de concretos convencionais.

Palavras-chave: Concreto; Fator Água/Cimento; Fator Vazios/Cimento; Teor de Cimento; Porosidade.

ABSTRACT

FESTUGATO, Nicole Lubachevski. **Evaluation of the voids/cement factor in the estimation of the simple compression strength and the tensile strength by diametral compression of conventional concretes**. 2017. 69p. Civil Engineering Course Completion Work – Academic Construction Department, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco.

As the concrete production process is simple and its constituent materials are affordable and relatively inexpensive the concrete can be considered an easily obtainable material and low cost. Therefore, the technical use of the concrete for diversified purposes justifies the permanent interest in its study. One of the basic steps in the concrete production process, which seeks to meet specific needs as well as design requirements, is dosing. That is, the choice and proportion of the constituent materials of the concrete. In this context, the water/cement factor is presented as one of the main parameters for dosages of conventional concretes, since this is characterized as a determinant parameter in the reach of the desired final resistance. However, it is seen that the water/cement ratio has restricted scope, in range of values as in types of concrete. In this sense, the present work develops in order to expand the universe of a new concept with regard to the dosage of different types of concrete, voids/cement factor, since it is an index whose range tends to be higher than water/cement factor commonly used. The study covers the evaluation of the influence of cement content, porosity and voids/cement factor on the simple compression strength and tensile strength by diametral compression of different traces of conventional concretes.

Keywords: Concrete; Water/Cement Factor; Voids/Cement Factor; Cement Content; Porosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama simplificado do método de dosagem EPUSP/IPT.....	27
Figura 2 - Diagrama simplificado do método de dosagem da ABCP.....	29
Figura 3 - Diagrama das atividades a serem realizadas na pesquisa em questão.....	31
Figura 4 - Concreto fresco submetido ao ensaio de abatimento do tronco de cone....	36
Figura 5 - Concreto fresco submetido à pesagem para o ensaio de umidade	37
Figura 6 - Concreto endurecido submetido ao processo de dissecação	37
Figura 7 - Disposição vertical de um corpo de prova no ensaio de compressão simples	38
Figura 8 - Disposição horizontal de um corpo de prova no ensaio de tração por compressão diametral	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo	32
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	33
Gráfico 3 - Resistência à compressão simples em relação ao fator vazios/cimento para todos os traços.....	48
Gráfico 4 - Resistência à tração por compressão diametral em relação ao fator vazios/cimento para todos os traços	48
Gráfico 5 - Resistência à compressão simples em relação ao fator água/cimento para todos os traços	48
Gráfico 6 - Resistência à tração por compressão diametral em relação ao fator água/cimento.....	48
Gráfico 7 - Resistência à compressão em relação ao teor de cimento	49
Gráfico 8 - Resistência à tração em relação ao teor de cimento.....	50
Gráfico 9 - Resistência à compressão em relação à porosidade para os traços 1, 2 e 3	51
Gráfico 10 - Resistência à compressão em relação à porosidade para os traços 3, 4 e 5	51
Gráfico 11 - Resistência à tração em relação à porosidade para os traços 1, 2 e 3 ...	52
Gráfico 12 - Resistência à tração em relação à porosidade para os traços 3, 4 e 5 ...	52
Gráfico 13 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento para os traços 1, 2 e 3.....	53
Gráfico 14 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento para os traços 3, 4 e 5.....	54
Gráfico 15 - Resistência à tração em relação ao fator água/cimento para os traços 1, 2 e 3	55
Gráfico 16 - Resistência à tração em relação ao fator água/cimento para os traços 3, 4 e 5	55
Gráfico 17 - Resistência à compressão em relação ao fator vazios/cimento para os traços 1, 2 e 3.....	56
Gráfico 18 - Resistência à compressão em relação ao fator vazios/cimento para os traços 3, 4 e 5.....	57
Gráfico 19 - Resistência à tração em relação ao fator vazios/cimento para os traços 1, 2 e 3	58

Gráfico 20 - Resistência à tração em relação ao fator vazios/cimento para os traços 3, 4 e 5	58
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados graúdo e miúdo	33
Tabela 2 - Massa específica do agregado miúdo.....	34
Tabela 3 - Massa específica do agregado graúdo	34
Tabela 4 - Umidade do agregado miúdo	34
Tabela 5 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto de cada traço.....	36
Tabela 6 – Massa específica das misturas e dados dos corpos de prova	40
Tabela 7 - Umidade e massa específica do concreto seco	42
Tabela 8 - Quantidades em massa dos componentes do concreto.....	43
Tabela 9 - Volume de vazios e quantidades em volume dos componentes do concreto	44
Tabela 10 - Porosidade e fator vazios/cimento	45
Tabela 11 - Abatimento do concreto	46
Tabela 12 - Comparativo referentes às Tabelas 5, 8 e 11	46
Tabela 13 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 1	68
Tabela 14 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 2	68
Tabela 15 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 3	68
Tabela 16 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 4	68
Tabela 17 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 5	68
Tabela 18 – Dados complementares à Tabela 6.....	69
Tabela 19 - Dados complementares à Tabela 7.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CONCRETO	17
2.2	CONSUMO OU TEOR DE CIMENTO	20
2.3	FATOR ÁGUA/CIMENTO.....	21
2.4	FATOR VAZIOS/CIMENTO.....	23
2.5	POROSIDADE.....	24
2.6	MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS	25
3	METODOLOGIA	30
3.1	MATERIAIS	32
3.1.1	Caracterização dos Agregados	32
3.1.2	Caracterização do Cimento.....	34
3.2	MÉTODOS	35
3.2.1	Ensaio de Abatimento (<i>Slump Test</i>).....	36
3.2.2	Ensaio de Umidade	37
3.2.3	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	38
3.2.4	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	ENSAIO DE UMIDADE DO CONCRETO.....	41
4.2	ENSAIO DE ABATIMENTO DO CONCRETO (<i>SLUMP TEST</i>)	46
4.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	47
4.3.1	Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Teor de Cimento.....	49
4.3.2	Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação à Porosidade	50

4.3.3	Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Fator Água/Cimento	53
4.3.4	Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Fator Vazios/Cimento	56
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	65
	ANEXO A	66
	APÊNDICES	67
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	68
	APÊNDICE B – TABELAS COMPLEMENTARES.....	69

1 INTRODUÇÃO

Volumes consideráveis de concreto são produzidos diariamente e aplicados a diversas áreas da construção civil, utilizando cada vez mais procedimentos, componentes e equipamentos diferenciados. Essa elevada quantidade e busca por aprimoramentos evidencia a importância mundial deste produto, considerado atualmente como um dos materiais tradicionais da construção civil (BOGGIO, 2000).

Segundo Pedroso (2009), estimou-se, em 2009, um consumo equivalente a 11 bilhões de toneladas de concreto. Desde então, com o crescimento populacional e com incentivos fiscais no período de 2014, houve uma propensão ao aumento desse número.

Nesse sentido, muitos autores, como por exemplo, BOGGIO (2000), LISBÔA (2004), LEITE (2001) e CONSOLI *et al.* (2010), desenvolveram pesquisas que tem como objetivo viabilizar cada vez mais o uso deste material. Sejam em estudos das suas propriedades para melhorar algumas características importantes ou mesmo estudos de gerenciamento de recursos e viabilidade econômica do material em questão.

Para a utilização adequada do concreto, faz-se necessário o conhecimento de todos os materiais e uma dosagem coerente dos mesmos, uma vez que esta deverá estar de acordo com as características requeridas no projeto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Dentro desta dosagem coerente, para concretos convencionais, a relação água/cimento (a/c) se posiciona como um dos principais parâmetros a ser controlado para alcançar as características desejadas no concreto, pois, além de ser fundamental para a hidratação do cimento, através da Lei de Abrams se estabelece uma função primordial desse parâmetro com a resistência à compressão do concreto (ISAIA, 2011).

Essa correlação obtida por Abrams em 1919 responde coerentemente em uma faixa limitada de valores para a relação água/cimento. Ou seja, em alguns tipos de concreto, como por exemplo, os concretos compactados a rolo, concretos de alta resistência e os concretos asfálticos, o fator água/cimento não atinge uma boa relação com a resistência do concreto, e, portanto, não pode ser utilizado para dosagem dos mesmos (CREMONINI *et al.*, 2001; DONATO, 2003;).

Diante desse contexto, para ampliar o universo de um novo conceito no que diz respeito à dosagem dos diferentes tipos de concretos, o presente trabalho traz a apresentação e aplicação do fator vazios/cimento proposto por Consoli *et al.* (2010) em uma pesquisa cujo o objetivo foi desenvolver um método de dosagem racional para o solocimento. O trabalho em questão envolve a quantificação da influência desse mesmo fator na avaliação da resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, de diferentes traços de concreto, na tentativa de buscar novas correlações para dosagem do mesmo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Análise do fator vazios/cimento proposto por Consoli *et al.* (2010) bem como a comparação desse fator com o fator água/cimento em diferentes traços de concreto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do teor de cimento em relação aos materiais secos, da porosidade, e da relação vazios/cimento na avaliação da resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral de diferentes traços de concreto;
- Comparar a eficácia do fator água/cimento e da relação vazios/cimento na análise da resistência à compressão do material;
- Encontrar uma expressão potencial que forneça a estimativa da resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral em função do fator vazios/cimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto pode ser considerado como um material de fácil obtenção e baixo custo, pois sua tecnologia de produção é bastante simplificada e seus principais constituintes são relativamente baratos e disponíveis em quase todas as regiões do mundo. Sendo assim, a viabilidade econômica e a capacidade de utilização técnica do concreto para os mais diversos fins justifica o interesse permanente no seu estudo, o

que possibilita sua evolução, a partir da melhoria de suas propriedades (BOGGIO, 2000).

O uso racional dos materiais configura-se como uma importante alternativa na minimização de custos em uma obra e otimização do processo produtivo de maneira global. Através da análise das características dos materiais bem como da sua disponibilidade de uso pode-se obter um produto de características e propriedades uniformes, com desempenho e durabilidade acordes com as especificações do projeto e da obra e com custo adequado, às possibilidades do mercado consumidor (CRUZ, 2008; BOGGIO, 2000).

Uma das etapas básicas do processo produtivo do concreto, que procura satisfazer seletivamente as necessidades específicas bem como os requisitos de projeto, é a dosagem, ou seja, a escolha e o proporcionamento dos materiais constituintes do concreto. Nesse contexto, entende-se a importância considerável do fator água/cimento como um dos principais parâmetros para dosagens racionais, uma vez que este é determinante para o alcance da resistência final desejada. (BOGGIO, 2000).

Visto que a relação água/cimento possui abrangência restrita, tanto em faixa de valores como em tipos de concreto, o presente trabalho traz a apresentação do fator vazios/cimento proposto por Consoli *et al.* (2010) assim como a avaliação da sua influência na resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral de diferentes traços de concreto.

Esse trabalho pretende se desenvolver no sentido de ampliar o universo de um novo conceito no que diz respeito à dosagem de diferentes tipos de concretos, fator vazios/cimento, pois trata-se de um índice cuja a abrangência tende a ser superior ao fator água/cimento comumente utilizado.

Por fim, essa pesquisa torna-se viável por conta dos materiais serem de fácil obtenção e, também, pela disponibilidade de equipamentos para realização dos ensaios de abatimento, de resistência à compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral. Além disso, as normas que regem os ensaios também são de fácil acesso e uso do laboratório de materiais da UTFPR – Câmpus Pato Branco também é viável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

De acordo com a NBR 12655:2006, o concreto de cimento Portland é o material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Além disso, Botelho & Marchetti (2006) afirmam que o concreto possui uma vantagem fundamental sobre a pedra natural que consiste em ser moldável durante sua preparação adquirindo, assim, a forma que se desejar.

Nesse sentido, Isaia (2007) qualifica o concreto de cimento Portland como sendo o material estrutural e de construção civil com maior importância na atualidade. A descoberta e uso intensivo do concreto de cimento Portland no final do século XIX e durante século XX, respectivamente, o transformaram em um dos materiais mais consumidos pelo homem. Sua ampla utilidade também foi responsável pela inovação em projetos e construções de estruturas cuja evolução esteve fortemente associada com o desenvolvimento das civilizações ao longo da história (ISAIA, 2007).

Segundo Boggio (2000), não há um concreto ideal para todos os propósitos, por conta disso, algumas propriedades e características do material devem ser pré-estabelecidas a fim de se obter um concreto adequado para cada finalidade. Posto isso, o autor também aponta a grande importância e necessidade de uma dosagem do concreto, pois, através dela, não somente as proporções dos materiais constituintes são estabelecidas, como também os requisitos de projeto são satisfatoriamente alcançados tanto em termos de qualidade quanto de economia.

Após a mistura dos materiais constituintes, de acordo com Giammusso (1992), o concreto apresenta-se no estado fresco, condição que possibilita seu lançamento e adensamento para obtenção de uma massa compacta. Nesse sentido, algumas propriedades e características do concreto fresco são levadas em conta no processo de dosagem a fim de atender cada requisito de projeto especificadamente (BOGGIO, 2000).

No que diz respeito ao produto final, uma das propriedades essenciais do concreto fresco, segundo Neville (1997), é a trabalhabilidade. Essa propriedade é

definida por Glanville *et al* (1947) *apud* Neville (1997) como sendo a quantidade de trabalho interno útil necessário para produzir adensamento pleno. Outra definição, proposta por Giammusso (1992), sugere que a trabalhabilidade é a adequação da consistência do concreto ao processo utilizado para o seu lançamento e adensamento.

Nota-se, então, que a trabalhabilidade envolve a característica de consistência que, segundo Neville & Brooks (2013), é a resistência da forma de uma substância ou a facilidade como ela flui. Já de acordo com Mehta & Monteiro (2008), a consistência pode ser entendida como a medida da umidade do concreto. Isso ocorre pelo fato de que, dentro de determinados intervalos, concretos com maior quantidade de água são mais trabalháveis que concretos secos.

Essa característica é usualmente avaliada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, previsto na NBR NM 67:1998 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Logo, quanto mais úmida a mistura for, maior será o seu abatimento. Sendo assim, é possível relacionar positivamente o abatimento com o consumo de água por m³ de concreto.

Outra característica do concreto fresco que é relacionada com a trabalhabilidade e com consumo de cimento é a coesão, que, segundo Giammusso (1992), é a propriedade pela qual o concreto se mantém misturado, ou seja, sem ocorrer a separação dos seus componentes. Nesse sentido Neville (1997) apresenta a coesão como a resistência da mistura à segregação. Os autores Neville & Brooks (2013) trazem, então, a definição de segregação como sendo a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição não seja mais uniforme.

Há, em especial, uma forma de segregação em que parte da água presente na mistura tende a migrar para a superfície do concreto fresco. Esse fenômeno é conhecido como exsudação e ocorre devido à falta de finos para reter a água no concreto. A partir da exsudação, se a água da superfície evaporar rapidamente, ocorre a retração plástica, que é um efeito nocivo ao concreto, pois gera fissuras intensas prejudicando sua aderência e resistência (NEVILLE & BROOKS, 2013; GIAMMUSSO, 1992).

De acordo com Neville & Brooks (2013) um bom concreto deve ser satisfatório tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, isto é, após o processo de cura.

Sendo assim, quanto ao desempenho do concreto endurecido, outras propriedades e características são compreendidas.

As estruturas de concreto devem, essencialmente, desempenhar as funções para as quais foram projetadas durante um período de vida previsto ou, no mínimo, razoável. Sendo assim, caso o concreto suporte a deterioração em que será submetido, desde que tenha sido dosado para tal, será denominado durável (NEVILLE, 1997).

