

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GUILHERME CARDOSO HICKEL**

**FERNANDO LUIZ VIERA**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETOS BOMBEÁVEIS**

**FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GUILHERME CARDOSO HICKEL**

**FERNANDO LUIZ VIERA**

## **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETOS BOMBEÁVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Alexandre Lima de Oliveira, Doutor.

**FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Hickel, Guilherme Cardoso  
**Contribuição ao Estudo de Concretos Bombeáveis / Guilherme  
Cardoso Hickel ; orientação de Alexandre Lima de Oliveira.**  
- Florianópolis, SC, 2018.  
80 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico  
de Construção Civil.**  
Inclui Referências.

1. Concreto Bombeável. 2. Bombeabilidade. 3. Reologia.  
4. Ensaio Tecnológicos. I. Oliveira, Alexandre  
Lima de. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento  
Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETOS BOMBEÁVEIS

**GUILHERME CARDOSO HICKEL**

**FERNANDO LUIZ VIERA**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 2 de julho de 2018.

Banca Examinadora:



Alexandre Lima de Oliveira, Doutor



Luciana Maltez Calçada, Doutora



Juliana Machado Casali Peruch, Doutora

Dedico este trabalho a minha família, em especial a meus pais, irmão e afilhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Eu Guilherme, agradeço a meus pais pelo constante apoio e suporte ao longo desses 4,5 anos de faculdade, agradeço também por me propiciarem a oportunidade de me concentrar apenas nos estudos e no meu desenvolvimento ao longo do caminho que escolhi seguir sem ter que me preocupar com outras questões, e agradeço em especial a minha mãe pelo constante incentivo para criar coragem e conseguir trocar a área de estudo que seguia, se hoje sou feliz com o que desenvolvi e aprendi nesta área, devo tudo a ela.

Agradeço às três mulheres de minha vida, Rozilda Raulino, a mulher que me criou juntamente de meus pais, a minha namorada Vera Lúcia Correia pelo apoio incondicional e incentivo ao longo destes anos e a minha sobrinha Isadora.

Agradeço ao meu irmão e grande amigo Fernando e a meus outros familiares como meus avós Pedro e Zoraide, minhas tias Roná, Ronilda, Rosilda, Patrícia, ..., tios Bito, Valério, ..., meus primos e primas pelo entusiasmo demonstrado com meu desenvolvimento ao longo dos anos, demonstrando-se felizes pelas escolhas que fiz, mostrando-me que estou no caminho certo.

Agradeço aos velhos amigos, em especial ao Luiz, Jamil, Juliano e Pesca pelos bons momentos de descontração e compreensão por alguns momentos de minha ausência e aos novos amigos que o Instituto Federal de Santa Catarina e o curso de Engenharia me proporcionaram, Tiagão, Batata, Góes, Ramon e Isabel, com vocês a faculdade se tornou menos difícil.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina pela oportunidade de estudo e a todos funcionários da instituição que propiciaram meu aprendizado e desenvolvimento, professores, técnicos e colegas, em especial agradeço aos técnicos Carlos do DAMM e Douglas do DAE, pelo auxílio no desenvolvimento de determinados pontos cruciais no presente trabalho.

Agradeço também ao Engenheiro Paulo Ricardo de Matos e ao Professor Doutor Luiz Roberto Prudêncio Júnior da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de desenvolvimento deste presente estudo e seus consequentes aprendizados e descobrimentos gerados.

Agradeço ao Departamento Acadêmico da Construção Civil pelo investimento realizado na Engenharia Civil, ao ex-chefe de Departamento Carlos Hermann, a ex-coordenadora de curso Luciana Maltez Calçada que viabilizaram a implementação do curso, e aos seus excelentes técnicos e professores, em especial ao pessoal do Laboratório de Solos e Tecnologia dos Materiais, agradeço às Professoras Andrea Betioli e Juliana Casali pelos ensinamentos, e aos colegas de laboratório que possibilitaram este trabalho e muitos outros, Thiago Corrêa e Augusto Lopes, dois grandes amigos.

E por último, mas não menos importantes gostaria de agradecer especialmente aos dois grandes mestres que tive ao longo desses anos de IFSC e a quem pretendo acompanhar e ainda aprender outros ensinamentos, Rafael Andrade de Souza e ao Professor Doutor Alexandre Lima de Oliveira, além de mentes brilhantes, vocês são exímios exemplares de ética, capacidade, humanidade e humildade, exemplos de homens a serem seguidos, exemplos do que quero seguir em minha vida pessoal e profissional, se conseguir ser 1/3 do que são, já serei um excelente homem e um ótimo profissional.

E eu Fernando Luiz Vieira agradeço a meus pais que me apoiaram por todos esses anos, proporcionando todo o necessário para que essa fase da minha vida fosse aproveitada da melhor maneira possível. Coisas simples como me buscar na faculdade, esperar acordado e fazer janta em noites geladas de inverno.

Agradeço ao meu irmão por sempre está ao meu lado e por ser meu amigo sempre. E agradeço a minha cunhada por me proporcionar ser tio do Caio. Agradeço também aos meus padrinhos por me apoiarem durante toda essa caminhada e aos meus familiares que me deram tantas alegrias e momentos maravilhosos.

Agradeço aos meus amigos do Campeche, que cresceram comigo, são muitos para dizer os nomes, mas todos eles me foram muito importantes durante toda a minha vida, por tantas risada e momentos inesquecíveis.

Agradeço ao Professor Doutor Luiz Roberto Prudêncio Jr. e ao Engenheiro Paulo Ricardo de Matos, ambos da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio, ajuda e ensinamentos sobre o estudo do presente trabalho.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina por me proporcionar fazer os cursos de técnico de edificações e engenharia civil, ambos com grandes professores ministrando as aulas e com uma excelente estrutura de ensino. Agradeço a todos os professores e técnicos que tive o prazer de conviver durante os 6 anos que passei nesta instituição.

Agradeço a Luciana Maltez Calçada pela implementação e coordenação do curso, um curso de engenharia civil exemplar, que será um dos melhores. Agradeço a Andrea Murilo Betioli por me dar a oportunidade de ser bolsista, por ter me ensinado tanto e por ser uma excelente professora. Agradeço ao Rafael Andrade de Souza por todos os ensinamentos e ajudas, sem ele não seria possível a execução desse trabalho.

Agradeço ao orientador Professor Doutor Alexandre Lima de Oliveira por ser um exemplo de pessoa, aluno, professor e orientador. Me mostrou que é possível ser um excelente professor, marido, pai de dois filhos e ainda conseguir surfar. Agradeço por todos os ensinamentos que irão me tornar um profissional excelente.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo”.

(Walter S. Landor)

## RESUMO

Diante da constante verticalização dos grandes centros urbanos e a conseqüente aglomeração urbana, cada vez mais são corriqueiramente encontrados edifícios de elevada altura nos *skyline* das cidades, ou de relativa complexibilidade de execução, ou seja, novos desafios para a engenharia. Para enfrentar estes desafios, novas soluções são necessárias para viabilizar tais construções, e, no caso da utilização de concreto para a execução destas obras, o bombeamento do material surge como uma ferramenta viável para garantir tal feito. Assim, seu bom funcionamento é de extrema importância para garantir a segurança física e econômica de execução destes empreendimentos e das edificações do entorno. Entretanto, verificar a bombeabilidade do concreto é uma tarefa difícil, sendo necessário o conhecimento de aspectos técnicos, das condições de entorno, o sistema que será bombeado, a bomba a ser utilizada, e as características do material como seu comportamento reológico e a interação do concreto com o sistema de bombeamento. Todavia tais determinações atualmente são feitas apenas de maneira empírica, não havendo estudo desenvolvido visando resolver problemas práticos. Portanto o presente trabalho tem por objetivo contribuir com o estudo de concretos bombeáveis, por meio do acompanhamento *in loco*, durante a execução destas obras, com o estudo do material para medições e criação de perspectivas de parâmetros de bombeamento e mediante estudos em laboratório, produzindo misturas com diferentes soluções técnicas que influam nas propriedades reológicas potencializadoras ou não do bombeamento do material. Tendo conseguido prever tendências de comportamento para parâmetros de bombeamento em relação à tensão de escoamento do material, bem como determinadas estratégias para alterar as composições dos concretos utilizados no sistema de bombeamento a partir do emprego de diferentes teores de aditivos, consumo de água ou troca de agregados visando a alteração das propriedades reológicas das misturas.

Palavras-chave: Concreto Bombeável, Bombeabilidade, Reologia, Ensaio Tecnológicos.