A durabilidade do concreto é apresentada pelo comitê 201 do *American Concrete Institute* (ACI) *apud* Mehta & Monteiro (2008) como sendo a capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Ou seja, o concreto se caracterizará durável quando conservar sua forma original, qualidade e capacidade de uso sendo exposto ao meio para o qual foi projetado (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Giammusso (1992), a durabilidade relaciona-se com outras propriedades do concreto, como é o caso da permeabilidade, que, pela definição de Mehta & Monteiro (2008), é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Essa propriedade se mostra interessante no sentido de garantir a estanqueidade e, por consequência, resistência aos ataques químicos em estruturas de concreto (NEVILLE & BROOKS, 2013).

Além da durabilidade se caracterizar como um dos critérios de dosagem, estabelecendo o consumo mínimo de cimento, também está relacionada com a resistência à abrasão da peça, que, de modo geral, consiste na submissão das estruturas de concreto a ações de desgastes. Tais ações podem ser por atrito, arranhamento ou percussão, através de movimentos de arraste e deslizamento, ou então por erosão, no caso de ação de partículas sólidas abrasivas carregadas pela água (NEVILLE, 1997; NEVILLE & BROOKS, 2013).

O concreto endurecido, quando carregado, pode apresentar deformações elásticas ou inelásticas. Ainda assim, sem carregamento, podem ocorrer deformações nas estruturas de concreto devido à retração. Essas deformações, geralmente, causam fissuras na peça e se apresentam como uma resposta do material ao carregamento externo e ao meio ambiente (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Nas situações em que o concreto endurecido permanece sem carregamento, manifesta-se a característica de retração, que é definida como a redução das

dimensões do concreto e pode ser segmentada em retração hidráulica ou por secagem, que ocorre através da perda de água capilar, e retração autógena, que ocorre a partir da redução de volume dos produtos da hidratação. Ao passo que exista a contenção das reduções de dimensões mencionadas, são provocadas tensões de tração que, por sua vez, causam as fissuras no concreto (GIAMMUSSO, 1992).

Todavia, quando o concreto endurecido se encontra submetido a algum tipo de carregamento é possível perceber o fenômeno de fluência, descrito por Neville & Brooks (2013) como o aumento da deformação sob uma tensão constante ao longo do tempo. Isto é, essa propriedade não se associa com a tensão gerada a partir das deformações intrínsecas a peça.

Entre outras características associadas ao concreto endurecido, a resistência, apresenta-se como a mais valorizada por engenheiros projetistas e de controle de qualidade, pois está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento, sendo assim, fornece uma ideia geral da qualidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE & BROOKS, 2013).

Embora aspectos como o tipo de cimento, tipo de cura, temperatura e idade influenciem na resistência do concreto, existem outros parâmetros que possuem maior relevância nesse quesito, são eles: o fator água/cimento e a porosidade. Tais parâmetros estão explicados de maneira mais específica ao longo dos próximos itens deste referencial (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008; GIAMMUSSO, 1992).

2.2 CONSUMO OU TEOR DE CIMENTO

O consumo de cimento é um parâmetro regulado pela demanda de água de amassamento e pelo fator água/cimento. Embora um dos objetivos da dosagem do concreto seja atingir um consumo moderado de cimento, pois trata-se de um material com custo elevado em relação aos resto dos agregados, mas é necessário que haja um consumo mínimo de cimento a fim de atender a alguns critérios de durabilidade e resistência (NEVILLE & BROOKS, 2013).

Para os casos em que o teor de cimento é reduzido há uma tendência a produção de misturas ásperas que proporcionam um acabamento precário ao concreto. Ao passo que, teores excessivos de cimento não são indicados, pois apesar

de apresentarem boa coesão, são viscosos e demandam uma quantidade considerável de matéria-prima e energia na sua produção (MEHTA & MONTEIRO, 2008; CREMONINI *et al.*, 2001).

Concretos com altos consumos de cimento ainda possuem menor capacidade de absorver deformações e maior propensão ao aparecimento de fissuras. Isso ocorre por conta do aumento da retração química, pois é gerada maior quantidade de produtos da hidratação com volumes menores, da retração térmica, através do calor excessivo de hidratação, e do módulo de deformação elevado. Sendo assim, nota-se que um alto consumo de cimento não gera apenas maiores custos, mas também causa problemas de durabilidade nas estruturas de concreto (CREMONINI *et al.*, 2001; NEVILLE & BROOKS, 2013).

A fixação do teor de cimento é feita a partir de experiências, gráficos ou de tabelas geradas a partir de dados de ensaio em laboratório. Essas tabelas funcionam apenas como orientação para a definição do traço do concreto, pois as proporções recomendadas geralmente baseiam-se em granulometrias satisfatórias (NEVILLE, 1997).

De maneira mais ampla, no âmbito do solo cimento, Foppa (2005) verificou que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cimento. Esse aumento de resistência foi estudado em conjunto com a redução da porosidade do material compactado e é explicado através da existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos. Porém, a quantidade de cimento no solo cimento é relativamente baixa quando comparada ao concreto, e para este último esta quantidade deverá ser vinculada a diversos outros fatores, como já citados.

2.3 FATOR ÁGUA/CIMENTO

Normalmente, é assumido que a resistência de um concreto, cujos parâmetros de idade, cura e temperatura são fixos, depende somente do grau de adensamento e da relação água/cimento. Porém, mesmo que o concreto seja totalmente adensado, não é possível expulsar todo ar de dentro dele, e devido a essa pequena quantidade

de ar aprisionado, alguns vazios persistem no interior da mistura (NEVILLE, 1997; NEVILLE & BROOKS, 2013).

A resistência é considerada inversamente proporcional ao fator água/cimento, pois ele determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio da hidratação. Tal correlação é conhecida como Lei de Abrams, que é um caso especial para uma regra geral formulada empiricamente por Féret em 1896, e pode ser apresentada da seguinte maneira (NEVILLE, 1997; NEVILLE & BROOKS, 2013):

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde: f_c corresponde à resistência à compressão do concreto;

K_1 e K_2 correspondem a constantes empíricas; e

a/c corresponde ao fator água/cimento da mistura de concreto.

Em um concreto de baixa e média resistência preparado com agregado comum, ambas as porosidades, da zona de transição e da matriz, determinam a resistência, sendo assim, é válida a relação inversa entre o fator água/cimento e a resistência do concreto mostrada anteriormente. Porém, essa correlação não se aplica para concretos de alta resistência, ou seja, com fatores água/cimento muito baixos (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Nota-se, então, que há um limite de funcionamento da Lei de Abrams, pois para misturas com relações água/cimento muito baixas, o adensamento pleno não é atingido. Sendo assim, conseqüentemente os teores de cimento nessas misturas são elevados e, por conta disso, apresentam uma redução na resistência. Tal comportamento pode ser justificado pelas tensões induzidas a partir da retração que, quando contidas, causam fissuras e ocasionam a perda de aderência entre a pasta e o agregado (NEVILLE, 1997).

Deve-se salientar que, segundo Neville & Brooks (2013), a resistência depende da relação água/cimento efetiva, que é calculada a partir da água de amassamento menos a água absorvida pelo agregado. Isto é, assume-se que, no momento da mistura, o agregado utiliza parte da água de modo a alcançar a condição saturada com superfície seca.

Outra importante questão levantada por Neville (1997) é o fato de que apesar de, na prática, a relação água/cimento se constituir o principal fator simples na determinação da resistência do concreto, essa regra tem sido criticada por conta da sua falta de abrangência.

2.4 FATOR VAZIOS/CIMENTO

A relação vazios/cimento, como definido por Larnach (1960), é razão entre o volume total de vazios e o volume total de cimento. Em sua pesquisa o autor apresenta o fator correlacionando a quantidade de vazios com a quantidade de cimento, para estimativa da resistência de solo cimento (FOPPA, 2005).

Como a compactação em solos ou no solo-cimento não consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, Larnach (1960) também afirma que a resistência não pode ser correlacionada, através da Lei de Abrams, com a relação água/cimento. O motivo disso é porque essa correlação só pode ser aplicada a materiais onde atinge-se o adensamento pleno, isto é, onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água, como é o caso considerado para o concreto (HELENE & TERZIAN, 1993).

A relação existente entre a resistência e a relação vazios/cimento já foi pesquisada e demonstrada para argamassas e concretos através dos modelos expostos por Ferét e particularizado por Abrams, mencionado anteriormente. Os resultados desses estudos foram obtidos a partir de dados experimentais, constituindo-se, assim, em correlações empíricas, que apesar de não levarem em conta todos os aspectos da questão, são aceitas como viáveis e representativas (FOPPA, 2005).

De acordo com Helene & Terzian (1993), o modelo teórico mais atualizado e adotado para representar a resistência do concreto levando em conta o teor de vazios foi desenvolvido por Powers (1958) e tem por referência a porosidade capilar da pasta de cimento endurecida.

Notou-se, através de pesquisas com solo cimento, como por exemplo, Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2010), que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através da relação

vazios/cimento ajustada por um expoente correspondente, também, ao material estudado (FOPPA, 2005).

No entanto, foi utilizada uma forma mais elegante de expressar a relação vazios/cimento, utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material (η) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cimento, o teor volumétrico de cimento expresso em porcentagem do volume total (C_{iv}). Assim, obteve-se tanto no numerador quanto no denominador, valores adimensionais que possibilitaram, ainda, um ajuste de eixos a partir de um expoente no denominador relacionado com o tipo de solo em questão (FOPPA, 2005).

Sendo assim, por conta das manipulações numéricas mencionadas, percebeu-se um melhor ajuste dos dados experimentais, uma vez que as novas variáveis eram proporcionais às utilizadas anteriormente (FOPPA, 2005).

2.5 POROSIDADE

Segundo Grigoli (2001), a porosidade de um material é a sua propriedade de apresentar poros ou vazios e é representada pela fração do volume total de uma amostra porosa, que é ocupada por poros ou por espaços vazios.

Embora na pasta ou na argamassa de cimento endurecido a porosidade possa ser relacionada à resistência, no caso do concreto a situação não é simples. A presença de microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz pasta de cimento faz do concreto um material muito complexo para se obter a resistência através das relações exatas entre resistência e porosidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A validade geral da relação entre resistência e a porosidade, contudo, deve ser respeitada, porque as porosidades das fases componentes do concreto, incluindo a zona de transição, tornam-se, de fato, limitantes da sua resistência. No caso de um concreto contendo agregados de baixa porosidade ou de alta resistência, a resistência do material será governada tanto pela resistência da matriz da pasta de cimento como pela resistência da zona de transição (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

As características dos poros do cimento hidratado são diferentes. Isso ocorre devido à influência das partículas de agregado graúdo sobre a pasta de cimento situada nas suas proximidades. Winslow e Liu, em 1990 encontraram que uma

mesma composição de pasta com mesmo grau de hidratação resulta no aumento da porosidade com a presença de agregado graúdo. A presença do agregado miúdo também tem um efeito semelhante, porém menor (NEVILLE, 1997).

A rigor, a resistência do concreto é influenciada pelo volume de todos os vazios: ar aprisionado, poros capilares e poros do ar incorporado, quando presente. Mas além do volume, a forma e as dimensões dos poros também têm influência. A forma das partículas sólidas e o seu módulo de elasticidade influenciam na distribuição de tensões e, portanto, nas concentrações de tensões no interior do concreto. Geralmente, para uma mesma porosidade, poros menores resultam em uma resistência maior da pasta (NEVILLE, 1997).

2.6 MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS

Estudos de dosagem devem ser realizados com o objetivo de alcançar a mistura ideal e mais econômica numa determinada região, com os materiais ali disponíveis, para atender uma série de requisitos. Esses requisitos serão em maior ou menor quantidade dependendo da complexidade do trabalho a ser realizado e segundo o grau de esclarecimento técnico e prático do usuário do concreto que demandou o estudo (ISAIA, 2011).

Por estudo de dosagem, entende-se os procedimentos necessários para a obtenção da proporção mais adequada entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo sempre mais rigorosa e preferível a proporção expressa em massa seca de materiais (ISAIA, 2011).

A atividade de dosagem não somente estabelece as proporções dos materiais constituintes do concreto como também determina as características necessárias para que seja alcançado um desempenho satisfatório do produto final, em termos de qualidade e de economia, por isso constitui-se de grande importância (BOGGIO, 2000).

Para fins de estudo, é interessante escolher métodos de dosagem que apresentem uma aplicação intensa em algumas regiões urbanas, de significativa importância econômica do país. Essa aplicação contribuiu para incentivar seu uso de forma geral, testando e ampliando seus limites de utilização. Além disso, a tecnologia

elaborada, experimentada e discutida pelos pesquisadores, engenheiros e técnicos, nos grandes centros urbanos, tende-se a espalhar para as regiões vizinhas, sendo, então, progressivamente adotada por outros engenheiros e técnicos que dispõem de procedimentos aprimorados e consagrados em termos da eficácia dos resultados obtidos (BOGGIO, 2000).

Ainda, segundo Boggio (2000), alguns métodos que, devido ao peso das instituições que os desenvolveram e divulgaram, têm apresentado uma grande difusão quanto ao seu conhecimento e uso são: O método do IPT/EPUSP, desenvolvido pelos pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e posteriormente adaptado e divulgado pelos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (HELENE & TERZIAN, 1993) e o método da ABCP/ACI, adaptado do método da ACI 211.1-81 (ACI, 1985) para a realidade nacional, pelo engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues (RODRIGUES, 1990).

Ambos os métodos de dosagem supracitados, IPT/EPUSUP e ABCP/ACI, utilizam-se da relação água/cimento como parâmetro principal. Sendo que, o primeiro estabelece, como resultado final de sua aplicação, um diagrama de dosagem graficado sobre três quadrantes onde são representadas “leis de comportamento” através de um traço inicial e mais dois auxiliares, um pobre e um rico. (BOGGIO, 2000).

A partir da Figura 1 abaixo é possível visualizar as variáveis, atividades e dados de entrada do método ITP/EPUSP.