## **ABSTRACT**

Faced with the constant verticalization of large urban centers and the consequent urban agglomeration, more and more high-rise buildings are found on the skyline of cities, or relatively complex buildings in terms of execution, therefore, new challenges for engineering. In order to face these challenges, new solutions are necessary to make these constructions feasible, and in the case of the use of concrete for the execution of these works, the pumping of the material appears as a viable tool to guarantee such accomplishment. Thus, its proper functioning is extremely important to ensure the physical and economic security of execution of these projects and for the security of the surrounding buildings. However, to verify the pumpability of the concrete is a difficult task, being necessary the knowledge of technical aspects, of the environmental conditions, of the system applied to be pumped, the pump to be used, and the characteristics of the material as its rheological behavior and the interaction of the concrete with the pumping system. Meanwhile, these determinations are currently done empirically, and there is no study developed to solve practical problems. Thereby, the present work aims to contribute in the study of pumpable concretes by means of on-site monitoring, during the execution of these constructions, through the use of the material for its study to create perspectives of pumping parameters for those concretes, and over laboratory studies, producing mixtures with different technical solutions that influence the rheological properties of the pumped material or not. Having been able to predict behavioral trends for pumping parameters in relation to the material yield stress, as well as certain strategies to change the compositions of the concrete used in the pumping system from the use of different levels of admixtures, water consumption or exchange the aggregates used to alter the rheological properties of the mixtures.

Keywords: Pumpable Concrete, Pumpability, Rheology, Technological Essays.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tabela de Determinação de Parâmetros de Bombeamento....	19
Figura 2 – Funcionamento Bomba de Pistão .....	22
Figura 3 – Funcionamento Bomba Rotativa .....	22
Figura 4 – Sistema de Pistão – a) Tremonha e b) Pistões .....	23
Figura 5 – Bomba Lança .....	23
Figura 6 – Auto Bomba.....	24
Figura 7 – Conduto Forçado Transportando Concreto .....	25
Figura 8 – Lançamento de Concreto Bombeável em Bloco de Coroamento .....	27
Figura 9 – Abatimento de Cone d'Abrams.....	29
Figura 10 – Esquema Ensaio Reômetro de Placas Paralelas .....	30
Figura 11 – a) Reômetro Contec Viscometer 5 e b) Tattersall MK-II .....	30
Figura 12 – Reômetro Pheso .....	31
Figura 13 – Aparato de ensaio para Escoamento de Cone Invertido .....	33
Figura 14 – Laboratório Móvel Instalado .....	34
Figura 15 – Edificação de Elevada Altura na Cidade de Balneário Camboriú .....	35
Figura 16 – Bloco de Fundação na Cidade de Balneário Camboriú.....	36
Figura 17 – Curvas Resultantes do Ensaio de Reometria Rotacional .....	39
Figura 18 – Geometria das Hastes.....	39
Figura 19 – Medição de Torque no Eixo.....	40
Figura 20 – Perfil de Velocidade Haste .....	41
Figura 21 – Exemplificação Área de Contato Haste .....	42
Figura 22 – Primeira Campanha Experimental – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento .....	47

Figura 23 – Primeira Campanha Experimental – Viscosidade x Pressão de Bombeamento .....	47
Figura 24 – Segunda Campanha Experimental – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento .....	50
Figura 25 – Segunda Campanha Experimental – Viscosidade x Pressão de Bombeamento .....	51
Figura 26 – Influência de Aditivo Super Plastificante e Água na Tensão de Escoamento .....	52
Figura 27 – Influência de Aditivo Super Plastificante e Água na Viscosidade .....	52
Figura 28 – Tempo de Escoamento em Tronco de Cone Invertido e Tensão de Escoamento .....	54
Figura 29 – Tempo de Escoamento em Tronco de Cone Invertido e Viscosidade .....	54
Figura 30 – Influência da Forma do Grão na Tensão de Escoamento do Concreto.....	55
Figura 31 – Influência da Forma do Grão na Viscosidade.....	56
Figura 32 – Influência da Forma na Tensão de Escoamento – Abatimento 8cm .....	57
Figura 33 – Influência da Forma na Tensão de Escoamento – Abatimento 12cm .....	57
Figura 34 – Influência da Forma na Tensão de Escoamento – Abatimento 16cm .....	58
Figura 35 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 8cm.....	58
Figura 36 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 12cm.....	59
Figura 37 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 16cm.....	59
Figura 38 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento – Todos Ensaios .....	60

Figura 39 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento – Categorias Isoladas.....	61
Figura 40 – Índice de Abatimento x Viscosidade - Todos Ensaios.....	62
Figura 41 – Índice de Abatimento x Viscosidade – Categorias Isoladas ..	63
Figura 42 – Escoamento de Cone Invertido x Tensão de Escoamento – Todos Ensaios.....	65
Figura 43 – Escoamento de Cone Invertido x Viscosidade – Todo Ensaio.....	66
Figura 44 – Concretos Autoadensáveis – Escoamento em Funil-V x Tensão de Escoamento .....	67
Figura 45 – Concretos Autoadensáveis – Escoamento em Funil-V x Viscosidade .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Primeira Campanha Experimental – Resultados Ensaio Tecnológicos	.45
Tabela 2 – Primeira Campanha – Parâmetros de Bombeamento e Propriedades Reológicas.....	46
Tabela 3 – Segunda Campanha Experimental – Resultados Ensaio Tecnológicos	48
Tabela 4 – Segunda Campanha – Parâmetros de Bombeamento e Propriedades Reológicas.....	49
Tabela 5 – Influência de Super Plastificantes nas Propriedades Reológicas dos Concretos.....	51
Tabela 6 – Escoamento de Tronco de Cone Invertido e Propriedades Reológicas ..	53
Tabela 7 – Influência de Origens Mineralógicas e de Diferentes Britadores nas Propriedades Reológicas dos Concretos .....	55
Tabela 8 – Concretos com Aditivo Super Plastificante – Viscosidade e Teor de Aditivo Utilizado .....	64
Tabela 9 – Concretos Autoadensáveis – Resultado Funil-V e Propriedades Reológicas .....	67

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
2	OBJETIVOS .....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
3.1	TRANSPORTE VERTICAL.....	21
3.1.1	Sistema de Bombeamento .....	21
3.1.1.1	Bombas .....	21
3.1.1.2	Tubulação.....	24
3.1.1.3	Conexões .....	25
3.2	CONCRETO .....	25
3.2.1	Definição .....	25
3.2.2	Bombeabilidade.....	26
3.3	REOLOGIA.....	27
3.3.1	Ensaio reológicos existentes .....	28
3.3.1.1	Reometria de placas paralelas .....	29
3.3.1.2	Reometria rotacional .....	30
3.3.1.2.1	Reômetro Pheso.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
4.1	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZADOS .....	33
4.2	MÉTODO DE ENSAIOS EM CAMPO .....	34
4.2.1	Primeira Campanha Experimental.....	35
4.2.2	Segunda Campanha Experimental.....	36

4.3	MÉTODO DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO .....	37
4.4	CONVERSÃO DE DADOS REÔMETRO PHESO .....	38
4.4.1	Conversão torque medido em tensão de cisalhamento.....	40
4.4.2	Conversão rotação por minuto em taxa de cisalhamento.....	43
4.4.3	Aplicação do modelo de Bingham .....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1	ENSAIOS EM CAMPO .....	45
5.1.1	Primeira Campanha Experimental.....	45
5.1.2	Segunda Campanha Experimental.....	48
5.2	ENSAIOS EM LABORATÓRIO.....	51
5.2.1	Influência da Água e de Aditivo Super Plastificante.....	51
5.2.2	Influência da Forma dos Grãos .....	54
5.3	PARÂMETROS REOLÓGICOS X ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	59
5.3.1	Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone .....	60
5.3.2	Ensaio de Escoamento de Tronco de Cone .....	64
5.3.3	Ensaio de Escoamento em Funil-V .....	66
6	CONCLUSÃO.....	69
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A – PROPORCIONAMENTO REALIZADO.....	76
	APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS.....	77

# 1 INTRODUÇÃO

Em virtude do desenvolvimento dos centros urbanos e da crescente necessidade de otimização de recursos materiais, técnicos e financeiros, as cidades estão sendo verticalizadas. Com isto, novas técnicas, sistemas e materiais são empregados para garantir uma melhor solução dos desafios encontrados.

A verticalização gerou a necessidade de transporte do concreto em tempo hábil para sua aplicação. Em função dessa necessidade, foram criadas as bombas, próprias ao bombeamento de concreto (DAIBERT, 2014).

Estas bombas são utilizadas para o transporte de diferentes proporções de concretos a grandes distâncias horizontais e verticais ao redor do mundo (RIDING, 2016), onde a utilização de concretos convencionais acaba por não suprir a necessidade do mercado, sendo essencial o emprego de concretos especiais (MEHTA, 2014).

O concreto bombeado é possuidor de uma grande diversidade de uso nas mais variadas construções em concreto, como na execução de túneis, blocos de coroamento de estacas para edifícios, usinas hidrelétricas, edifícios comerciais e residências, de pequeno, médio e grande porte, sendo este o concreto indicado principalmente em casos de difícil acesso de equipamentos, espaço limitado ou a complexibilidade do transporte vertical (*American Concrete Institute*, 1996).

Assim, para contribuir com o entendimento e o desenvolvimento do tema, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento, em estado fresco, do concreto bombeado empregado em diferentes solicitações, como o concreto bombeado em blocos de coroamento de estacas e o concreto bombeado a elevada altura de prédios altos.

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Ferraris *et al.* (2001) tratam que o bombeamento é uma das técnicas mais utilizadas mundialmente para o transporte do concreto fresco. Neste sentido, autores como Kaplan (2001), Secrieru *et al.* (2017), De Schutter *et al.* (2016), dentre outros, levantam a necessidade do desenvolvimento de pesquisas tecnológicas que correlacionem as propriedades do material e do sistema de bombeamento com os

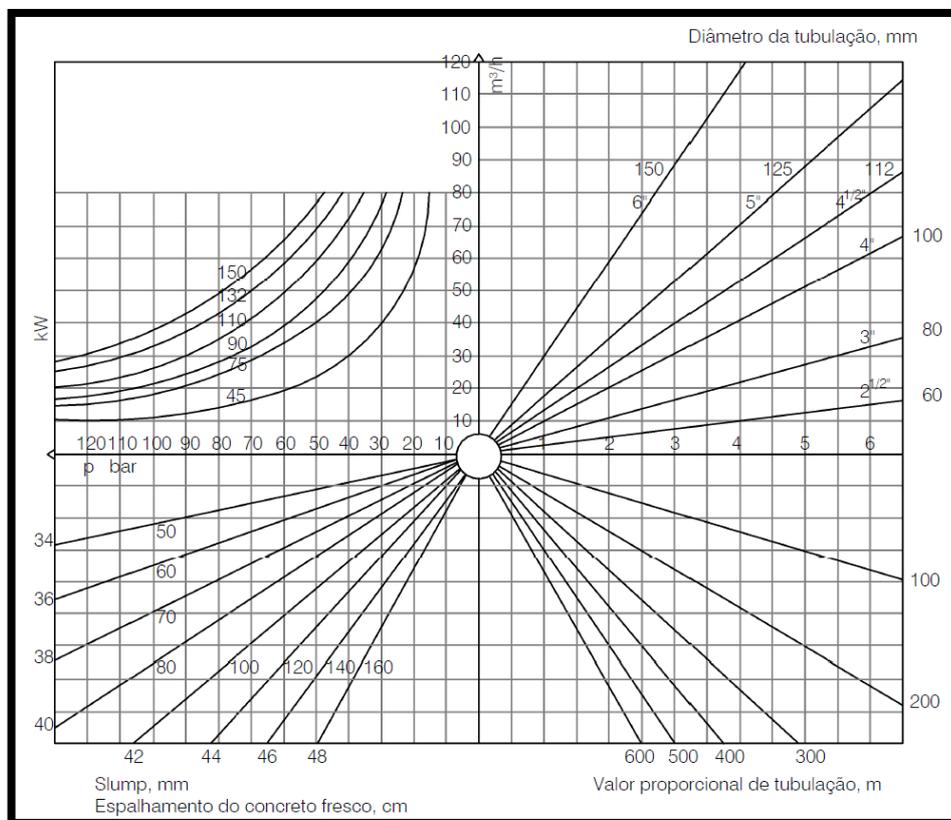
parâmetros de pressão necessários ao bombeamento do material, evitando assim a empiricidade do processo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Secieru *et al.* (2017) cita que, atualmente, ainda em 2017, a definição da bombeabilidade de um concreto através da execução de ensaios de laboratório não foi definida, apresentando apenas fatores que influem na mesma como a geometria do sistema no qual o concreto será bombeado e as características destes concretos.

Assim, De Schutter *et al.* (2016) menciona a necessidade de um aprofundamento no estudo da bombeabilidade dos concretos uma vez que, com o desenvolvimento do material e o surgimento de novos concretos, como os *High Performance Concrete* (HPCs) e *Ultra High Performance Concrete* (UHPCs) – concretos produzidos com a utilização de agentes modificadores (aditivos) – tabelas de determinação de pressões de bombeamento (Figura 1), outrora utilizadas em função unicamente do abatimento de cone d’Abrams, acabam por se tornar obsoletas.

Figura 1 – Tabela de Determinação de Parâmetros de Bombeamento



Fonte: Schwing (acessado em 2017)

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar o comportamento do concreto bombeado empregado na construção de edifício.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Analisar os concretos utilizados em obra, determinando parâmetros reológicos, abatimento e massa específica e a existência de alguma correlação entre estes parâmetros;
- Determinar o comportamento do concreto bombeado em obra, verificando o desempenho da bomba e a pressão do manômetro;
- Correlacionar as propriedades do concreto e a pressão de trabalho das bombas;
- Estudar, em laboratório, misturas com diferentes viscosidades produzidas através da alteração de parâmetros, sendo estes o emprego de aditivos super plastificantes, a alteração do consumo de água e a influência da forma dos grãos na viscosidade do material.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 TRANSPORTE VERTICAL**

Neville (2013), traz que existem várias maneiras de realizar o transporte de concreto, desde carrinhos de mão, jericas, e esteiras transportadoras. Porém, o referido autor, indica que o sistema mais especializado para o transporte de concreto é o sistema de bombeamento; descrito a seguir (item 3.1.1).

#### **3.1.1 Sistema de Bombeamento**

Kaplan (2001) descreve que o bombeamento é uma técnica de transporte vertical aplicável ao transporte de concreto fresco ao redor de todo o mundo a mais de 70 anos, sendo utilizada nos Estados Unidos desde 1933.

Ainda segundo Kaplan (2001), o sistema de bombeamento de concreto se dá através da utilização de uma bomba que submete o material ao transporte em um conduto forçado.

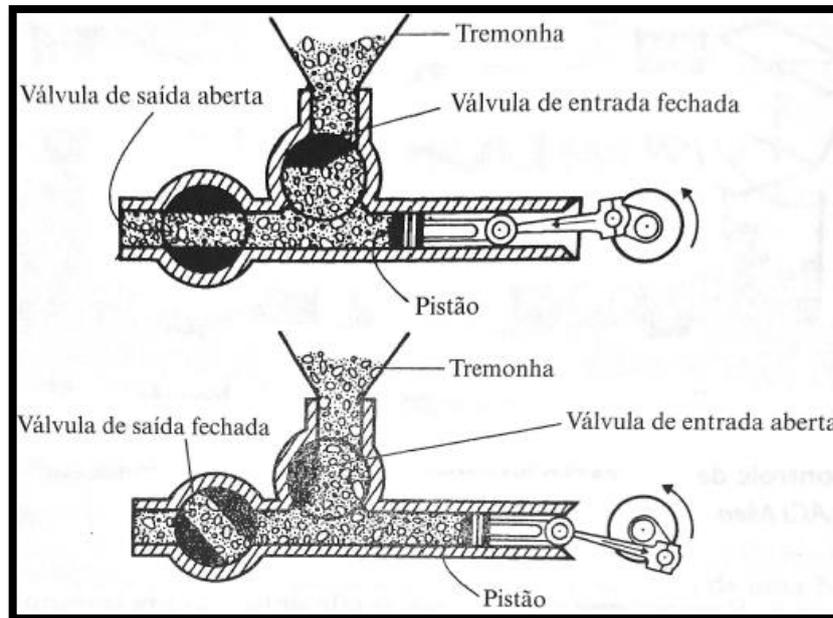
Nos itens 3.1.1.1, 3.1.1.2 e 3.1.1.3 a seguir serão descritos os materiais constituintes do sistema de bombeamento tipicamente utilizado no transporte de concreto: bombas, tubulação e conexões.

##### **3.1.1.1 Bombas**

Baptista *et al.* (2010) definem bombas como sendo máquinas hidráulicas transformadoras de energia mecânica em trabalho, possibilitando o transporte de fluidos a elevadas alturas e a grandes distâncias, sendo parte integrante e obrigatória em qualquer sistema de bombeamento.

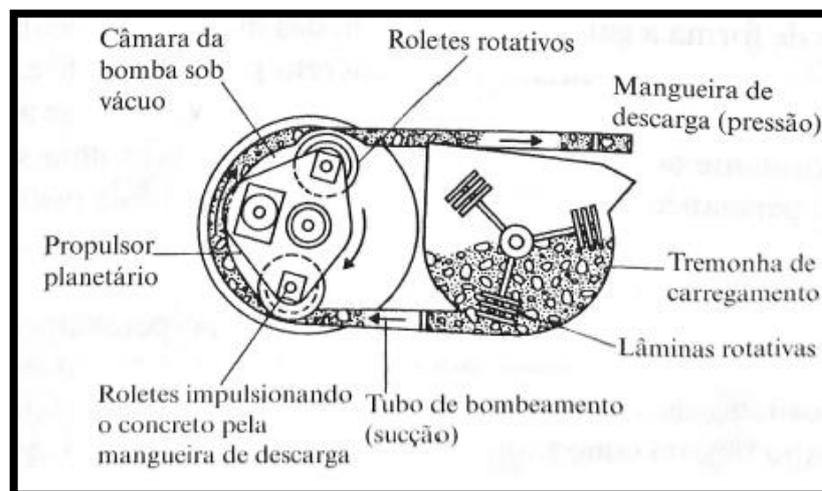
Kaplan (2001) traz que os principais tipos de bombas utilizados na construção civil são as bombas à pistão e rotativas, com seu funcionamento exemplificado na Figura 2 e na Figura 3. Entretanto, no presente trabalho será abordado apenas dos modelos de bomba a pistão, por conta da capacidade de bombeamento e por serem o principal tipo de bomba utilizada no bombeamento de concreto.