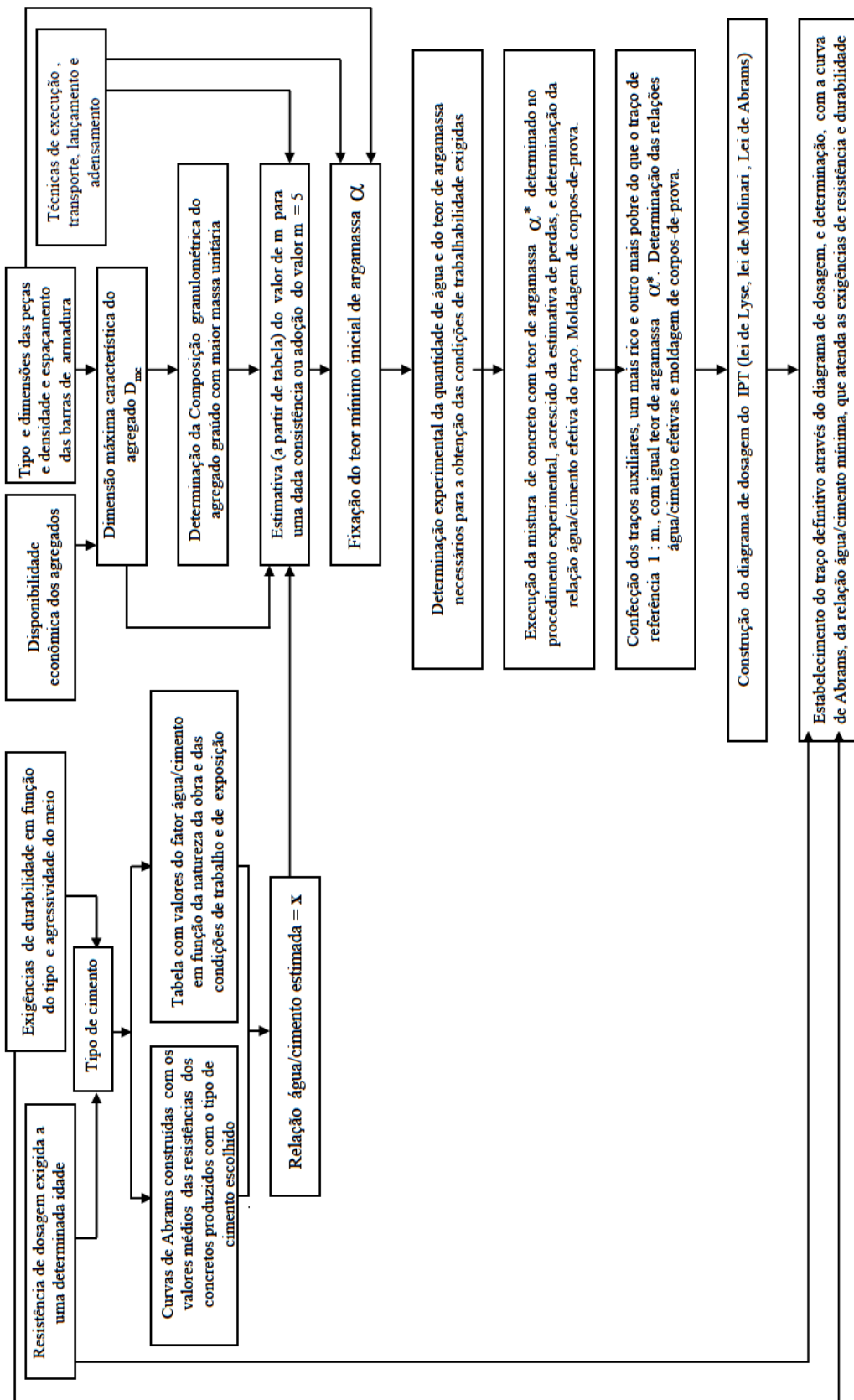


Figura 1 - Diagrama simplificado do método de dosagem EPUSP/IPT
 Fonte: Boggio, 2000.

Já o método de dosagem da ABCP/ACI, através de diversos fatores relativos aos materiais, às condições de execução e adensamento e às dimensões das peças, considera a trabalhabilidade do concreto. Esse procedimento de dosagem foi desenvolvido para concretos de consistência plástica, e fornece traços com baixos teores de areia como uma tentativa de obter misturas mais econômicas. Ele pode ser retratado numa sequência de etapas definidas incorporando várias tabelas que facilitam a determinação dos parâmetros necessários para a obtenção do traço inicial, mostrados, a seguir, na Figura 2 (BOGGIO, 2000).

A apresentação do traço em massa é realizada em função das relações dos diversos componentes em relação à massa de cimento. Uma vez estipulado o traço teórico procede-se à mistura experimental, que permite realizar os acertos necessários para a obtenção de um concreto adequado aos requisitos de trabalhabilidade e desempenho exigidos (BOGGIO, 2000).

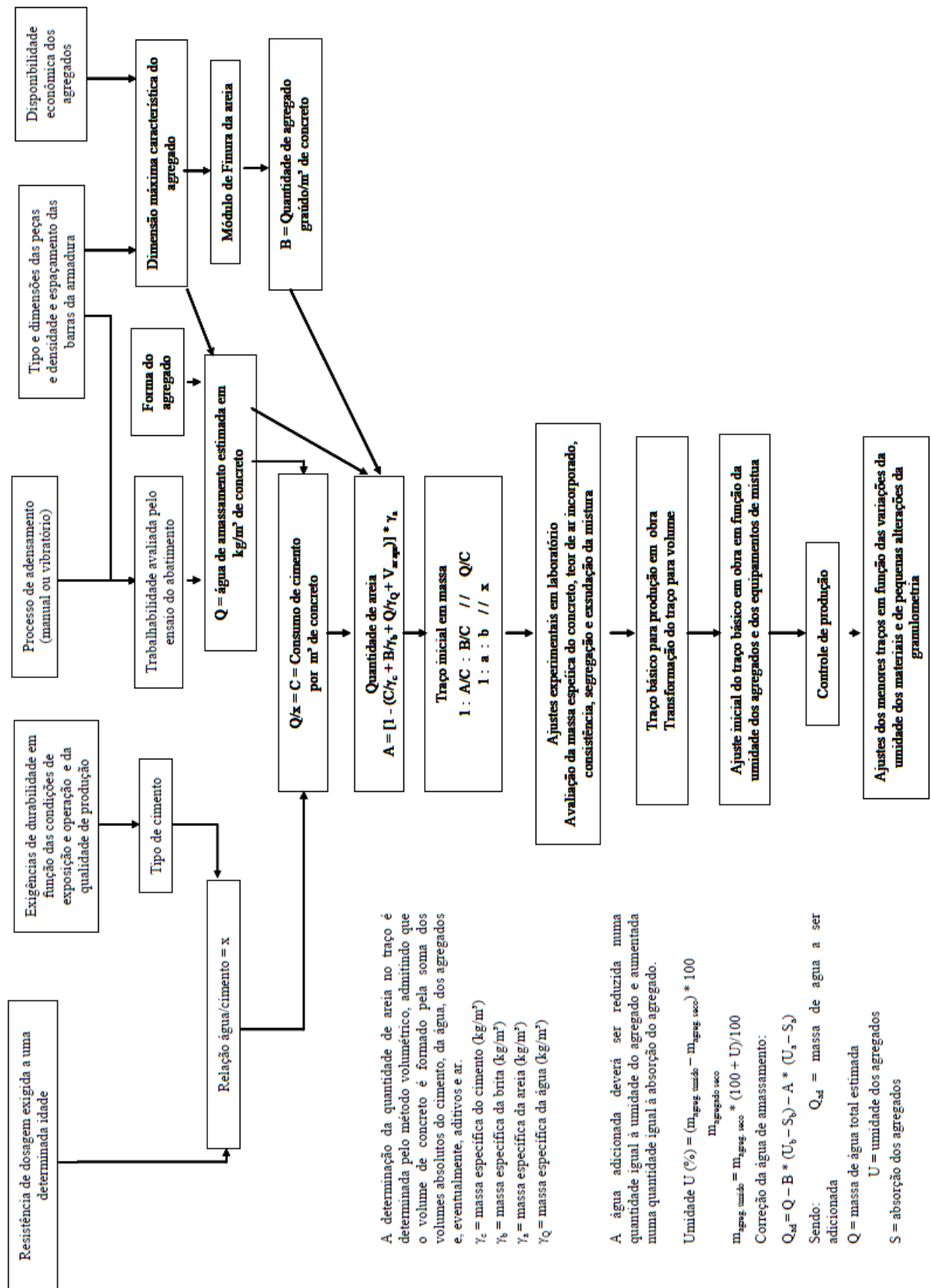


Figura 2 - Diagrama simplificado do método de dosagem da ABCP
Fonte: Boggio, 2000

3 METODOLOGIA

O presente trabalho pode ser classificado, de acordo com os objetivos da pesquisa, como explicativo, pois, segundo Gil (1999), o foco é no desenvolvimento, esclarecimento e na modificação de conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores.

Outro tipo de classificação apresentada por Prodanov & Freitas (2013) caracteriza a pesquisa quanto sua natureza em aplicada e básica. Já, a classificação quanto à natureza da pesquisa apresentada por Gil (1999) *apud* Oliveira (2011) propõe as classes quantitativa e qualitativa. Nesse caso, a pesquisa em questão se caracteriza por ser básica e quantitativa, pois envolve verdades e interesses universais, buscando gerar conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência, sem prever uma aplicação prática (PRODANOV e FREITAS, 2013). Além disso, trabalha os dados buscando seu significado, tendo como base a percepção do fenômeno dentro do seu contexto e captando não só sua aparência como também suas essências, procurando explicar sua origem, relações e mudanças, e tentando intuir as consequências (OLIVEIRA, 2011).

De acordo com Oliveira (2011) ainda há outro tipo de classificação quanto à escolha do objeto de estudo. Caracteriza-se então, nesse contexto, o presente trabalho em um estudo por amostragem probabilística e estratificada, pois, o estudo estatístico é realizado com a coleta de parte de uma população, isto é, amostragem, e cada elemento da população pode ser selecionado para compor a amostra tendo uma chance conhecida e diferente de zero. Além disso, o pesquisador tem controle sobre o erro amostral da pesquisa e há a necessidade de dividir a população em estratos homogêneos (OLIVEIRA, 2011).

O objetivo da presente pesquisa foi alcançado a partir da dosagem de concretos com traços semelhantes. Em um primeiro momento foi alterado apenas o fator água/cimento, correspondendo aos valores de 0,50, 0,60.e 0,70. Posteriormente, partindo do traço que possui relação água/cimento de 0,70, foi alterado o teor de cimento em relação a quantidade de agregados em 1,10 e 1,20. Desse modo foram obtidos mais dois traços diferentes, enquanto que, em ambos os casos, a proporção de agregados se manteve fixa.

Para a obtenção de dados consideráveis, além dos ensaios de caracterização dos agregados, em todos os ensaios, foram moldados três corpos de prova com mesmo traço e sob as mesmas condições de cura submersa, fazendo valer a média simples dos três valores obtidos caso o desvio padrão e o coeficiente de variação estivessem aceitáveis. Caso contrário, foi realizada a média simples dos dois valores mais próximos entre si para todos os índices analisados.

No estado fresco, o concreto foi submetido ao ensaio de abatimento ou *Slump Test*, para verificação de sua consistência, e ao ensaio de umidade. Após a confecção dos corpos de prova cilíndricos e cura submersa, no estado endurecido, foram realizados dois ensaios: compressão simples e tração por compressão diametral.

Através da análise dos valores obtidos nos ensaios citados, foi realizada a quantificação da influência do teor de cimento, da porosidade, e da relação vazios/cimento. Assim como, a avaliação da relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples.

A fim de verificar o parâmetro porosidade nos concretos e a sua influência na resistência mecânica, foram considerados dois tempos de cura para o rompimento dos corpos de prova, 3 e 7 dias, isso devido ao tipo de cimento utilizado e ao seu grau de hidratação, o qual tende a ser maior com o tempo, diminuindo assim a porosidade do concreto.

Como análise dos resultados, além do tratamento estatístico, foram calculados, respectivamente, os valores de porosidade e fator vazios/cimento para posterior construção dos gráficos e obtenção das expressões e coeficientes de ajuste.

O diagrama abaixo traz uma visualização melhor dos processos realizados para que os objetivos do trabalho em questão fossem alcançados.

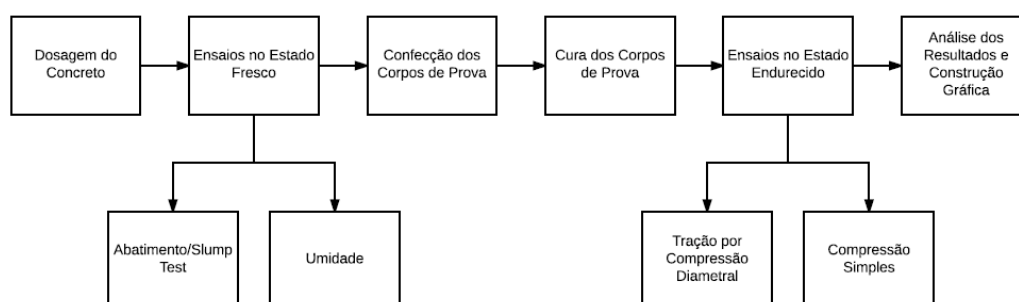


Figura 3 - Diagrama das atividades a serem realizadas na pesquisa em questão
Fonte: Autoria Própria

3.1 MATERIAIS

Para realização dos ensaios propostos no presente trabalho utilizou-se areia média seca, brita zero, cimento Portland CPV – ARI – RS e água. Através dos dados obtidos nos ensaios de caracterização dos referidos materiais, foi possível a utilização dos mesmos na realização dos traços de concreto necessários à pesquisa.

3.1.1 Caracterização dos Agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados para todos os agregados utilizados nos diferentes traços de concreto de acordo com a norma NBR 7211:2009 - Agregado para concreto - Especificação.

Através dos ensaios propostos na referida norma, obteve-se conforme os Gráficos 1 e 2 abaixo, as composições granulométricas dos agregados graúdo e miúdo bem como seus respectivos módulos de finura e dimensão máxima característica, dispostos na Tabela 1.