Figura 2 – Funcionamento Bomba de Pistão



Fonte: Neville (2013)

Figura 3 – Funcionamento Bomba Rotativa



Fonte: Neville (2013)

No sistema à pistão a alimentação do concreto na tremonha ocorre majoritariamente por gravidade e em parte por sucção realizada pelo pistão da bomba em movimento, enquanto as válvulas, observados na Figura 4a, alternam entre si sua abertura e fechamento. Com isso, o concreto preenche os cilindros (Figura 4b) de maneira ininterrupta sendo bombeado a cada pulso de bombeamento, abertura e fechamento das válvulas, fazendo com que o material circule pelo sistema de bombeamento (NEVILLE, 2013).

Figura 4 – Sistema de Pistão – a) Tremonha e b) Pistões



Fonte: Autores

A configuração de bomba à pistão é encontrada nas bombas-lança (Figura 5) e auto bombas (Figura 6) costumeiramente utilizadas para a execução do bombeamento de concreto:

Figura 5 – Bomba Lança



Fonte: Autores

Figura 6 – Auto Bomba



Fonte: Daniel da Silva (2017)

### 3.1.1.2 Tubulação

Tubulação é o conjunto de tubos e seus diversos acessórios, como flanges, juntas, suportes, válvulas e conexões (NBR 5578, 2015). Segundo a NBR 5578 (2015) tubo é um produto siderúrgico de seção transversal redonda, quadrada, retangular, triangular e outras, oca por todo o comprimento, podendo ser fabricado com ou sem solda.

O transporte de fluídos é feito mediante o escoamento dos mesmos pelas tubulações, podendo estas funcionar através de dois princípios diferentes: condutos livres ou forçados. (BAPTISTA, 2010)

Baptista *et al.* (2010) caracteriza o escoamento em condutos livres tratando da atuação da pressão atmosférica com a superfície do fluído em escoamento e o deslocamento da massa se dá no sentido decrescente das cotas topográficas.

Já, segundo Azevedo Netto (2007), os condutos forçados são aqueles onde o fluído preenche completamente a seção em que está inserido, escoando uniformemente com uma pressão interna não coincidente com a atmosférica, sendo esta a categoria responsável pelo transporte de concreto (Figura 7).

Figura 7 – Conduto Forçado Transportando Concreto



Fonte: Autores

### 3.1.1.3 Conexões

As conexões, curvas e luvas são acessórios de tubulação, que são definidos pela NBR 5578 (2015) como qualquer peça aplicada à tubulação com finalidade de unir, fixar ou vedar.

A NBR 5578 (2015) traz em seu escopo as definições para cada uma dessas terminologias, sendo as conexões hidráulicas definidas como “acessórios destinados a interligar tubos entre si ou com outros acessórios”, as curvas destinadas à “ligação de tubos com mudança de direção”, e as luvas sendo as ligações entre tubos sem alteração da direção.

## 3.2 CONCRETO

### 3.2.1 Definição

Metha e Monteiro (2014) definem o concreto como sendo um material compósito resultante de uma mistura de um meio aglomerante onde estão imersos agregados. Seus componentes são a água, o cimento, os agregados graúdos e miúdos, e, no caso de concretos especiais, aditivos e adições. O proporcionamento destes constituintes definem suas propriedades tanto em estado fresco quanto endurecido.

Já Browne e Bamforth (1977) definem o material como uma suspensão enquanto saturado, capaz de por si só formar uma camada de pasta facilitando o bombeamento, e como solo ao estar insaturado, inexistindo tal camada. Trazem

também que o bombeamento de concreto saturado se mostra muito mais vantajoso por necessitar de menores solicitações ao serem comparadas ao bombeamento de concretos insaturados.

A constatação realizada por Browne e Bamforth (1977) tem colaboração de Chapdelaine (2007) que desenvolve o conceito de volume real de pasta, ou seja, para cada diâmetro de mangote, há uma quantidade de pasta de lubrificação necessária à formação de uma camada de lubrificação que possibilita o bombeamento do material saturado.

### **3.2.2 Bombeabilidade**

Bauer (2008) define que para um concreto ser bombeável deve possuir índice de abatimento de cone de Abrams situado entre 60mm e 160mm, enunciando também os seguintes fatores que influenciam a bombeabilidade do concreto: tipo e granulometria dos agregados, quantidade de cimento e trabalhabilidade do mesmo.

No entanto, Jolin *et al.* (2009) dizem que a bombeabilidade não é um conceito simples de ser definido, e trazem que o concreto, para tal, necessita estar estável e possuir a capacidade de mobilizar-se enquanto mantém-se sob pressão.

Kaplan (2001) define que “um concreto é bombeável se ele puder ser lançado com uma bomba”. Apesar de simplista, a definição de Kaplan demonstra que o concreto não depende apenas de suas características, mas também do sistema ao qual o mesmo será submetido, sendo necessário o estudo das propriedades do concreto que possam trabalhar em conjunto com o sistema em questão.

Os seguintes fatores, exemplificados por Feys *et al.* (2016), representam um risco para a bombeabilidade do concreto:

- a) Formação da camada de lubrificação em concretos de alta performance, onde há a formação de uma fina camada de pasta por onde o concreto desliza por meio de fluxo de pistão;
- b) Cotovelos e redutores ao longo do sistema de bombeamento;
- c) Variação nas propriedades do concreto ao longo do bombeamento.

### 3.3 REOLOGIA

O Comitê de Fundações Profundas, DFI (2016), caracteriza o conceito de reologia como o estudo da deformação e do fluxo de uma substância sob efeito de um cisalhamento. A reologia do concreto é estudada para a determinação de seu comportamento durante solicitações em estado fresco, como, por exemplo, seu lançamento (Figura 8)

Figura 8 – Lançamento de Concreto Bombeável em Bloco de Coroamento



Fonte: Autores

Ferraris *et al.* (2001) cita que uma série de fatores podem afetar a reologia de um concreto, fatores estes como sua composição, a influência da forma, do tipo de agregado, da quantidade de água, do tipo de misturador, da sequência de mistura, do tempo de mistura e da temperatura.

Diante da importância dessa área de estudo, Ferraris *et al.* (2001) realizaram levantamento do desenvolvimento alcançado no estudo da reologia do material ocorrido ao redor do mundo e definem que o concreto, em seu estado fresco e submetido a um determinado fluxo, enquanto mantém-se homogêneo, pode ser considerado como fluído.

Ainda de acordo com Ferraris *et al.* (2001), e observado por demais autores como Kaplan (2001) e Feys *et al.* (2007), o comportamento do concreto homogêneo considerado fluido se assemelha ao comportamento de um fluido binghamiano, com seu fluxo sendo determinado por dois parâmetros, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica.

Entretanto Castro *et al.* (2011) consideram que o tratamento através da aplicação do modelo de Bingham, proposto e desenvolvido internacionalmente, é inaceitável por considerarem que o material é heterogêneo e que apresenta descontinuidades mecânicas internas extremas. Assim, o autor, desenvolve suas análises a partir de variáveis dependentes do instrumento de medida resultando em curvas de cisalhamento em função do torque e da velocidade de rotação, obtendo-se o torque de escoamento e a viscosidade de torque, todas as unidades sendo dependentes da geometria de ensaio executado.

Apesar do contraponto, a metodologia de análise realizada por Kaplan (2001), Ferraris *et al.* (2001), Feys *et al.* (2007), Jolin *et al.* (2009), De Shutter *et al.* (2016), Secrieru *et al.* (2017), dentre outros será a adotada no presente trabalho, pois segundo Chalimo (1989), um concreto para ser bombeável, precisa ser homogêneo. Assim, o modelo de análise a ser utilizado será o modelo de Bingham, respeitando a seguinte equação 1:

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \gamma \quad (1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$  = tensão de escoamento (Pa)

$\mu$  = viscosidade plástica (Pa.s)

$\gamma$  = taxa de cisalhamento (1/s).

### **3.3.1 Ensaios reológicos existentes**

Inúmeros ensaios são utilizados ao redor do mundo para prever o comportamento do concreto nas mais variadas situações (FERRARIS, 2001), entretanto, em sua maioria, são utilizados apenas ensaios tecnológicos prevendo uma parcela do real comportamento do material.

Hu (1995) cita que testes tecnológicos, como por exemplo o abatimento de cone d'Abrams (Figura 9) usualmente utilizados para caracterização do material em estado fresco, geralmente mede apenas uma grandeza, podendo desta forma traduzir apenas uma parcela do real comportamento reológico do material.

Figura 9 – Abatimento de Cone d'Abrams



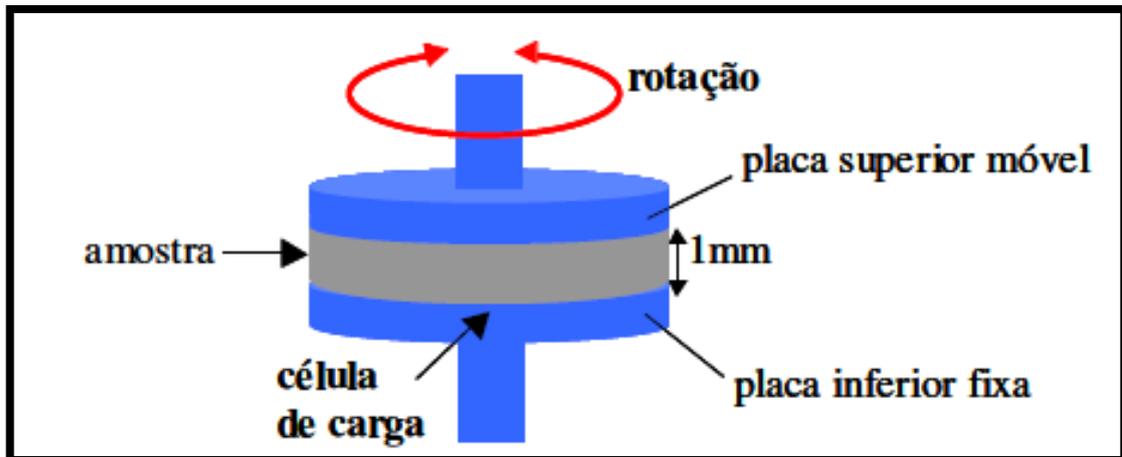
Fonte: Autores

A partir das constatações, são necessários aparelhos que possam determinar as propriedades reológicas, comumente conhecidos como reômetros. Os reômetros são divididos em dois grupos: os reômetros de placa paralelas e reômetros rotacionais (HU, 1995).

### 3.3.1.1 Reometria de placas paralelas

Betioli (2007), conceitua o funcionamento desse tipo de reometria da seguinte maneira: uma amostra de material é confinada entre duas placas paralelas, onde a placa superior móvel exerce, uma rotação controlada na parte superior do material enquanto a placa inferior, contendo uma célula de carga, permanece fixa registrando a tensão normal ao longo do ensaio, conforme Figura 10.

Figura 10 – Esquema Ensaio Reômetro de Placas Paralelas



Fonte: Andrea Murillo Betioli (2007)

### 3.3.1.2 Reometria rotacional

Uma série de velocidades pré-determinadas são impostas em um instrumento de leitura, seja ele uma haste, pás ou cilindros, e o torque resultante necessário à execução de tal velocidade de rotação é registrado (FEYS, 2007). Inúmeros instrumentos de leitura seguem tal princípio de funcionamento e baseiam-se na reometria rotacional para determinação das propriedades dos materiais ensaiados, como os reômetros da Figura 11a e Figura 11b.

Figura 11 – a) Reômetro Contec Viscometer 5 e b) Tattersall MK-II



Fonte: Dimitri Feys (2007)

Diante da gama de diferentes reômetros existentes encontra-se o reômetro Pheso, equipamento a ser utilizado no presente trabalho, com seu funcionamento e especificidades descritas no tópico 3.3.1.2.1 a seguir.

#### 3.3.1.2.1 Reômetro Pheso

Pileggi *et al.* (2001), Schankoski *et al.* (2017), França *et al.* (2015), Sakano *et al.* (2015), utilizam-se do reômetro Pheso (Figura 12) e da reometria rotacional para caracterizar concreto e argamassa, obtendo o torque de início de escoamento e a viscosidade de torque, conforme exemplificado por Castro *et al.* (2011), para uma dada geometria de ensaios.

Figura 12 – Reômetro Pheso



Fonte: Autores

Schankoski *et al.* (2017) exemplificam o processo de funcionamento do reômetro Pheso da seguinte maneira: “O equipamento varia controladamente a

rotação, em rpm, transferindo-a, por meio de uma raquete dentada, para a mistura ser analisada.”

Sakano (2016), traz que a aquisição de dados do reômetro Pheso, o controle de velocidade, o posicionamento e o torque se dão por meio de um servoconversor que converte o sinal obtido na execução do ensaio em informações que permitem analisar o comportamento reológico dos materiais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em duas etapas, sendo uma destas etapas realizada através de trabalho em campo e outra em laboratório. Na etapa em campo foram visitadas duas obras, onde os concretos foram caracterizados empregando-se alguns ensaios que serão descritos posteriormente. Já em laboratório foram estudados a influência da composição dos concretos sobre as propriedades que influenciam o bombeamento das misturas.

### 4.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZADOS

A fim de caracterizar o material disponibilizado pelas concreteiras, e os concretos dosados em laboratório, foram realizados os seguintes ensaios reológicos e tecnológicos:

- Determinação de massa específica – através da NBR 9833:2008 Versão Corrigida em 2009;
- Ensaio de reometria rotacional;
- Abatimento de cone d'Abrams – NBR NM 67:1998;
- Ensaio de cone invertido – proposto por Weidmann (2008) (Figura 13);
- Escoamento em Funil-V – NBR 15823-5:2017.

Figura 13 – Aparato de ensaio para Escoamento de Cone Invertido



Fonte: Denis Weidmann (2008)

No campo foram também registradas as temperaturas do ambiente e do concreto no cocho da bomba e as pressões base e de pico a qual o concreto (para uma determinada rede de bombeamento) foi solicitado em campo. Em seguida correlacionou-se os valores encontrados “*in loco*” com as propriedades obtidas através dos ensaios executados, verificando-se assim, suas influências nos parâmetros de bombeamento.

#### 4.2 MÉTODO DE ENSAIOS EM CAMPO

A metodologia de ensaios e sua sequência foi a seguinte:

- Coleta do concreto na tremonha da bomba em recipientes metálicos apropriados para a coleta e transporte;
- No momento da coleta de material foi realizado o registro da temperatura ambiente e da temperatura do concreto em descarga no cocho da bomba;
- Transporte do material até laboratório móvel instalado no canteiro (Figura 14);

Figura 14 – Laboratório Móvel Instalado



Fonte: Autores

- Determinação de massa específica;
- Ensaio de reometria rotacional;

- Abatimento do cone d'Abrams com registro tanto do abatimento quanto do espalhamento;
- Determinação do tempo de escoamento em cone invertido d'Abrams quando concreto com abatimento inferior à 20 cm ou determinação do tempo de escoamento em Funil-V quando concreto autoadensável.

Esta metodologia fora aplicada em duas campanhas experimentais em estruturas de diferentes tipologias, tipos de concretos e rede de bombeamento realizadas na cidade de Balneário Camboriú, estas campanhas serão descritas nos itens e a seguir:

#### **4.2.1 Primeira Campanha Experimental**

No dia 19 de setembro de 2017 montou-se o laboratório móvel descrito no item 4.2 no canteiro de obras de um edifício de elevada altura na cidade de Balneário Camboriú (Figura 15) com o objetivo de analisar o concreto empregado na concretagem das lajes do 53º pavimento da edificação.

Figura 15 – Edificação de Elevada Altura na Cidade de Balneário Camboriú



Fonte: Autores

A edificação residencial, ainda em execução, contará quando finalizada com 66 pavimentos distribuídos ao longo de seus 238,5 metros de altura em estrutura de concreto armado.

Todo o concreto analisado na concretagem das lajes do 53º pavimento foi bombeado através de um sistema de bombeamento composto por bomba lança – sem utilização do braço lança – com tubos e conexões metálicos montados por dentro da estrutura do prédio, gerando uma rede de aproximadamente 200 metros de comprimento linear. Foram empregados concretos convencionais com resistência característica de compressão de 50 MPa e índice de abatimento (slump) 220mm.

#### **4.2.2 Segunda Campanha Experimental**

Nos dias 16 de outubro de 2017 e 18 de outubro de 2017 foi acompanhada a concretagem de um bloco de coroamento (Figura 16) de um edifício residencial na cidade de Balneário Camboriú. O concreto utilizado na estrutura foi submetido aos ensaios e procedimentos descritos nos itens 4.1 e 4.2, onde ao todo analisaram-se o concreto recebido e utilizado em obra por 14 diferentes caminhões betoneiras.

Figura 16 – Bloco de Fundação na Cidade de Balneário Camboriú



Fonte: Autores

O bloco de coroamento será o responsável pela transferência da carga gerada pelos 40 pavimentos da estrutura de 145 metros de altura, às estacas da estrutura de fundação.

Foram especificados pelo projetista 3 camadas de tipos de concreto diferentes na concretagem da estrutura, onde na primeira camada foi utilizado um concreto autoadensável de 40 MPa de resistência à compressão característica e nas duas camadas seguintes concretos com índice de abatimento de 16 cm de 40 e 50 MPa de resistência à compressão característica. Todo o concreto foi bombeado por meio de sistema de bombeamento composto apenas por bomba lança com a utilização do braço lança, contando com uma rede de bombeamento de aproximadamente 40 metros de comprimento.

#### **4.3 MÉTODO DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO**

A metodologia de ensaios adotada em laboratório para analisar as influências de mudanças na composição de concretos em suas propriedades visando torná-los mais facilmente bombeáveis foi a seguinte:

- Realização da mistura;
- Realização do registro da temperatura ambiente e da temperatura do concreto ao final do processo de mistura;
- Determinação de massa específica do material;
- Ensaio de reometria rotacional;
- Abatimento do cone d'Abrams com registro tanto do abatimento quanto do espalhamento;
- Determinação do tempo de escoamento em cone invertido d'Abrams quando concreto convencional ou determinação do tempo de escoamento em Funil-V quando o concreto for autoadensável.