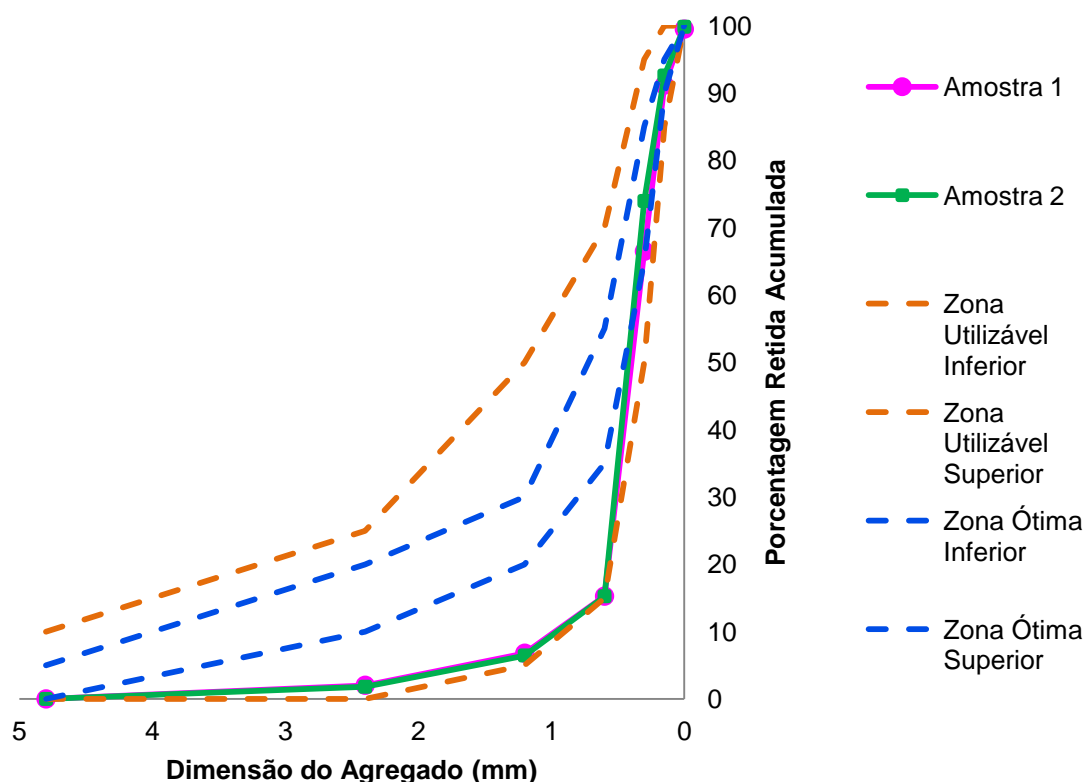


Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo
Fonte: Autoria Própria

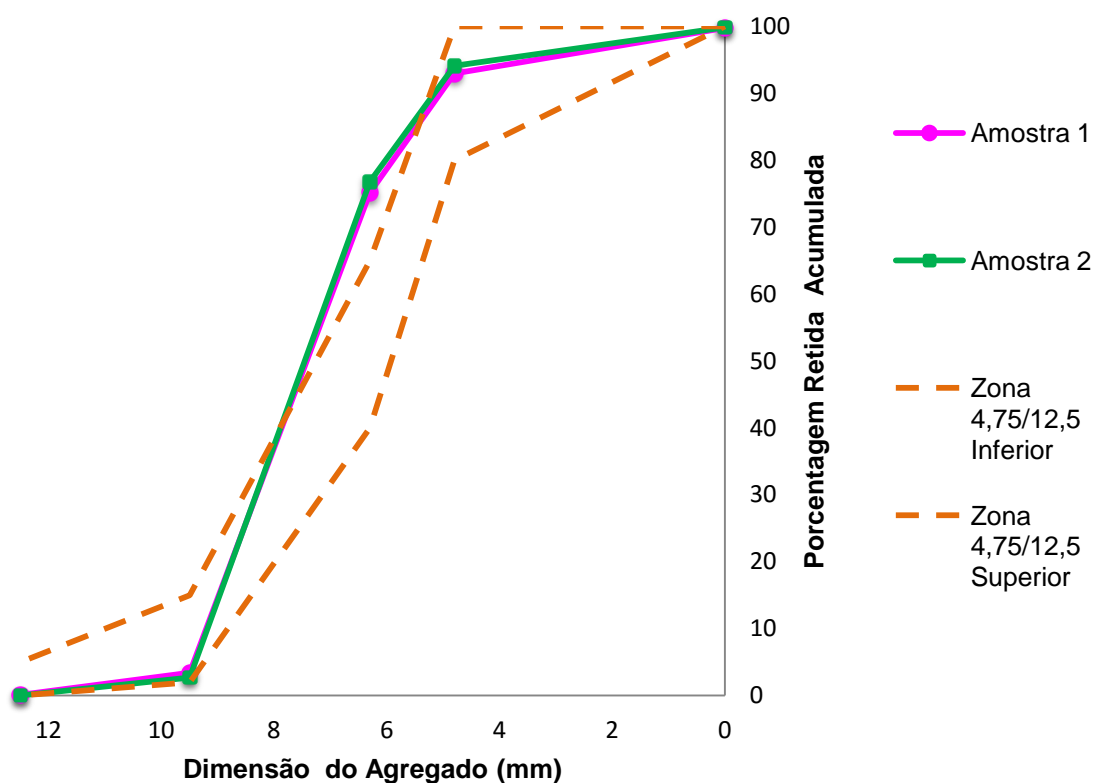


Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo
Fonte: Autoria Própria

Agregado	Amostra	Módulo de Finura (mm)	Dimensão Máxima Característica (mm)
Graúdo	01	0,964	9,5
	02	0,968	
Miúdo	01	1,817	2,4
	02	1,901	

Tabela 1 - Módulo de finura e dimensão máxima característica dos agregados graúdo e miúdo
Fonte: Autoria Própria

Como os itens 5.4 e 6.4 da NBR 7211:2009 trazem algumas propriedades físicas requeridas no âmbito dos ensaios especiais foram realizados, também, os ensaios de massa específica do agregado miúdo, através do ensaio do frasco de Chapman, previsto na NBR 9776:1987 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, mostrado na Tabela 2 a seguir. Bem como os ensaios de massa específica do agregado graúdo, conforme mostra a Tabela 3.

Amostra	Massa (g)	Volume Inicial (ml)	Volume Final (ml)	Massa Específica (g/cm ³)
01	500	200	391	2,618
02	500	200	390	2,632
Média Massa Específica (g/cm³)				2,625

Tabela 2 - Massa específica do agregado miúdo
Fonte: Autoria Própria

Amostra	Massa Água (g)	Massa Água + Agregado (g)	Massa Específica (g/cm ³)
01	653,7	982,4	2,919
02	653,7	982,6	2,922
Média Massa Específica (g/cm³)			2,921

Tabela 3 - Massa específica do agregado graúdo
Fonte: Autoria Própria

Além disso, apesar de utilizar todos os agregados secos pra realização dos traços referentes a essa pesquisa, conforme os resultados presentes na Tabela 4, realizou-se também o ensaio de umidade do agregado miúdo tratando-o como solo, previsto pela NBR 6457:1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Nº Cápsula	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Amostra Úmida (g)	Massa Úmida (g)	Massa Cápsula + Amostra Seca (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)
1	22,63	69,06	46,43	68,42	45,79	1,398%
41	22,86	66,22	43,36	65,78	42,92	1,025%
60	23,47	65,38	41,91	64,95	41,48	1,037%
Média Umidade (%)						1,031%

Tabela 4 - Umidade do agregado miúdo
Fonte: Autoria Própria

3.1.2 Caracterização do Cimento

O cimento utilizado para todos os ensaios referentes ao presente trabalho foi o CPV – ARI – RS Obras Especiais da marca Votoran adquirido em Pato Branco - PR. Em contato com o fornecedor da marca, foi constatado que sua fabricação é realizada na unidade de Rio Branco – AC e, então, foi disponibilizado um boletim de ensaios do cimento em questão constado no Anexo A.

3.2 MÉTODOS

Para obtenção dos resultados esperados através dessa pesquisa, primeiramente, foi pesquisado e estabelecido um traço usual em massa para o concreto de 1:2,5:3,5 (cimento:areia:brita). A partir desse traço e dos valores de massa específica dos agregados e do cimento foi calculado o consumo de cimento utilizando-se a Fórmula 2, vinculada ao método de dosagem do IPT/EPUSP, mostrada abaixo.

$$C = \frac{1000}{\left(\frac{c}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x + ar_{incorporado\ e/ou\ aprisionado}\right)} \quad (2)$$

Onde: C corresponde ao consumo de cimento por m^3 de concreto expresso em kg/m^3 ;

γ_a , γ_b , e γ_c correspondem, respectivamente, as massas específicas, da areia, da pedra e do cimento expressas em g/cm^3 ;

a , b e c correspondem, respectivamente, aos valores do proporcionamento, em massas, da areia, da pedra e do cimento expressas em Kg; e

$ar_{incorporado\ e/ou\ aprisionado}$ corresponde ao teor de ar incorporado intencionalmente ou aprisionado involuntariamente no processo de mistura por m^3 de concreto e está expresso em dm^3/m^3 .

Após a realização do processo de imprimação da betoneira foram realizados três traços alterando apenas o fator água/cimento em três valores, 0,5, 0,6 e 0,7. Já, em um segundo momento, realizou-se mais dois traços tendo como base o traço de maior fator água/cimento realizado anteriormente e alterando apenas o valor do teor de cimento em 1,10 e 1,20, como mostra a Tabela 5 a seguir.

Traços	Cimento	Areia	Brita 0	Água	Consumo de Cimento (kg/m ³)
1	1	2,5	3,5	0,5	335,126
2	1	2,5	3,5	0,6	324,259
3	1	2,5	3,5	0,7	314,075
4	1,1	2,5	3,5	0,7	341,926
5	1,2	2,5	3,5	0,7	364,809

Tabela 5 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto de cada traço
Fonte: Autorial Própria

Sendo assim, foram moldados, para cada traço, doze corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 12655:2006 - Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento e mantidos sob as mesmas condições de cura submersa. Os ensaios realizados na presente pesquisa, tanto com o concreto fresco como endurecido, estão mais especificados abaixo:

3.2.1 Ensaio de Abatimento (*Slump Test*)

Este ensaio foi realizado para cada traço de concreto no estado fresco de acordo com a norma NBR NM 67:1998 - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.

Utilizando-se da aparelhagem descrita na norma foram colocadas três camadas sendo elas adensadas com 25 golpes cada. Logo após esse procedimento, o molde foi retirado, como mostrado na Figura 4, e utilizou-se uma trena para medir o abatimento de cada traço de concreto rodado.



Figura 4 - Concreto fresco submetido ao ensaio de abatimento do tronco de cone
Fonte: Autorial Própria

3.2.2 Ensaio de Umidade

Este ensaio foi realizado em duas amostras para cada traço de concreto no estado fresco de acordo com a norma NBR 6457:1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Os valores de umidade inicial de cada mistura obtidos através desse ensaio foram utilizados para o cálculo da densidade do concreto seco que, por sua vez, foi utilizada para o cálculo do peso do concreto seco.

Para realização do ensaio em questão, uma pequena quantidade de concreto foi colocada nas cápsulas especificadas e pesada, como mostra a Figura 5. Posteriormente, as cápsulas com o material foram submetidas à temperatura prescrita na norma, em uma estufa, por cerca de 60 horas. Depois de alguns minutos no dissecador, como mostra a Figura 6, as amostras eram pesadas novamente. Sendo assim, a umidade, em percentual, foi calculada através da fórmula apresentada na referida norma.



Figura 5 - Concreto fresco submetido à pesagem para o ensaio de umidade
Fonte: Autoria Própria



Figura 6 - Concreto endurecido submetido ao processo de dissecação
Fonte: Autoria Própria

3.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Este ensaio foi realizado em três corpos de prova para cada traço e idade de rompimento do concreto no estado endurecido de acordo com a norma NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos.

Na referida idade, após a confecção e cura submersa dos três corpos de prova, foi realizado o ensaio de compressão simples através da disposição vertical dos corpos de prova, como mostra a Figura 7 abaixo, em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico e módulo eletrônico de leitura.

Após a leitura dos valores, eles foram transformados em unidades convenientes para melhor apresentação dos resultados.



**Figura 7 - Disposição vertical de um corpo de prova no ensaio de compressão simples
Fonte: Autorial Própria**

3.2.4 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi realizado em três corpos de prova para cada traço e idade de rompimento do concreto no estado endurecido de acordo com a norma NBR

7222:1994 - Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.

Na referida idade, após a confecção e cura submersa dos três corpos de prova, foi realizado o ensaio de tração por compressão diametral através da disposição horizontal dos corpos de prova, como mostra a Figura 8 abaixo, em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico e módulo eletrônico de leitura.

Após a leitura dos valores e segundo a fórmula apresentada na norma citada anteriormente, os resultados foram transformados a fim de representar a resistência de um corpo de prova à tração em unidades convenientes, possibilitando assim, a melhor apresentação dos resultados.



Figura 8 - Disposição horizontal de um corpo de prova no ensaio de tração por compressão diametral
Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados foi possível montar tabelas para o cálculo de alguns parâmetros auxiliares. Posteriormente, com base nos dados dessa e de outras tabelas, foi possível a obtenção dos valores do fator vazios/cimento e construção dos gráficos para comparação entre parâmetros de porosidade, teor de cimento e vazios/cimento e a resistência à tração e compressão do concreto.

Primeiramente, foram retirados alguns dados de peso e medidas referentes aos corpos de prova, mostrados por completo no Apêndice B e, parcialmente, para melhor visualização, na Tabela 6 abaixo, utilizados para o cálculo das respectivas massas específicas das misturas iniciais através da Fórmula 3 abaixo.

$$\gamma_{mistura} = \frac{M_{mistura}}{V_{cp}} \quad (2)$$

Onde: $\gamma_{mistura}$ corresponde à massa específica da mistura expressa em g/cm³;

$M_{mistura}$ corresponde à da mistura expresso em g; e

V_{cp} corresponde ao volume do corpo de prova expresso em cm³.

Traço	Amostra	Volume (cm ³)	Massa Molde (g)	Massa Mistura + Molde (g)	Y mistura (g/cm ³)	Média Y mistura (g/cm ³)
1	01	1570,80	2850	6280	2,184	2,180
	02	1570,80	2840	6260	2,177	
2	01	1570,80	2880	6640	2,394	2,410
	02	1570,80	2880	6690	2,426	
3	01	1570,80	2940	6740	2,419	2,403
	02	1570,80	2860	6610	2,387	
4	01	1570,80	2680	6800	2,623	2,534
	02	1570,80	2870	6710	2,445	
5	01	1570,80	2650	6310	2,330	2,336
	02	1570,80	2930	6610	2,343	

Tabela 6 – Massa específica das misturas e dados dos corpos de prova
Fonte: Autoria Própria

Nota-se um aumento na massa específica de acordo com o manejo das proporções dos materiais. Isto é, ao passo que o fator água/cimento foi alterado de modo a aumentar, a densidade responde da mesma maneira, atingindo seu máximo no traço 4 em que o fator água/cimento, no traço unitário, corresponde à 0,64. Depois disso, com o aumento da quantidade de cimento, ela decresce.

Isso ocorre pelo fato de que, no início, a quantidade de água presente na mistura não fornece uma boa trabalhabilidade, pois os valores de abatimento apresentam-se muito baixos. Sendo assim, o processo de adensamento foi dificultado, ou seja, a quantidade de vazios presentes na mistura ficou elevada.

O contrário também acontece, uma vez que a relação a/c é elevada, a relação de vazios também é alta, pois as partículas sólidas estão afastadas umas das outras em razão de estarem envoltas em água. Isso ocorre até que seja alcançado um ponto crítico na mistura, isto é, um ponto em que a água contida na mistura é apenas suficiente para fazer as ligações e no qual a relação de vazios é mínima.

4.1 ENSAIO DE UMIDADE DO CONCRETO

Foi necessário calcular a umidade inicial dos corpos de prova para utilizá-la, em conjunto com os valores de massa específica da mistura inicial, na obtenção dos valores de massa seca. Sendo assim, primeiramente, foi calculada a massa específica do concreto seco e, posteriormente a massa do concreto seco e suas respectivas quantidades de materiais.

O cálculo da massa específica do concreto seco foi realizado mediante a Fórmula 4 apresentada a seguir. Os valores obtidos através desses cálculos também estão dispostos por completo no Apêndice B e, parcialmente, para melhor visualização, na Tabela 7 abaixo.

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{mistura}}{(1 + h/100)} \quad (3)$$

Onde: γ_{seco} corresponde à massa específica do concreto seco expressa em g/cm³;

$\gamma_{mistura}$ corresponde à massa específica da mistura expressa em g/cm³;

e

h corresponde à umidade obtida no ensaio expressa em porcentagem.

Traço	Massa Cápsula (g)	Massa Mistura (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	Média Umidade (%)	Média γ mistura (g/cm ³)	Média γ seco (g/cm ³)
1	23,958	74,746	69,938	6,875%	6,946%	2,180	2,039
	23,671	60,204	56,256	7,018%			
2	23,731	75,235	69,332	8,514%	8,346%	2,410	2,224
	24,209	103,714	95,874	8,177%			
3	22,390	74,396	67,852	9,645%	9,338%	2,403	2,198
	22,698	95,788	87,854	9,031%			
4	22,703	100,769	93,169	8,157%	8,127%	2,534	2,343
	22,554	80,574	74,539	8,096%			
5	22,744	96,312	89,048	8,157%	8,341%	2,336	2,157
	23,000	87,119	80,276	8,524%			

Tabela 7 - Umidade e massa específica do concreto seco

Fonte: Aatoria Própria

É possível perceber que a massa específica do concreto seco calculada a partir da umidade possui dois comportamentos semelhantes. Um se dá frente à alteração do fator água/cimento e outro é causado pela mudança do teor de cimento.

Quando houve alteração somente da relação água/cimento a massa específica do concreto seco respondeu da mesma maneira que a massa específica da mistura com o pico de valor no traço 2. A partir do momento em que houve mudança no teor de cimento, o comportamento se repetiu com outro pico no traço 4, maior do que no traço 2, e uma queda posterior.

Tratando-se do aumento da relação água/cimento, esse comportamento é justificado de modo similar ao comportamento da massa específica da mistura, pois por mais que haja os produtos da hidratação e os vazios tenham sido reduzidos, eles permanecem na estrutura do concreto endurecido. Após o momento de pico, a água em quantidade elevada fica presa na mistura. E, como possui menor massa específica em relação aos outros componentes do concreto, faz com que a massa específica do concreto seco decresça.

Nesse sentido, quando há o aumento do teor de cimento, até certo ponto, a água que estava “sobrando” reage com uma maior quantidade de cimento, reduzindo o número de vazios e aumentando novamente a massa específica. Porém, depois do seu ápice, a massa específica do concreto seco decresce porque volta a ter um teor de finos elevado em relação à quantidade de água. Isso faz com que a trabalhabilidade do concreto seja reduzida novamente e, também por consequência do adensamento, o teor de vazios aumenta.

Em um segundo momento, através da massa específica do concreto seco, foi calculada a massa da mistura seca. Então, a partir desse valor e da proporção de finos de cada traço, foram calculadas as quantidades, em massa (M), mostradas na Tabela 8, e em volume (V), apresentadas na Tabela 9, de cada material constituinte do concreto para um corpo de prova.

Com base nesses dados calculou-se o volume de vazios de forma a subtrair as quantidades, em volume, de cada material, mantendo apenas o volume de água e ar. Os valores referentes ao volume de vazios também contam na Tabela 9.

Traços	M mistura seca (g)	M água (g)	M cimento (g)	M areia (g)	M brita (g)
1	3209,367	220,633	458,481	1146,202	1604,683
	3195,727	224,273	456,532	1141,331	1597,863
2	3464,987	295,013	494,998	1237,495	1732,494
	3521,993	288,007	503,142	1257,854	1760,996
3	3465,745	334,255	495,106	1237,766	1732,873
	3439,392	310,608	491,342	1228,354	1719,696
4	3809,270	310,730	590,169	1341,292	1877,809
	3552,384	287,616	550,369	1250,839	1751,175
5	3383,957	276,043	563,993	1174,985	1644,979
	3390,944	289,056	565,157	1177,411	1648,376

Tabela 8 - Quantidades em massa dos componentes do concreto
Fonte: Autoria Própria

Traços	V água (cm³)	V cimento (cm³)	V areia (cm³)	V brita (cm³)	V vazios (cm³)
1	220,633	151,815	437,482	549,549	431,950
	224,273	151,170	435,622	547,213	436,791
2	295,013	163,907	472,327	593,320	341,243
	288,007	166,603	480,097	603,081	321,015
3	334,255	163,943	472,430	593,450	340,974
	310,608	162,696	468,838	588,937	350,326
4	310,730	195,420	511,944	643,085	220,347
	287,616	182,241	477,420	599,717	311,418
5	276,043	186,753	448,468	563,349	372,227
	289,056	187,138	449,394	564,512	369,752

Tabela 9 - Volume de vazios e quantidades em volume dos componentes do concreto
Fonte Autoria Própria

O volume de vazios apresenta um comportamento semelhante ao da densidade do concreto seco, porém inverso. Do traço 1 para o traço 2 ocorre uma redução considerável causada pelo aumento do fator água/cimento que gera um concreto mais consistente e trabalhável. Depois disso, quando há uma quantidade maior de água, ele cresce novamente.

A partir do momento em que se aumenta o teor de cimento, atinge-se, primeiramente, outra redução considerável no volume de vazios. No entanto, com o aumento contínuo do teor de cimento inicia-se um processo de aumento do volume de vazios porque a água já não proporciona uma boa trabalhabilidade e o adensamento torna-se difícil novamente.

Através da relação entre o volume de vazios e o volume total do corpo de prova foi possível obter a porosidade de cada traço. Nesse sentido, também foi possível obter os valores do fator vazios/cimento pela relação entre o volume de vazios e o volume de cimento conforme disposto na Tabela 10.

Traços	Porosidade(%)		Vv/Vci	
1	27,50%	27,65%	2,85	2,87
	27,81%		2,89	
2	21,72%	21,08%	2,08	2,00
	20,44%		1,93	
3	21,71%	22,00%	2,08	2,12
	22,30%		2,15	
4	14,03%	16,93%	1,13	1,42
	19,83%		1,71	
5	23,70%	23,62%	1,99	1,98
	23,54%		1,98	

Tabela 10 - Porosidade e fator vazios/cimento
Fonte: Autorial Própria

Nota-se, então, que o comportamento de ambos os parâmetros apresentados na Tabela 10 é semelhante. Ou seja, nos primeiros traços, em que foi alterada apenas a relação água/cimento, há uma queda considerável, e posterior aumento gradual da porosidade e do fator vazios/cimento. Isso ocorre pelo fato de que, no início, a água presente na mistura não fornece boa trabalhabilidade e dificulta o adensamento gerando um número de vazios considerável.

Logo, a partir do momento em que há um ponto de queda máxima, os parâmetros voltam a crescer por conta da quantidade considerável de água que ocupa o espaço dos outros materiais na mistura, fazendo com que a quantidade de vazios aumente.

Após esse aumento, do traço 2 para o traço 3, há um novo declínio de ambos os parâmetros, pois foi acrescentado mais cimento, isto é, existem mais finos para reagir com a água. E depois do outro ponto de queda, representado pelo traço 4, os números de vazios aumentam por conta do processo de adensamento.

É possível observar, também na Tabela 10, os altos valores de porosidade que são obtidos por conta da metodologia utilizada. O método em questão representa a porosidade em seus cálculos como o volume de todos os vazios existentes na amostra, sejam eles preenchidos por água ou não. Sendo assim, mesmo que a quantidade de água presente na mistura não seja elevada, a porosidade se mantém em valores consideravelmente altos.

4.2 ENSAIO DE ABATIMENTO DO CONCRETO (*SLUMP TEST*)

Com base neste ensaio foi possível obter os valores de abatimento do concreto fresco, parâmetro utilizado para análise da consistência e trabalhabilidade do mesmo. Os valores correspondentes a este ensaio estão mostrados na Tabela 11 a seguir.

Traço	Abatimento (cm)
1	0,0
2	3,2
3	20,0
4	19,5
5	4,5

Tabela 11 - Abatimento do concreto
Fonte: Aatoria Própria

Nota-se que, enquanto o fator água/cimento foi elevado, o abatimento também aumentou. Ou seja, a trabalhabilidade da mistura cresceu com o aumento da relação água/cimento tornando o adensamento mais fácil. A partir do momento que o teor de cimento foi elevado, o abatimento diminuiu, tornando o concreto menos trabalhável e de difícil adensamento.

Nesse sentido, para melhor visualização e comparação nos dados, baseada nas Tabelas 5, 8 e 11, foi obtida a Tabela 12 a seguir.

Traços	Cimento	Areia	Brita 0	Água	Consumo de Cimento (kg/m³)	Abatimento (cm)	M mistura seca (g)	M água (g)	M cimento (g)	M areia (g)	M brita (g)
1	1	2,5	3,5	0,5	335,126	0,0	3209,367	220,633	458,481	1146,202	1604,683
							3195,727	224,273	456,532	1141,331	1597,863
2	1	2,5	3,5	0,6	324,259	3,2	3464,987	295,013	494,998	1237,495	1732,494
							3521,993	288,007	503,142	1257,854	1760,996
3	1	2,5	3,5	0,7	314,075	20,0	3465,745	334,255	495,106	1237,766	1732,873
							3439,392	310,608	491,342	1228,354	1719,696
4	1	2,27	3,18	0,64	341,926	19,5	3809,270	310,730	590,169	1341,292	1877,809
							3552,384	287,616	550,369	1250,839	1751,175
5	1	2,08	2,92	0,58	364,809	4,5	3383,957	276,043	563,993	1174,985	1644,979
							3390,944	289,056	565,157	1177,411	1648,376

Tabela 12 - Comparativo referentes às Tabelas 5, 8 e 11
Fonte: Aatoria Própria

4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

De maneira abrangente, comparando a resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral de todos os traços realizados em relação o fator vazios/cimento e em relação ao fator água/cimento, obtiveram-se os quatro gráficos, Gráfico 3, 4, 5 e 6. Nesses gráficos é possível notar que, apesar de alguns dados discrepantes, devido às limitações deste estudo, a tendência do fator vazios/cimento é verificada através de uma função em forma de potência. Por outro lado, nota-se que o comportamento analisado a partir do fator água/cimento não apresenta o comportamento exposto na Lei de Abrams em dados intervalos.

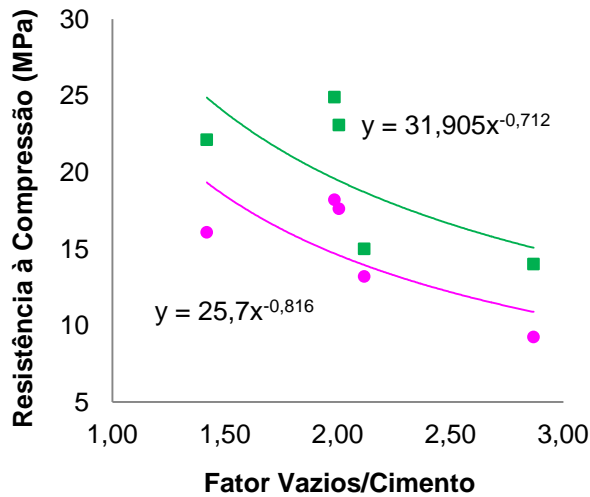


Gráfico 3 - Resistência à compressão simples em relação ao fator vazios/cimento para todos os traços
 Fonte: Autoria Própria

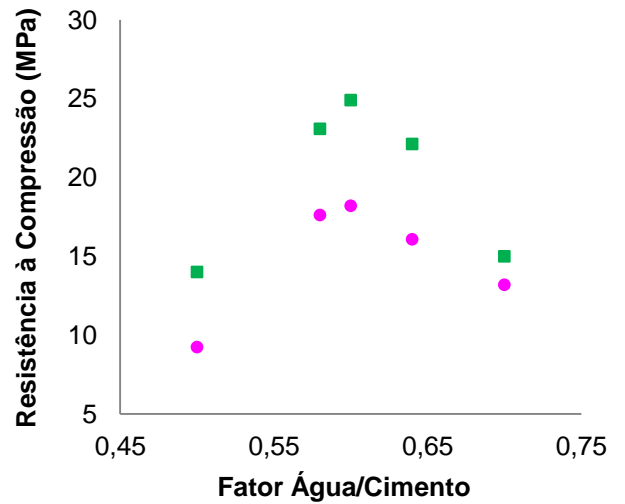


Gráfico 5 - Resistência à compressão simples em relação ao fator água/cimento para todos os traços
 Fonte: Autoria Própria

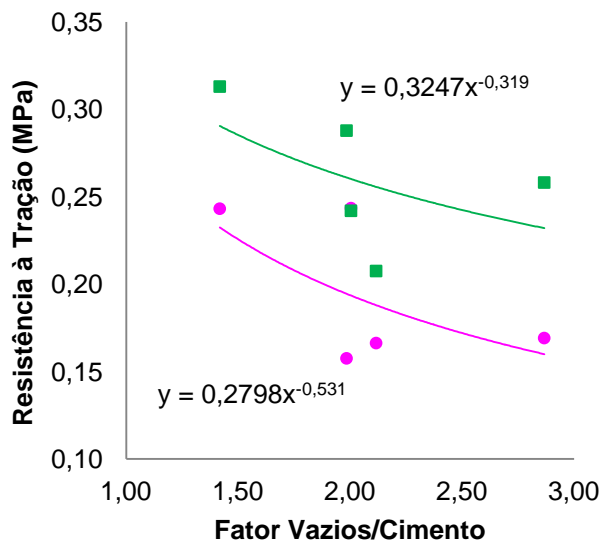


Gráfico 4 - Resistência à tração por compressão diametral em relação ao fator vazios/cimento para todos os traços
 Fonte: Autoria Própria

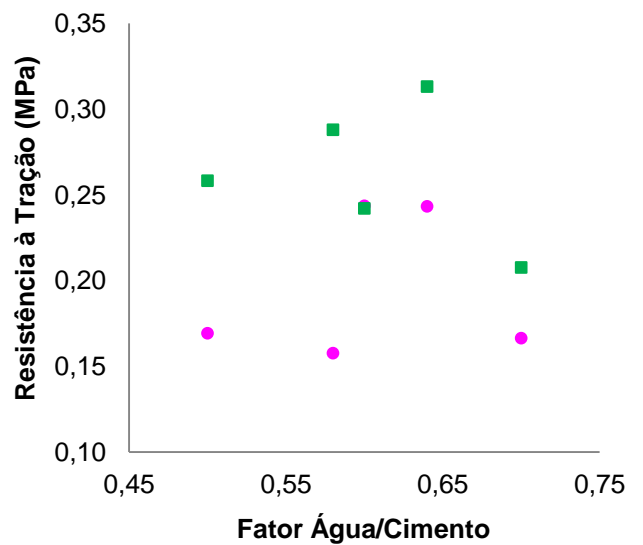


Gráfico 6 - Resistência à tração por compressão diametral em relação ao fator água/cimento para todos os traços
 Fonte: Autoria Própria

Para melhor visualização, os resultados complementares obtidos através dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral serão comparados separadamente. Isto é, primeiramente serão apresentados os resultados referentes aos traços 1,2 e 3 em que foi alterado apenas o fator água/cimento. Posteriormente, serão mostrados, então, os resultados referentes aos traços 3,4 e 5 em que foi alterado apenas o teor de cimento em relação à quantidade de materiais secos.

Os resultados obtidos através desses ensaios para cada corpo de prova também estão dispostos por completo em tabelas no Apêndice A.

4.3.1 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Teor de Cimento

Primeiramente, na análise da resistência frente à alteração do teor de cimento, obtiveram-se os Gráficos 7 e 8 abaixo, onde estão os resultados dos traços 3, 4 e 5.

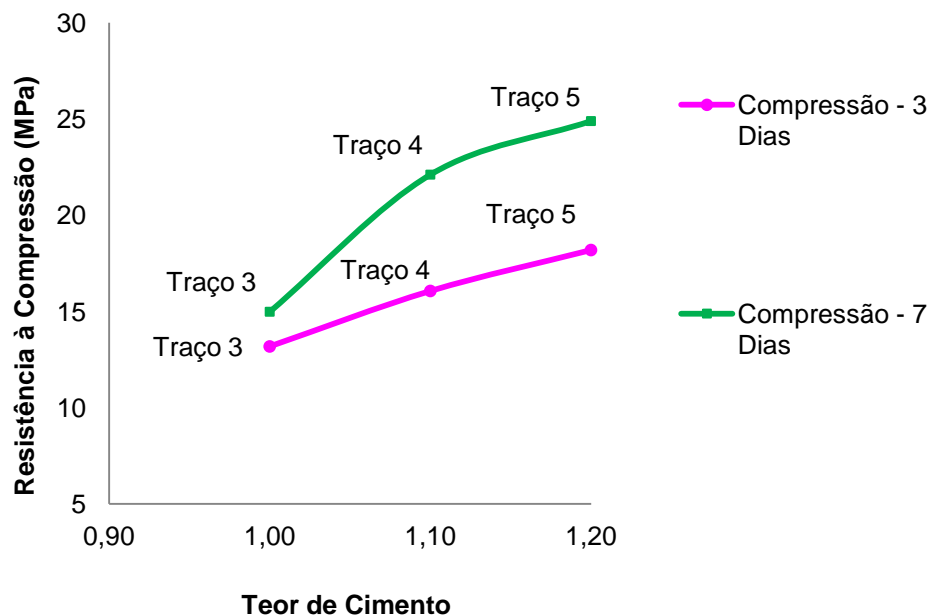


Gráfico 7 - Resistência à compressão em relação ao teor de cimento
Fonte: Autoria Própria

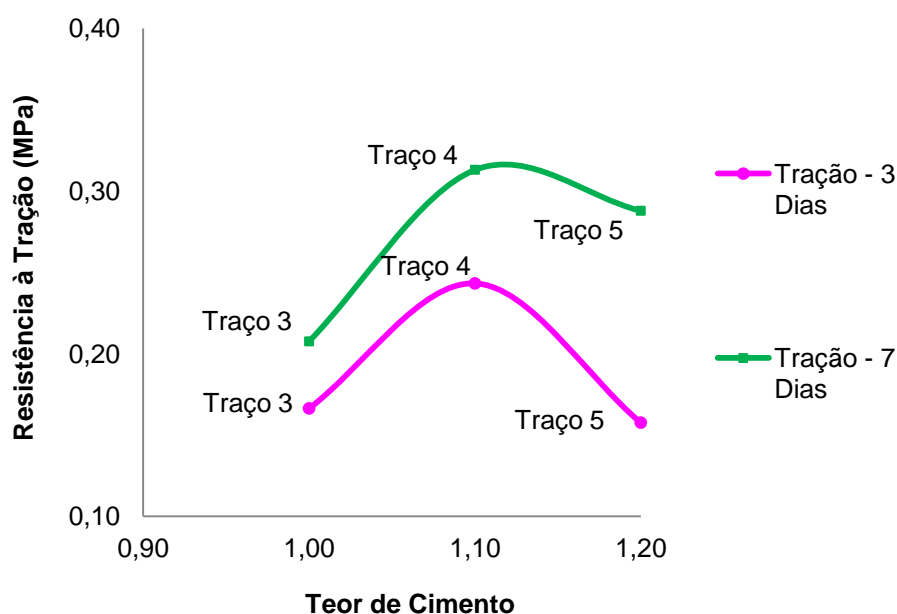


Gráfico 8 - Resistência à tração em relação ao teor de cimento
Fonte: Autoria Própria

A partir desses gráficos é possível confirmar o comportamento descrito nos resultados anteriores. Através do aumento de cimento, para reagir com a água em quantidade elevada, descrita no traço 3, há um aumento na resistência.