Os seguintes fatores foram analisados visando otimizar o desempenho do material em relação ao bombeamento:

- Forma do agregado britado – VSI x Giro esférico;
- Influência do índice de abatimento;
- Influência da água;

- Influência de aditivos super plastificantes na mistura
- Relação água x aditivos super plastificantes – Para um mesmo índice de abatimento a influência da água e dos aditivos na tensão de escoamento, viscosidade do material e capacidade de formação da camada de lubrificação.

Para a identificação da influência do índice de abatimento, da água e de aditivos nas propriedades reológicas do concreto, fixou-se a proporção dos materiais constituintes em 1: 0,99: 1,49: 2,52 (cimento, areia fina natural, areia média natural e brita zero) variando a quantidade de água necessária para a obtenção de concretos com índices de abatimento de 8,0 (230 litros de água por m<sup>3</sup>), 12,0 (240 litros) e 16,0 cm (250 litros). Em um segundo momento fixou-se o consumo de água em 200 litros por m<sup>3</sup> e em 205 litros por m<sup>3</sup> variando assim o teor de aditivo super plastificante até a obtenção destes índices de abatimento.

Já com a finalidade de identificar a influência da forma de agregados britados nas propriedades reológicas dos concretos, fixou-se uma proporção de materiais constituintes em 1: 0,99: 1,49: 2,52 (cimento, areia de duna, areia estudada e brita zero) variando a água utilizada até a obtenção dos índices de abatimento de 8, 12 e 16 centímetros.

O proporcionamento final dos materiais utilizados na dosagem dos concretos realizados, encontra-se disponível no APÊNDICE A – PROPORCIONAMENTO REALIZADO e a caracterização dos agregados utilizados no presente trabalho encontra-se disponível no APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS.

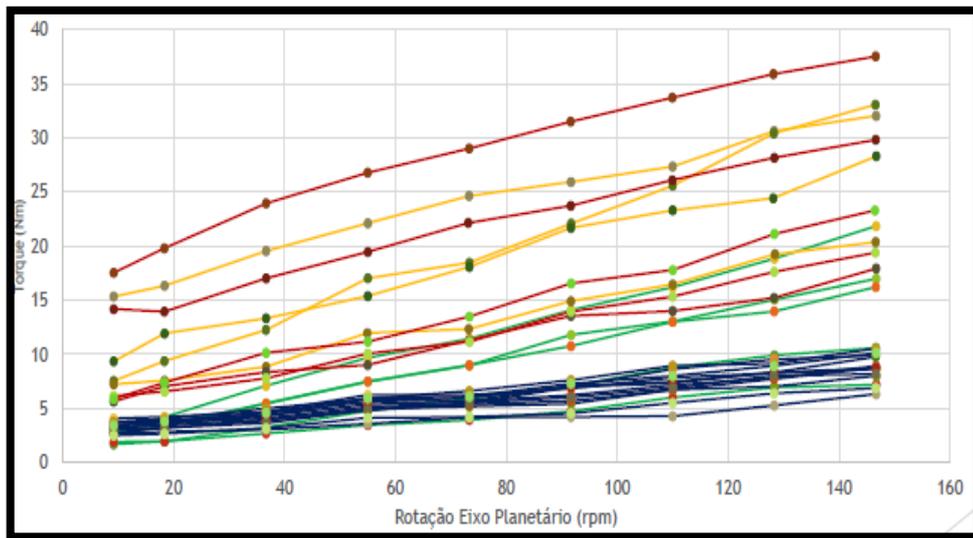
Concluída a etapa de avaliação do concreto segue-se ao tratamento de dados, sendo necessário primeiro o esclarecimento quanto a conversão dos dados obtidos a partir da reometria rotacional em constantes físicas do material, realizadas e explanadas no item 4.4 a seguir.

#### **4.4 CONVERSÃO DE DADOS REÔMETRO PHESO**

Conforme dito anteriormente (item 3.3.1.2.1) o reômetro Pheso em conjunto com seu software de tratamento de dados, SCI-R, apresenta as curvas reológicas dos materiais ensaiados em função do torque registrado e da rotação do eixo, gerando curvas de cisalhamento do material Torque x RPM (Figura 17). Estas medidas não

representam propriamente as propriedades dos materiais, sendo dependentes das configurações geométricas do instrumento de leitura, por exemplo, ao comparar um resultado de ensaio de um mesmo material analisado na configuração de ensaios com cuba e haste para 8L e 17L obtêm-se resultados completamente diferentes.

Figura 17 – Curvas Resultantes do Ensaio de Reometria Rotacional



Fonte: Autores

Assim, ao quantificar as dimensões da geometria das hastes (Figura 18) há a possibilidade de conversão dos valores obtidos de torque e rpm em tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, dados típicos de estudos reológicos como os desenvolvidos por Kaplan (2001) e Secrieru *et al.* (2017).

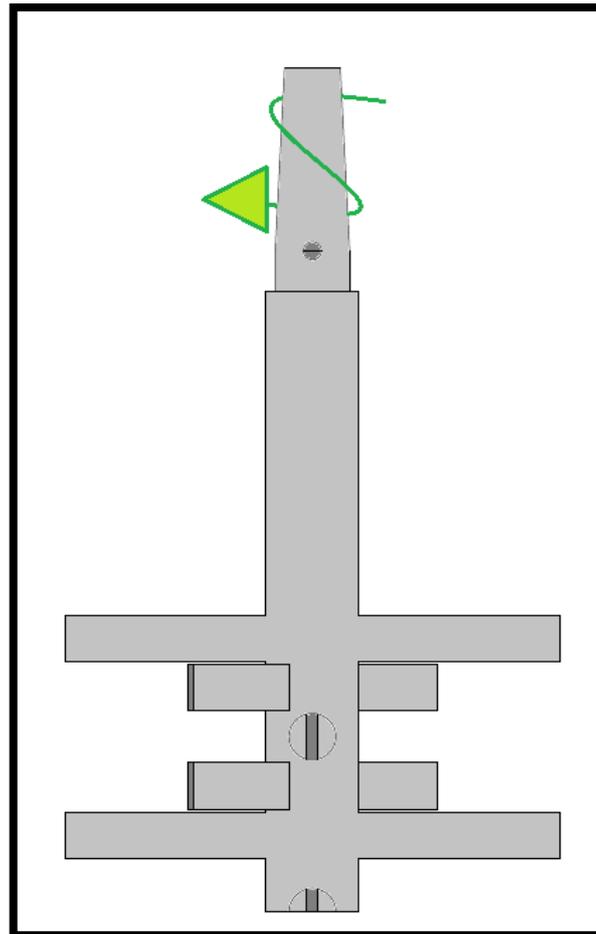
Figura 18 – Geometria das Hastes



Fonte: Autores

Considerando a uniformidade da distribuição de tensões ao longo das hastes, realizou-se uma série de demonstrações matemáticas e sabendo-se que a leitura do torque do reômetro se dá na parte central do eixo metálico (Figura 19) é possível converter os valores obtidos, tanto para a geometria de ensaio de 17 litros quanto a de 8 litros.

Figura 19 – Medição de Torque no Eixo



Fonte: Autores

#### 4.4.1 Conversão torque medido em tensão de cisalhamento

Inicialmente faz-se necessário distribuir igualmente o torque obtido na leitura do equipamento nas hastes de leitura através da equação 2:

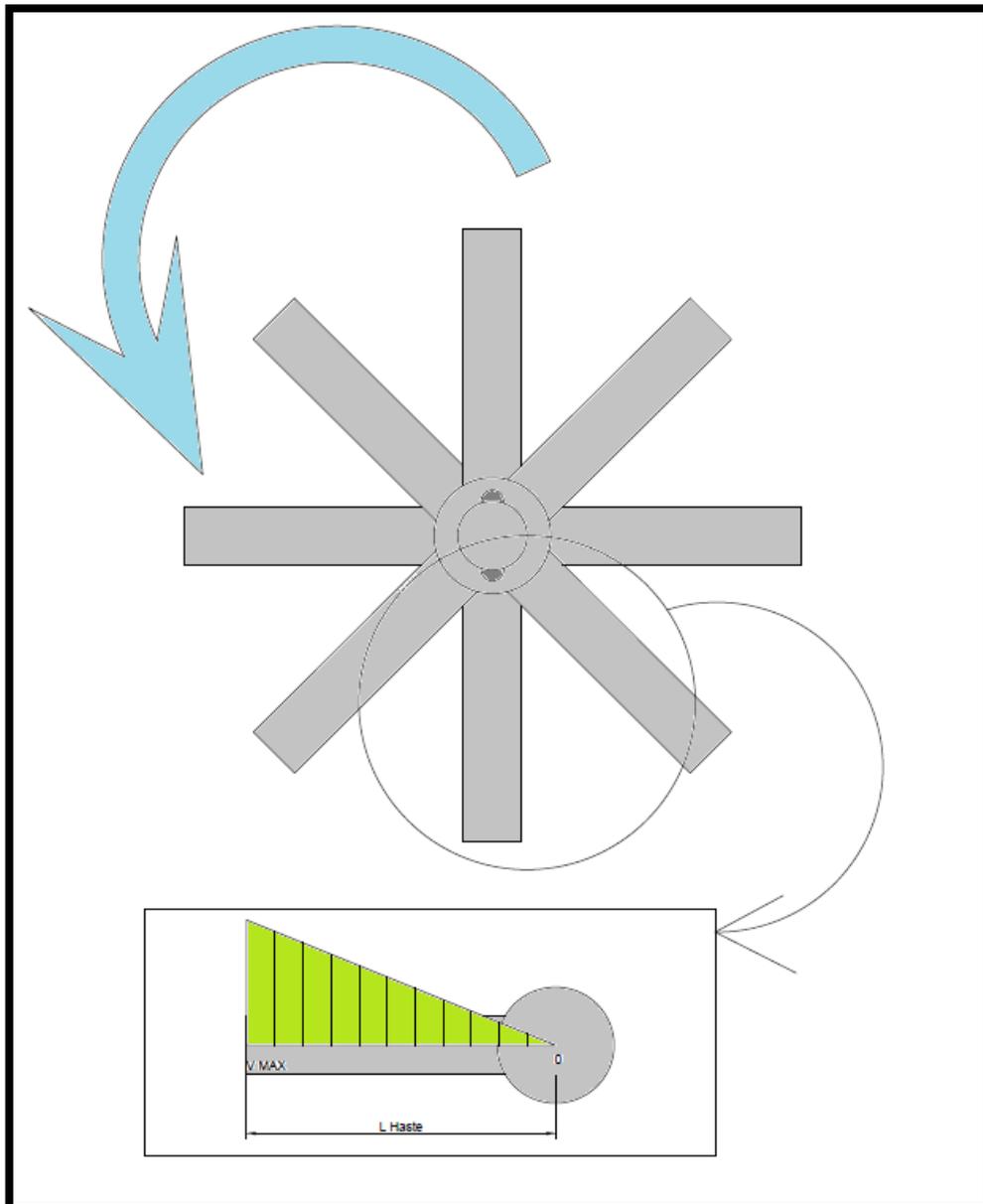
$$\text{Torque por Haste} = \frac{\text{Torque Medido}}{\text{Número de Hastes na Leitura}} \quad (2)$$

A partir do torque em cada haste há a possibilidade de converter o torque obtido em uma força a um determinado ponto de aplicação aplicando a equação 3:

$$\text{Torque por Haste} = \text{Força por Pá} \times \text{Distância de Aplicação} \quad (3)$$

Para definir tal distância de aplicação faz-se necessário definir o modelo de distribuição de carga na peça em questão, realizado analogamente ao perfil de velocidade observado em cada haste, onde a velocidade é máxima na extremidade da haste e zero no eixo central do instrumento de leitura, exemplificado na Figura 20.

Figura 20 – Perfil de Velocidade Haste



Fonte: Autores

Diante de tal distribuição supracitada a força equivalente por pá exercida no sistema é a seguinte equação 4:

$$\text{Força por Pá} = \frac{\text{Força Máxima} \times \text{Comprimento da Haste}}{2} \quad (4)$$

Sabendo que, segundo Popov (1998), a distância de aplicação de tal força equivalente encontra-se a 1/3 do comprimento da haste próximo do ponto de maior tensão atuante, o torque por pá é dado pela equação 5:

$$\text{Torque por Pá} = \frac{F_{Max} \times L_{Haste}}{2} \times \frac{2 \times L_{Haste}}{3} = \frac{F_{Máx} \times (L_{Haste})^2}{3} \quad (5)$$

Para efeito de análise será utilizada a força média, obtida na equação 6:

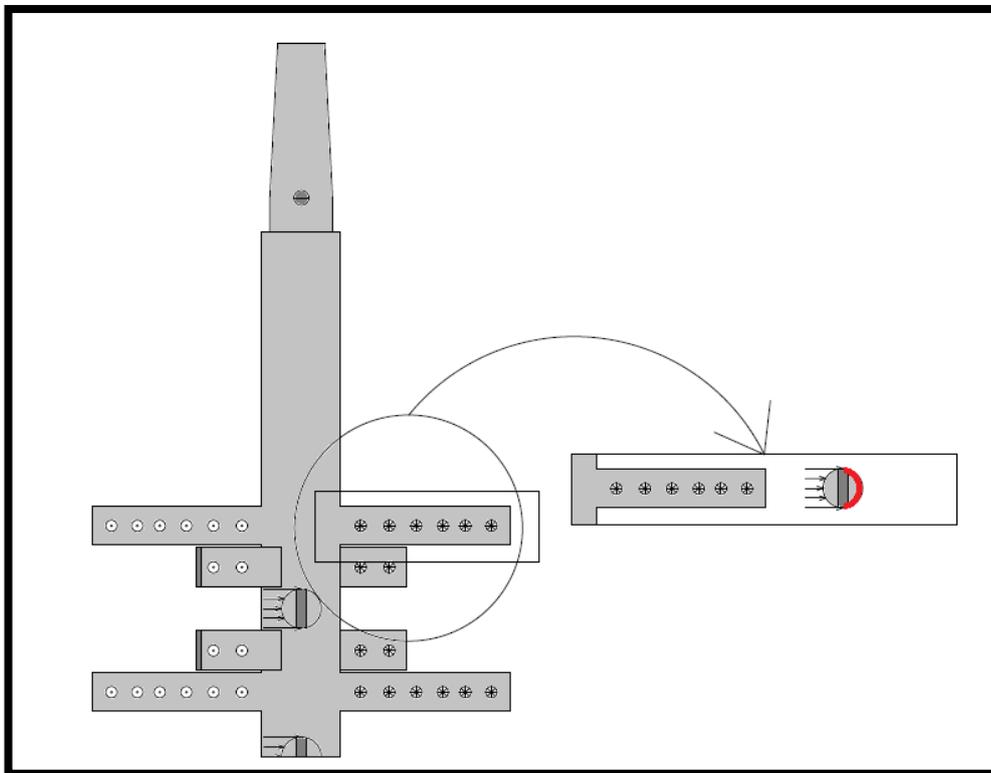
$$F_{Med} = \frac{F_{Max}}{2} \quad (6)$$

Desta forma a parcela equivalente a força na tensão cisalhante do sistema é representada pela equação 7:

$$F_{Med} = \frac{\text{Torque Medido} \times 3}{\text{Número de Hastes} \times 2 \times L_{Haste}^2} \quad (7)$$

A partir da parcela da força para determinação da tensão de cisalhamento há a necessidade de determinar-se a área submetida ao cisalhamento. A Figura 21 representa esquematicamente a área de contato da haste.

Figura 21 – Exemplificação Área de Contato Haste



Fonte: Autores

A área de contato da haste com o material é representada pelas equações 8 e 9:

$$\text{Área de Contato} = \text{Número de Hastes} \times \int_0^{L_{Haste}} \pi \times \text{Raio Haste} dx \quad (8)$$

$$\text{Área de Contato} = \text{Número de Hastes} \times \pi \times \text{Raio Haste} \times L_{Haste} \quad (9)$$

Como a tensão de cisalhamento média é definida na equação 10:

$$\text{Tensão de Cisalhamento Média} = \frac{\text{Força Média}}{\text{Área de Contato}} \quad (10)$$

Ao substituir-se os valores previamente obtidos chegou-se a seguinte equação 11:

$$\text{Tensão de Cisalhamento Média} = \frac{\text{Torque Medido} \times 3}{\text{Número de Hastes}^2 \times 2 \times L_{Haste}^3 \times \pi \times \text{Raio Haste}} \quad (11)$$

#### 4.4.2 Conversão rotação por minuto em taxa de cisalhamento

Resolvida a tensão de cisalhamento do material há a necessidade de definição da taxa de cisalhamento a qual o material será submetido. Sabendo que o equipamento apresenta como valor a rotação do eixo em rotações por minuto (rpm), pode-se converter tal unidade em rotações por segundo (rps) da seguinte com a equação 12:

$$rps = \frac{rpm}{60} \quad (12)$$

Sabendo que o movimento descrito é circular e uniforme em determinado instante, pode-se determinar a velocidade em cada posição da haste (x) pela seguinte equação 13:

$$v = \int_0^{L_{Haste}} \frac{rpm}{60} dx, \text{ onde: } v_{max} = \frac{rpm}{60} \times L_{Haste} \times 2 \times \pi \text{ e } v_{min} = 0 \quad (13)$$

Ao obter o comprimento da haste e determinar as velocidades máximas e mínimas anteriormente explanadas é possível definir a taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) aplicando a equação 14:

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta L} \rightarrow \frac{\left(\left(\frac{rpm}{30} \times \pi \times L_{Haste}\right) - 0\right)}{(L_{Haste} - 0)} \rightarrow \gamma = \frac{rpm \times \pi}{30} \quad (14)$$

#### 4.4.3 Aplicação do modelo de Bingham

Por fim, com a obtenção dos parâmetros de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento pode-se aplicar o modelo de Bingham, determinando para cada

ponto de taxa de cisalhamento uma tensão de cisalhamento correspondente. Ao realizar a regressão linear obtêm-se os valores de tensão de escoamento, coeficiente linear da reta, e a viscosidade plástica dos materiais, coeficiente angular da reta, a partir da equação 1 reproduzida novamente abaixo:

$$\tau = \tau_o + \mu \times \gamma \quad (1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_o$  = tensão de escoamento (Pa)

$\mu$  = viscosidade plástica (Pa.s)

$\gamma$  = taxa de cisalhamento (1/s).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas etapas de estudo em campo e em laboratório, bem como serão realizadas avaliações de possíveis alternativas para propiciar um melhor desempenho do sistema de bombeamento empregado *in loco* a partir dos resultados dos ensaios obtidos em laboratório.