No Gráfico 7 o comportamento diretamente proporcional é claramente visualizado, pois o esforço de compressão ocasiona a mobilização do atrito entre as partículas, sendo assim, tanto a pasta quanto os agregados tem grande influência nos valores de resistência. Todavia, o Gráfico 8 mostra um comportamento atípico do traço 5. Apesar do aumento no teor de cimento, como a quantidade de vazios ficou elevada, ocorreu uma queda na resistência.

4.3.2 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação à Porosidade

Seguindo com as análises, na relação entre resistência à compressão e porosidade, obtiveram-se os Gráficos 9, com os resultados dos traços 1, 2 e 3 e o Gráfico 10 com os resultados dos traços 3, 4 e 5.

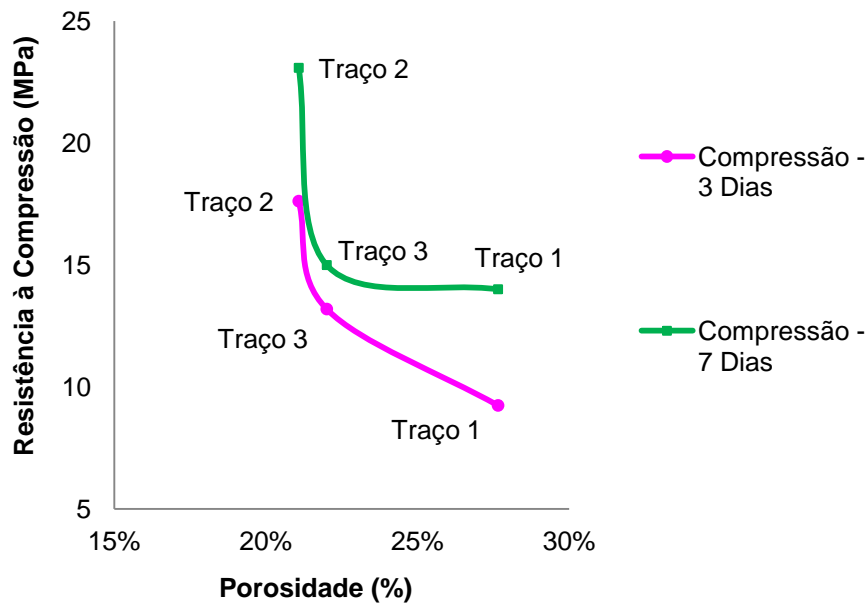


Gráfico 9 - Resistência à compressão em relação à porosidade para os traços 1, 2 e 3
Fonte: Autoria Própria

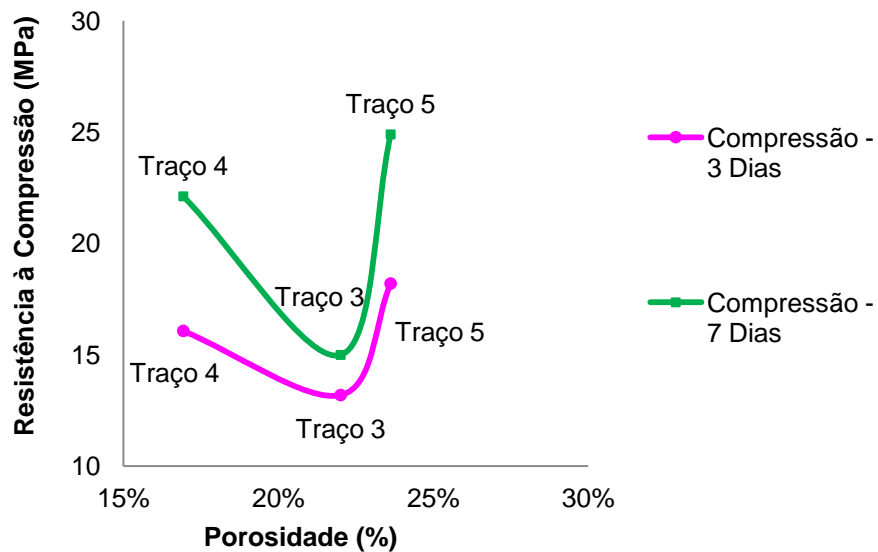


Gráfico 10 - Resistência à compressão em relação à porosidade para os traços 3, 4 e 5
Fonte: Autoria Própria

Fica perceptível, a partir do Gráfico 9 a relação inversamente proporcional existente entre a resistência e a porosidade. No entanto, o Gráfico 10, correspondente aos traços em que houve um aumento do teor de cimento, mostra um comportamento diferenciado. Isto é, mesmo que a porosidade seja elevada por conta do alto fator água/cimento, há também uma maior quantidade de cimento, fazendo com que a

resistência aumente no traço 5, porém ficando bem próxima dos resultados do traço 4.

Nesse sentido o Gráfico 10 não apresenta valores comparáveis, apenas mostra que o parâmetro porosidade capta as mudanças geradas no fator água/cimento pelo aumento no teor de cimento em relação aos agregados. Desse modo, ao mesmo tempo em que o teor de cimento foi alterado, também foi alterada a porosidade.

Na relação entre os resultados obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral e os valores de porosidade obteve-se os Gráficos 11 para os traços 1, 2 e 3 e o Gráfico 12 para os traços 3,4 e 5.

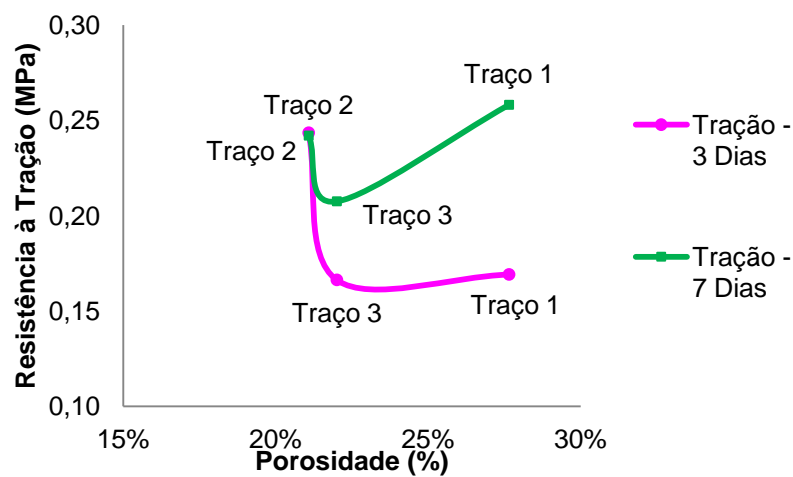


Gráfico 11 - Resistência à tração em relação à porosidade para os traços 1, 2 e 3
Fonte: Autoria Própria

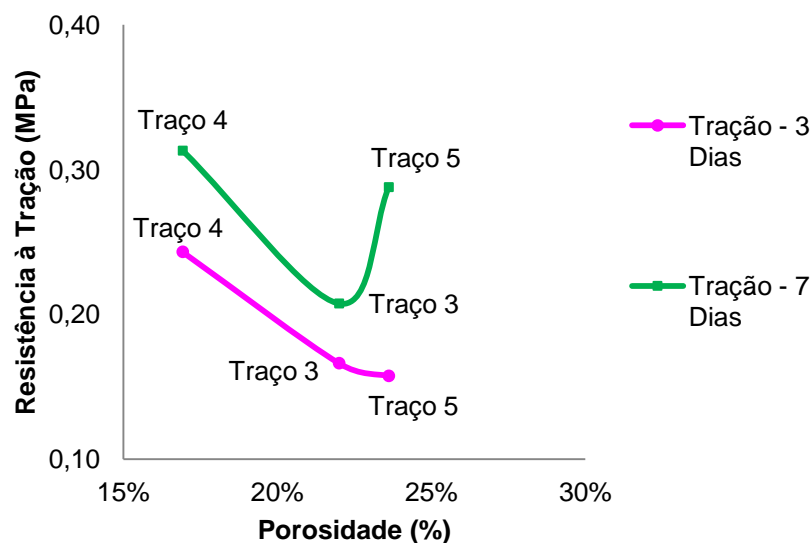


Gráfico 12 - Resistência à tração em relação à porosidade para os traços 3, 4 e 5
Fonte: Autoria Própria

Nota-se que, no Gráfico 11, os valores de resistência à tração possuem intervalo muito pequeno entre si e, também, apresentam uma pequena recaída esperada seguida de um aumento após um valor de porosidade entre 20% e 25%. Esse comportamento é explicado, pelo baixo fator água/cimento utilizado no traço 1, pois apesar de a porosidade ter um valor elevado por conta do adensamento, a pasta existente garantiu uma boa resistência à tração. Já que, para esse tipo de esforço, não há mobilização do atrito entre as partículas, sendo assim, a pasta tem grande influência em seus valores.

No Gráfico 12, ocorre um comportamento similar ao do Gráfico 10 mostrando, novamente, a sensibilidade do parâmetro porosidade às alterações, do teor de cimento e, conseqüentemente, do fator água/cimento.

4.3.3 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Fator Água/Cimento

Outros resultados obtidos através dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram os Gráficos 13 e 14, que mostram os valores de resistência a compressão em relação ao fator água cimento. Como nos resultados apresentados anteriormente, o Gráfico 13 traz os resultados referentes aos traços 1, 2 e 3 e o Gráfico 14 apresenta os resultados referentes aos traços 3, 4 e 5.

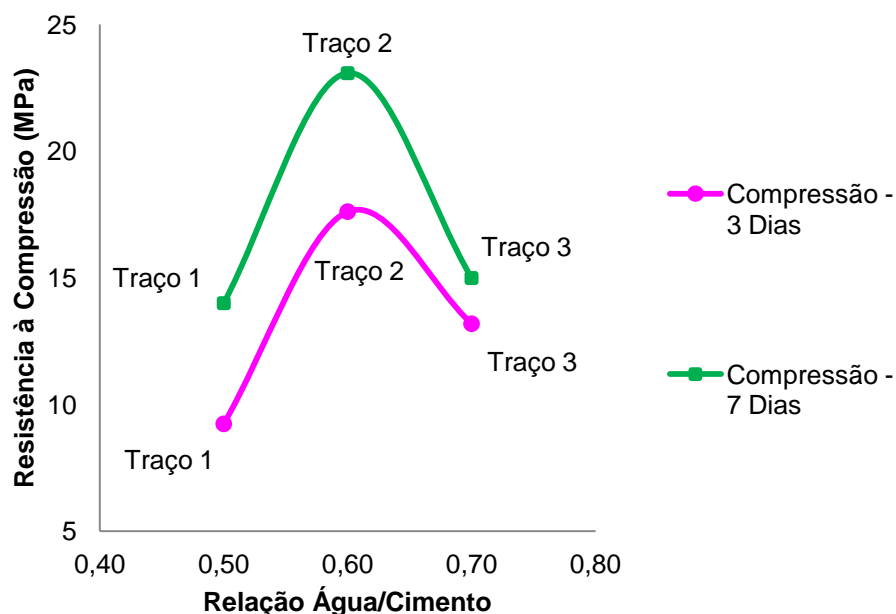


Gráfico 13 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento para os traços 1, 2 e 3
Fonte: Autoria Própria

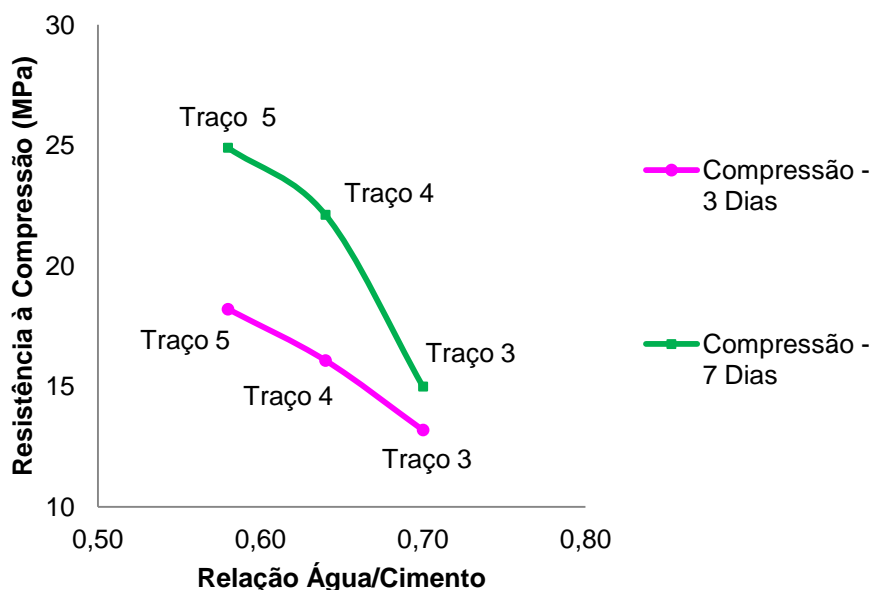


Gráfico 14 - Resistência à compressão em relação ao fator água/cimento para os traços 3, 4 e 5
Fonte: Autoria Própria

No Gráfico 13 é possível notar, claramente, a interferência da relação água/cimento na resistência à compressão do concreto. Há, primeiramente, um crescimento da resistência com o fator água/cimento e, após os valores de resistência apresentarem um pico no traço 2, ocorre uma queda da resistência.

Sendo assim, o primeiro traço gerou uma baixa resistência por conta da porosidade elevada gerada através da baixa trabalhabilidade e do adensamento dificultado. Depois do ápice da resistência ocorre uma queda desses valores no traço 3. Isso acontece porque, a partir do traço 2, inicia-se um processo de sobra de água na mistura.

Com base no Gráfico 14, é possível verificar como o teor de cimento influencia na relação água/cimento, que, por sua vez, exerce uma influência considerável na resistência do concreto. Cada vez que o teor de cimento foi elevado, conseqüentemente, o fator água/cimento foi reduzido, portanto, nota-se, apenas o comportamento de queda nas curvas, comumente obtido.

Porém, a partir da análise do Gráfico 13 e do comportamento dos outros parâmetros, acredita-se que, para valores menores do fator água/cimento, seja pela adição de cimento ou pela retirada de água, o adensamento seria dificultado novamente e os valores de resistência seriam menores do que o atingido pelo traço 5.

Ainda nesse sentido, relacionando os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral com o fator água/cimento, foi possível traçar os Gráficos 15 e 16. Seguindo o mesmo raciocínio, o Gráfico 15 representa os resultados obtidos a partir dos traços 1, 2 e 3 e o Gráfico 16 mostra os resultados obtidos a partir dos traços 3, 4 e 5.

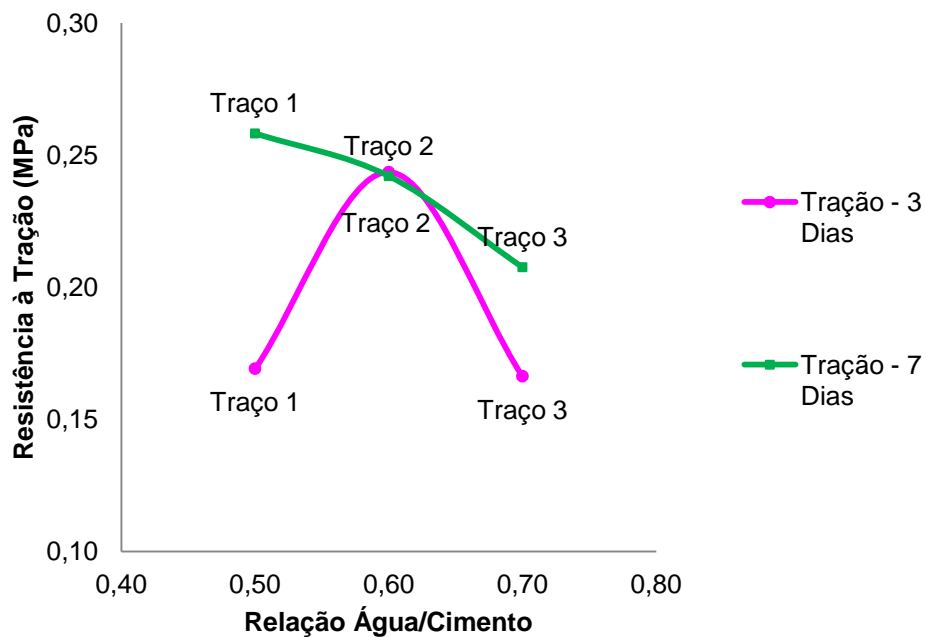


Gráfico 15 - Resistência à tração em relação ao fator água/cimento para os traços 1, 2 e 3
Fonte: Autoria Própria

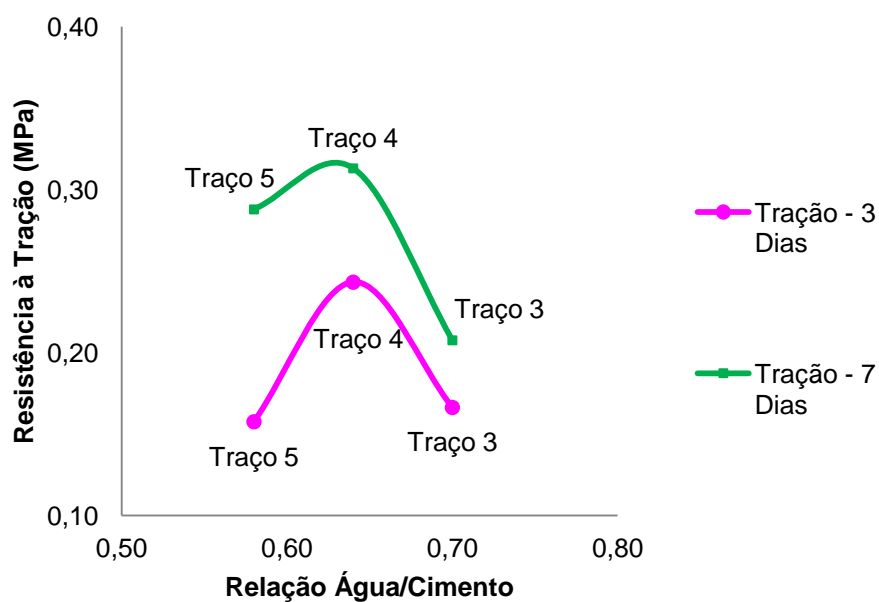


Gráfico 16 - Resistência à tração em relação ao fator água/cimento para os traços 3, 4 e 5

Fonte: Autoria Própria

De um modo geral é possível afirmar que o comportamento da resistência à tração é semelhante ao de compressão, porém, com valores menores. Esse comportamento é justificado pelos mesmos motivos apresentados anteriormente nos Gráficos 13 e 14.

No entanto, nota-se no Gráfico 15, um diferença considerável entre o comportamento da resistência à tração em 3 dias e 7 dias. Isso deve-se ao fato de que o traço 2 teve de ser realizado duas vezes, em dias diferentes. Ou seja, os resultados do traço 2 não provêm da mesma mistura pois uma mistura foi realizada e rompida aos 3 dias e outra mistura foi realizada e rompida aos 7 dias.

4.3.4 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral em Relação ao Fator Vazios/Cimento

Foram gerados ainda os Gráficos 17 e 18 que relacionam a resistência à compressão com o fator vazios/cimento. No Gráfico 17 estão os resultados obtidos a partir do ensaio de compressão simples realizado com os traços 1, 2 e 3, e no Gráfico 18, estão os resultados referentes ao mesmo ensaio com os traços 3, 4 e 5.

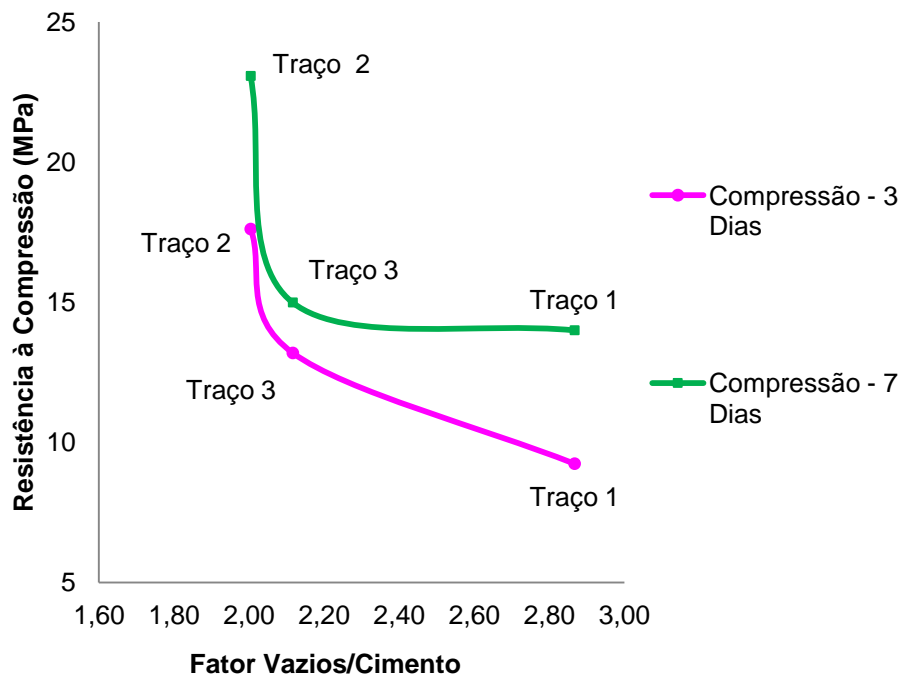


Gráfico 17 - Resistência à compressão em relação ao fator vazios/cimento para os traços 1, 2 e 3
Fonte: Autoria Própria

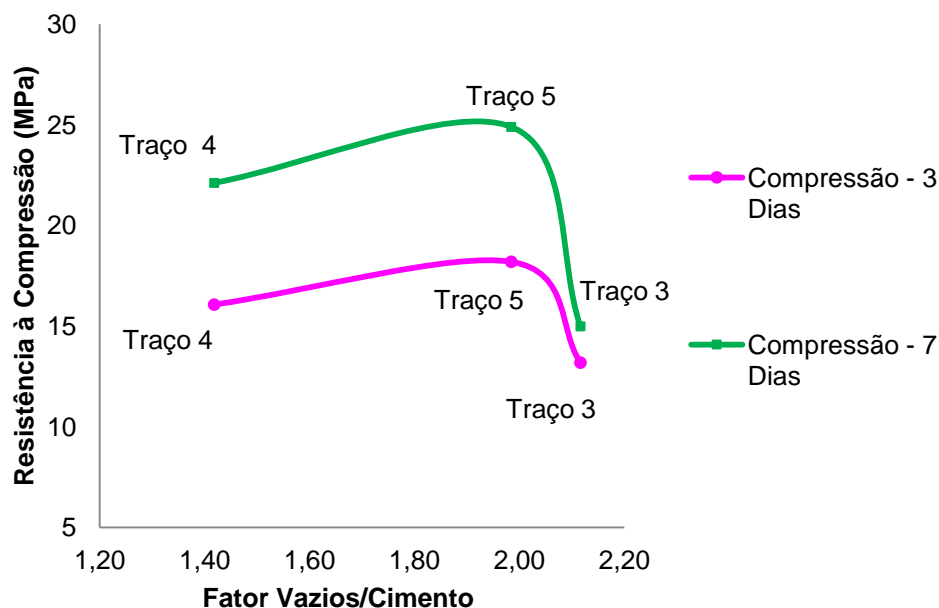


Gráfico 18 - Resistência à compressão em relação ao fator vazios/cimento para os traços 3, 4 e 5
Fonte: Autoria Própria

É possível observar, primeiramente, que o traçado do Gráfico 17 se assemelha a Lei de Abrams. Isto é, com o aumento do fator vazios/cimento, houve uma queda crescente nos valores de resistência.

Em contrapartida, no Gráfico 18, pelo próprio comportamento do fator vazios/cimento, que é sensível à quantidade elevada de cimento bem como a alta porosidade gerada por conta da dificuldade no adensamento, o gráfico apresenta um ganho na resistência. Após esse pico, correspondente a um valor de fator vazios/cimento em torno de 2,0, ele decresce até valores mais baixos que o traço 4.

Por fim, obtiveram-se também os Gráficos 19 e 20 referentes à relação entre a resistência à tração e o fator vazios/cimento. De maneira análoga aos resultados anteriores, o Gráfico 19 corresponde aos resultados relativos aos traços 1,2 e 3 e o Gráfico 20 representa os resultados referentes aos traços 3, 4 e 5.

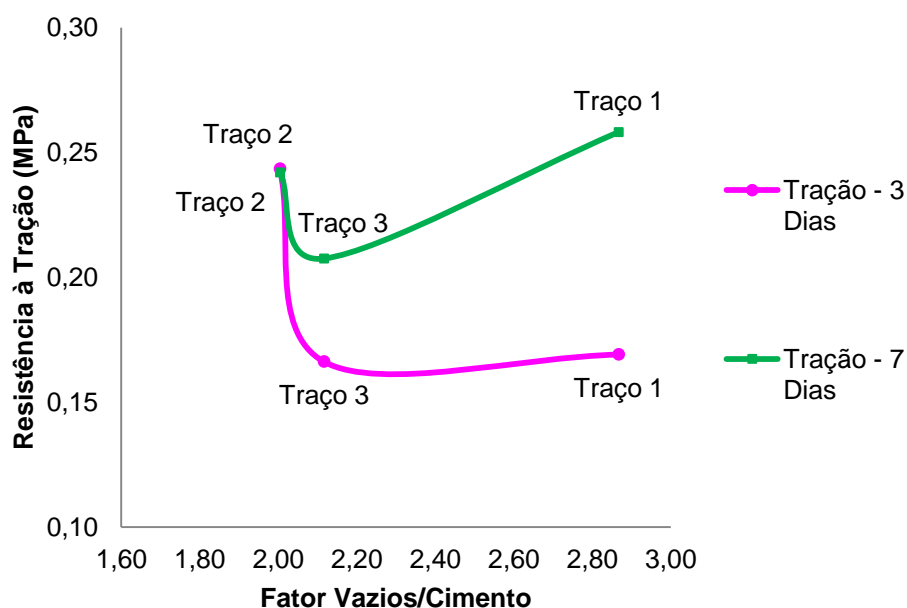


Gráfico 19 - Resistência à tração em relação ao fator vazios/cimento para os traços 1, 2 e 3
 Fonte: Autoria Própria

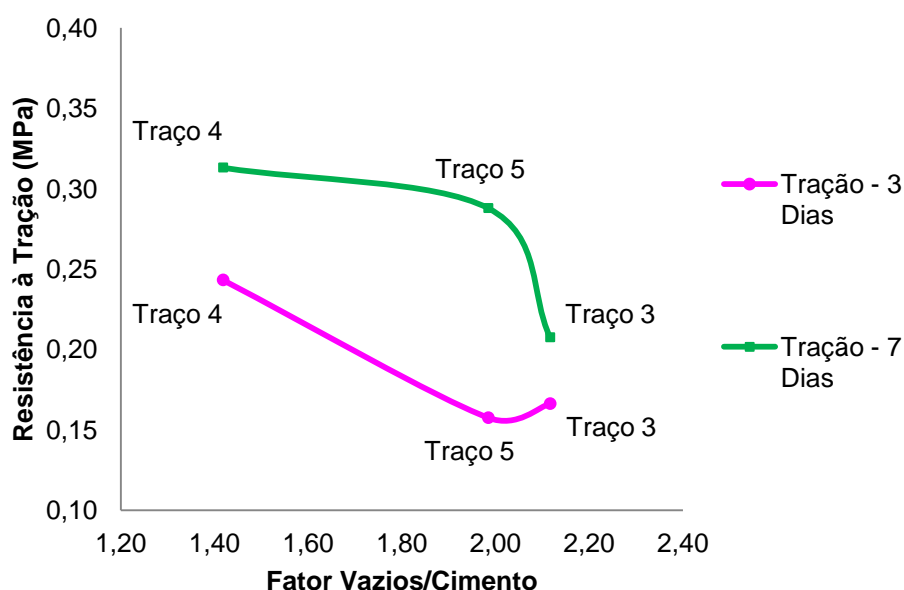


Gráfico 20 - Resistência à tração em relação ao fator vazios/cimento para os traços 3, 4 e 5
 Fonte: Autoria Própria

Constata-se no Gráfico 19 um comportamento atípico no traço 1. Isso ocorre por conta do comportamento do fator vazios/cimento frente aos valores altos de porosidade. Todavia, como se trata da menor relação água/cimento e como não há mobilização do atrito entre as partículas, a resistência do concreto é maior do que os outros traços utilizados na comparação.

Já, no Gráfico 20 percebe-se um comportamento diferenciado no traço 5 aos três dias justificado, novamente, pela relação entre elevados valores de porosidade bem como altos teores de cimento. Porém, é possível observar que, durante a cura, o seu ganho de resistência foi maior do que nos traços 3 e 4 tornando a curva correspondente aos sete dias com um comportamento mais aceitável.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa em questão propôs a consolidação do fator vazios/cimento utilizado como parâmetro de uma dosagem racional para o solocimento. Também foi proposta a comparação desse fator com o fator água/cimento, que é comumente utilizado em dosagens para concretos convencionais.

Para obtenção dos resultados deste trabalho foi utilizada a metodologia proposta por Consoli *et al.* (2010). Sendo assim, foram realizadas poucas alterações com vistas a obter valores e resultados condizentes com o objetivo da pesquisa.

Conclui-se, portanto, que dentro das condições limites referente a este estudo, os resultados obtidos mostram-se satisfatórios, pois os gráficos apresentados a partir do parâmetro vazios/cimento se mostram adequados ao comportamento do concreto estudado. Também é possível observar que as curvas correspondentes à idade de 7 dias ajustaram-se de melhor maneira ao comportamento esperado.

Isto posto, nota-se que os fatores avaliados interferem na resistência do concreto através de comportamentos relacionados entre si. Sendo assim, constata-se que o aumento do teor de cimento em relação aos materiais secos influencia na massa específica e resistência do concreto de maneira diretamente proporcional até certo ponto. Após esse ápice ocorre uma queda que acredita-se ser justificada pela dificuldade no processo de adensamento e pelo teor de finos elevado na mistura.

Esse comportamento também pode ser afirmado com base nos resultados do ensaio de abatimento que, de maneira similar, apresentaram um aumento inicial e, após um valor máximo, correspondente ao traço 3, mostraram uma redução gradual até o traço 5.

Quanto à porosidade, pode-se afirmar que ela também é influenciada tanto pelo teor de cimento em relação aos materiais secos quanto pela quantidade de água presente na mistura e, ainda, interfere de modo inversamente proporcional à resistência, excetuando os comportamentos atípicos ocorridos nos traços 1 e 5, onde os valores de porosidade e resistência foram elevados por conta da proporção de finos na mistura e do adensamento e a resistência se manteve elevada.

Acredita-se que esse comportamento seja causado pela cimentação mais efetiva, em função do maior número de contatos entre partículas. Além disso, em

baixas porosidades, há uma melhor distribuição de tensões e mobilização de atrito no interior do concreto.

Não obstante, observa-se que o fator vazios/cimento também é influenciado pelos parâmetros fator água/cimento, teor de cimento em relação aos materiais secos e a porosidade. Sendo assim, o fator vazios/cimento possui uma representatividade maior, pois abrange as alterações dos parâmetros mencionados anteriormente.

Nesse sentido, a partir dos resultados obtidos através da relação entre o fator vazios/cimento e a resistência do concreto, com algumas ressalvas nos traços 1 e 5, constata-se uma relação inversamente proporcional. Isso mostra que a tendência foi verificada e o parâmetro em questão respondeu de forma adequada ao presente estudo.

Como os gráficos em relação ao fator vazios/cimento, de modo geral, referem-se a pequenos intervalos, o ajuste das curvas com linhas de tendências potenciais, apesar de não caracterizar de maneira muito fiel a curva, possibilitou, de um modo mais grosseiro, estimar a resistência do concreto. Todavia, nota-se a necessidade de maiores intervalos e maiores quantidades de dados para obtenção de curvas e expressões mais precisas.

Quanto às discrepâncias de alguns valores, acredita-se serem justificadas por conta das condições climáticas dos dias em que foram feitos os ensaios, por erros manuais de adensamento, retificação e rompimento e pelas mudanças consideráveis realizadas nas proporções dos materiais em cada mistura.

Assim sendo, sugere-se como continuidade deste estudo trabalhar com maiores variações no fator água/cimento e no teor de cimento em relação aos materiais secos bem como a realização de ensaios que mensurem a porosidade do concreto em diferentes idades para posterior comparação com os dados teóricos obtidos.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5739:2007** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

ABNT. **NBR 6457:1986** – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização

ABNT. **NBR NM 67:1998** - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

ABNT. **NBR 7211:2009** - Agregados para concreto – Especificação.

ABNT. **NBR 7222:1994** - Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos.

ABNT. **NBR 9776:1987** - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco.

ABNT. **NBR 12655:2006** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

BOGGIO, A. J. **ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND**. Porto Alegre, 2000.

BOTELHO, M. H. C. & MARCHETTI, O. **Concreto Armado Eu te Amo**. 3ª ed. Edgard Blücher, 2006.

CONSOLI, N. C. *et al.* **Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129 (1), 96-101. 2003.

CONSOLI, N. C. *et al.* **Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 136 (5), 759-763. 2010.

CREMONINI, R. A. *et al.* **Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO – REIBRAC/IBRACON, 43, Foz do Iguaçu. Anais. p 16. 2001.

DONATO, M. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**. Porto Alegre, 2003.

FOPPA, D. **ANÁLISE DE VARIÁVEIS-CHAVE NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS**. Porto Alegre, 2005.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do Concreto**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1992.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GRIGOLI, A. S. **POROSIDADE DOS CONCRETOS**. São Paulo, 2001.

HELENE, P. R. L. & TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1993.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. IBRACON, 2011.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil**. 1ª ed. IBRACON, 2007.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co. vol.55, n.648, 903-905. 1960.

LEITE, M. B. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. Porto Alegre, 2001.

LISBÔA, E. M. **OBTENÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO E ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS**. Maceió, 2004.

MARCHETTI, O. & BOTELHO, M. H. C. **Concreto Armado Eu te Amo**. 3ª ed. Edgard Blücher, 2006.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. & BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. BOOKMAN, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, M. F. de. **METODOLOGIA CIENTÍFICA: um manual para a realização de pesquisas em administração**. Catalão, 2011.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto: Material Construtivo Mais Consumido no Mundo. São Paulo: Ipsis, 53ª ed. 2009.

POWERS, T. C. **Structure And Physical Properties of Hardined Portland Cement Paste**. J. Am. Ceraun. Soc. Vol , nº 1, p 1-5. 1958.

PRODANOV, C. C. & FREITAS, E. C. de. **METODOLOGIA DO TRABALHO CIENTÍFICO: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET - 67. São Paulo: ABCP. 1990.

ANEXOS

ANEXO A

Boletim de Ensaios de Cimento



Atualizado em: **18/04/2017** Produto: **CPV-ARI-RS Obras Especiais** Norma: **NBR 5733 e NBR 5737**
 Méc e ano de referência: **mar/17** Marca: **Votoran** Unidade: **Rio Branco**

Ensaio	Gulmíolo				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura (%)		Baire	POUR de normal (N)	Tempo Pega		expansão à marcha (mm)	Resist. à Compressão (MPa)			
	PP	MgO	SO3 para C ₃ A+B	It	#200	#325	(cm ³ /g)	const. (%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 6,5	NA	≤ 6,0	NA	≥ 3000	NA	≥ 60	≤ 600	≤ 6,0	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	NA
01/03/2017	3,3	5,5	3,4	10,9	0,0	0,5	4620	30,5	250	320	0,0	22,7	32,6	39,4	50,2
02/03/2017	3,3	5,6	3,4	10,2	0,0	0,6	5140	30,0	240	300	0,0	22,2	34,4	38,8	50,9
03/03/2017	3,3	5,5	3,1	9,9	0,0	0,7	5040	30,2	230	290	0,0	23,2	34,2	39,5	50,0
04/03/2017															
05/03/2017															
06/03/2017	3,2	5,4	3,3	10,6	0,0	0,5	4970	30,0	220	280	0,0	23,4	34,4	41,2	51,8
07/03/2017	3,2	5,5	3,1	10,6	0,0	0,5	4920	30,0	200	260	0,0	22,1	32,8	39,8	49,8
08/03/2017	3,2	5,7	3,2	10,1	0,0	0,5	5020	30,8	220	280	0,0	23,4	34,0	40,9	50,0
09/03/2017	3,2	5,4	3,2	11,1	0,0	0,6	4920	30,6	220	280	0,0	20,9	33,6	39,9	49,4
10/03/2017	3,2	5,6	3,3	11,2	0,0	0,6	4970	30,5	240	310	0,0	22,3	33,0	38,9	49,3
11/03/2017															
12/03/2017															
13/03/2017	3,2	5,5	3,4	10,3	0,0	0,5	5040	30,6	240	300	0,0	23,2	35,4	41,7	51,3
14/03/2017	3,3	5,7	3,2	10,6	0,0	0,5	5040	30,4	225	285	0,0	22,6	34,5	42,7	50,9
15/03/2017	3,1	5,6	3,5	10,0	0,0	0,6	5090	31,2	250	315	0,0	24,3	34,7	40,8	51,1
16/03/2017	3,0	5,6	3,3	11,2	0,0	0,6	5090	30,8	250	310	0,0	22,7	35,4	41,7	49,3
17/03/2017	4,0	5,3	3,3	11,2	0,0	0,6	4920	31,0	250	315	0,0	21,7	32,9	39,7	50,1
18/03/2017															
19/03/2017															
20/03/2017	3,2	5,6	3,1	10,2	0,0	0,4	4970	30,8	220	280	0,0	23,2	34,6	41,0	
21/03/2017	3,3	5,7	3,1	9,4	0,0	0,5	4920	30,4	225	285	0,0	23,7	33,7	40,5	
22/03/2017	3,2	5,6	3,1	12,5	0,0	0,3	5040	30,5	230	290	0,0	21,0	34,1	40,1	
23/03/2017	2,8	5,5	3,1	12,8	0,0	0,4	5120	30,7	220	280	0,0	22,1	34,7	40,6	
24/03/2017	2,9	5,5	3,0	12,8	0,0	0,2	4620	30,6	220	280	0,5	21,9	34,5	41,0	
25/03/2017															
26/03/2017															
27/03/2017	3,0	5,5	3,0	14,0	0,0	0,5	4620	30,8	210	270	0,5	21,3	33,8	42,8	
28/03/2017	3,5	5,4	3,0	14,2	0,0	0,3	4690	30,5	230	290	0,0	22,0	34,0	40,8	
29/03/2017	3,2	5,5	3,0	11,9	0,0	0,5	4970	30,8	220	280	0,0	21,8	32,7	41,3	
30/03/2017	3,3	5,6	3,2	11,7	0,0	0,2	4990	30,9	220	280	0,0	22,1	34,3	39,4	
31/03/2017	3,7	5,7	3,2	11,5	0,2	1,5	5020	30,4	230	290	0,5	22,7	32,7	39,2	
Média	3,2	5,5	3,2	11,3	0,0	0,5	4989	30,5	229	290	0,1	22,5	34,0	40,5	50,3
Desvio Padrão	0,2	0,1	0,1	1,3	0,0	0,3	80	0,3	14	16	0,2	0,9	0,8	1,1	0,8
Mínimo	2,8	5,3	3,0	9,4	0,0	0,2	4620	30,0	200	260	0,0	20,9	32,6	38,8	49,3
Máximo	4,0	5,7	3,5	14,2	0,2	1,5	5140	31,2	250	320	0,5	24,3	35,4	42,8	51,8

Observações:

ME+ 3,02 g/cms

Abílio Estevão Galli Junior
 Nome
 Responsável Controle de Qualidade
 Votorantim Cimentos S/A

Thomas Rheingger
 Nome
 Gerente da Fábrica
 Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894
 Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898
 Site: www.vcimentos.com.br

APÊNDICES

**APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO SIMPLES E À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Idade	Ensaio	P (kgf)	fck (Mpa)	fck,m (Mpa)
3 dias	Tração	4060	0,129	0,169
		5360	0,171	
		5270	0,168	
	Compressão	8420	10,506	9,237
		7350	9,171	
7456		9,303		
7 dias	Tração	7450	0,237	0,258
		6300	0,201	
		8770	0,279	
	Compressão	14440	18,018	14,000
		11550	14,412	
		10890	13,588	

**Tabela 13 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 1
Fonte: Autoria Própria**

Idade	Ensaio	P (kgf)	fck (Mpa)	fck,m (Mpa)
3 dias	Tração	8280	0,264	0,243
		7000	0,223	
		5870	0,187	
	Compressão	12280	15,323	16,071
		13480	16,820	
14710		18,355		
7 dias	Tração	10500	0,334	0,313
		9670	0,308	
		9170	0,292	
	Compressão	17720	22,111	22,117
		19830	24,743	
		17730	22,123	

**Tabela 16 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 4
Fonte: Autoria Própria**

Idade	Ensaio	P (kgf)	fck (Mpa)	fck,m (Mpa)
3 dias	Tração	7990	0,254	0,244
		6080	0,194	
		7310	0,233	
	Compressão	13310	16,608	17,612
		14920	18,617	
17730		22,123		
7 dias	Tração	6450	0,205	0,243
		7780	0,248	
		7460	0,237	
	Compressão	18730	23,371	23,078
		19520	24,357	
		18260	22,784	

**Tabela 14 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 2
Fonte: Autoria Própria**

Idade	Ensaio	P (kgf)	fck (Mpa)	fck,m (Mpa)
3 dias	Tração	6740	0,215	0,158
		5160	0,164	
		4740	0,151	
	Compressão	15010	18,729	18,199
		14160	17,668	
12600		15,722		
7 dias	Tração	8890	0,283	0,288
		9010	0,287	
		9230	0,294	
	Compressão	20140	25,130	24,899
		19770	24,669	
		17130	21,374	

**Tabela 17 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 5
Fonte: Autoria Própria**

Idade	Ensaio	P (kgf)	fck (Mpa)	fck,m (Mpa)
3 dias	Tração	5160	0,164	0,166
		5290	0,168	
		4280	0,136	
	Compressão	10530	13,139	13,189
		10910	13,613	
10270		12,815		
7 dias	Tração	6830	0,217	0,208
		7960	0,253	
		6210	0,198	
	Compressão	10890	13,588	14,992
		16720	20,863	
		13140	16,396	

**Tabela 15 - Resistência à tração e compressão dos corpos de prova referentes ao traço 3
Fonte: Autoria Própria**

APÊNDICE B – TABELAS COMPLEMENTARES

Traço	Amostra	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Área (m²)	Volume (cm³)	Massa Molde (g)	Massa Mistura + Molde (g)	Y mistura (g/cm³)	Média Y mistura (g/cm³)
1	01	20	10	0,00785	1570,80	2850	6280	2,184	2,180
	02	20	10	0,00785	1570,80	2840	6260	2,177	
2	01	20	10	0,00785	1570,80	2880	6640	2,394	2,410
	02	20	10	0,00785	1570,80	2880	6690	2,426	
3	01	20	10	0,00785	1570,80	2940	6740	2,419	2,403
	02	20	10	0,00785	1570,80	2860	6610	2,387	
4	01	20	10	0,00785	1570,80	2680	6800	2,623	2,534
	02	20	10	0,00785	1570,80	2870	6710	2,445	
5	01	20	10	0,00785	1570,80	2650	6310	2,330	2,336
	02	20	10	0,00785	1570,80	2930	6610	2,343	

Tabela 18 – Dados complementares à Tabela 6
Fonte Autoria Própria

Traço	Nº Cápsula	Massa Cápsula (g)	Massa Cápsula + Mistura (g)	Massa Mistura (g)	Massa Cápsula + Seco (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	Y mistura (g/cm³)	Y seco (g/cm³)
1	60	23,958	98,704	74,746	93,896	69,938	6,875%	2,184	2,043
	94	23,671	83,875	60,204	79,927	56,256	7,018%	2,177	2,034
2	31	23,731	98,966	75,235	93,063	69,332	8,514%	2,394	2,206
	44	24,209	127,923	103,714	120,083	95,874	8,177%	2,426	2,242
3	19	22,390	96,786	74,396	90,242	67,852	9,645%	2,419	2,206
	121	22,698	118,486	95,788	110,552	87,854	9,031%	2,387	2,190
4	15	22,703	123,472	100,769	115,872	93,169	8,157%	2,623	2,425
	110	22,554	103,128	80,574	97,093	74,539	8,096%	2,445	2,262
5	33	22,744	119,056	96,312	111,792	89,048	8,157%	2,330	2,154
	20	23,000	110,119	87,119	103,276	80,276	8,524%	2,343	2,159

Tabela 19 - Dados complementares à Tabela 7
Fonte: Autoria Própria