### 5.1 ENSAIOS EM CAMPO

Nos itens 5.1.1 e 5.1.2 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da realização das campanhas experimentais realizadas em obras, através do estudo do concreto recebido e empregado nestas.

#### 5.1.1 Primeira Campanha Experimental

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios tecnológicos, apresentados no item 4.1, aplicados no material entregue em obra, por meio de caminhão betoneira, através da metodologia descrita em 4.2.

Tabela 1 – Primeira Campanha Experimental – Resultados Ensaio Tecnológicos

Nota Fiscal	Abatimento (cm)	Espalhamento (cm)	Escoamento de Cone Invertido (s)	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
121140	23,0	42,0	0,90	2,427
121141	22,5	41,0	0,92	2,431
121142	21,0	36,0	0,99	2,425
121143	22,5	36,0	0,68	2,380
121149	23,0	43,0	0,78	2,423
121150	22,0	37,0	1,00	2,429
121157	22,5	39,0	0,94	2,421
121158	23,0	40,0	0,78	2,409
121166	22,0	40,0	0,84	2,411
121182	22,5	37,0	0,81	2,415
121184	23,5	43,0	0,76	2,398
121192	22,0	38,0	0,79	2,433

Os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone e escoamento de cone invertido serão discutidos em conjunto com os demais resultados dos ensaios realizados em laboratório no item 5.3 buscando alternativas simplórias para a substituição da utilização de um reômetro no canteiro de obras para a determinação das propriedades reológicas dos concretos.

Já a Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros de bombeamento, a temperatura do material e do ambiente, bem como os resultados dos estudos de reologia rotacional realizados *in loco* no concreto recebido em conjunto com a metodologia de conversões de resultados do equipamento para as propriedades reológicas do material apresentadas no item 4.4.

Tabela 2 – Primeira Campanha – Parâmetros de Bombeamento e Propriedades Reológicas

Nota Fiscal	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Concreto (°C)	Pressão Manômetro (bar)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
121140	24,0	27,0	220	896,86	85,16
121141	23,0	27,0	200	702,27	115,70
121142	23,0	27,0	210	789,09	81,45
121143	22,0	29,0	200	602,46	46,39
121149	23,0	29,0	195	703,27	75,45
121150	22,0	29,0	205	694,83	101,11
121157	22,0	27,0	200	789,95	112,25
121158	22,0	27,0	190	625,27	89,26
121166	23,0	29,0	200	690,73	97,58
121182	22,0	28,5	190	567,67	99,89
121184	23,0	30,0	190	516,99	72,21
121192	22,0	27,5	205	737,26	106,94

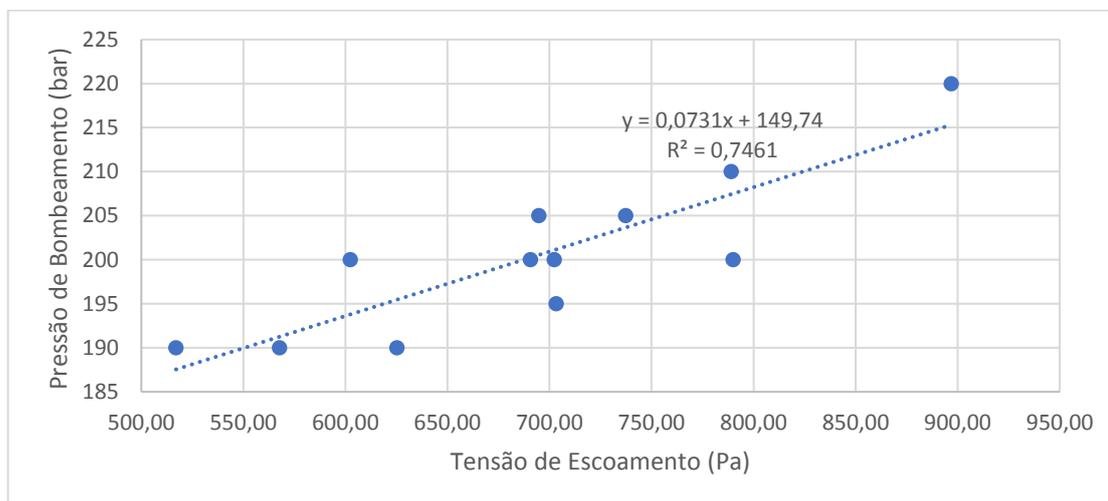
Os parâmetros de temperatura, espalhamento e massa específica não apresentaram influência direta na tensão de escoamento e viscosidade do material, portanto não serão objetos de estudo no presente trabalho.

Como cada campanha experimental possui suas próprias características de complexibilidade, como por exemplo, diâmetro de tubulação, fluxo de bombeamento utilizado, tipo de bomba utilizada, comprimento da rede na qual o concreto teve que percorrer, a resistência do concreto empregado, sua faixa de abatimento e componentes utilizados na mistura, serão aqui destacados os parâmetros reológicos bem como suas influências na pressão de bombeamento encontrada *in loco* para a primeira campanha experimental.

Na Figura 22 são destacados os valores de pressão de bombeamento, bem como as tensões de escoamento encontradas, correspondentes a cada mistura analisadas por meio da reometria rotacional. Pode-se perceber que existe uma tendência de comportamento, onde os concretos que apresentaram as maiores pressões de bombeamento apresentaram os maiores valores de tensão de

escoamento, e nos concretos que apresentaram os menores parâmetros para a pressão de bombeamento, apresentaram também os menores valores de tensão de escoamento.

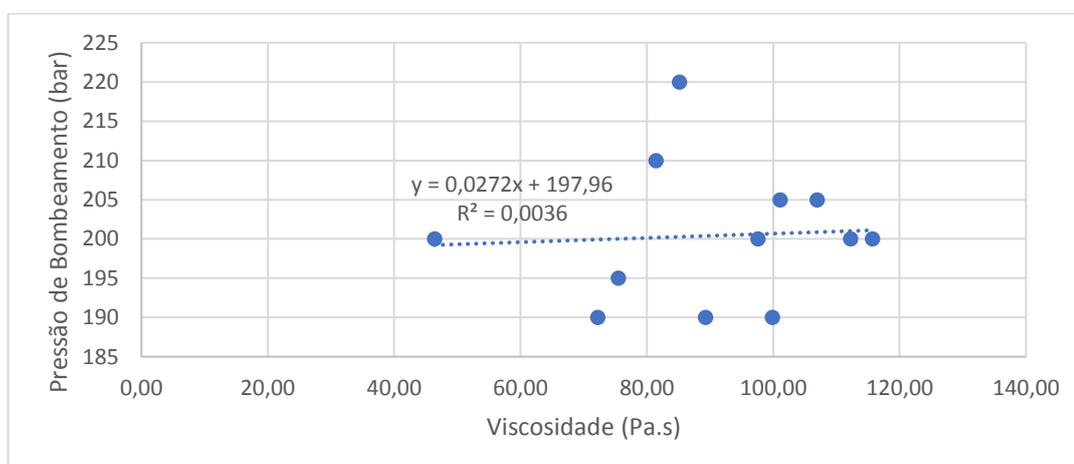
Figura 22 – Primeira Campanha Experimental – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento



Fonte: Autores

Assim como fora feito para a tensão de escoamento do material, a Figura 23 destaca o mesmo parâmetro de pressão de bombeamento desta vez sendo analisado em relação a viscosidade encontrada para cada mistura de concreto. Ao contrário do encontrado para a tensão de escoamento, não houve relação de proporcionalidade para a viscosidade destes concretos e sua pressão de bombeamento.

Figura 23 – Primeira Campanha Experimental – Viscosidade x Pressão de Bombeamento



Fonte: Autores

Vale destacar que na obra em questão foram empregados concretos dosados apenas por uma concreteira, de mesma resistência à compressão característica e índice de abatimento 22 cm  $\pm$  2cm, sendo tais conclusões obtidas com base nestas misturas.

### 5.1.2 Segunda Campanha Experimental

Assim como fora feito para a primeira campanha experimental, a Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios tecnológicos obtidos em campo na segunda campanha experimental, ensaios descritos no item 4.1, aplicados no material recebido em obra por meio de caminhão betoneira através da metodologia descrita em 4.2.

Tabela 3 – Segunda Campanha Experimental – Resultados Ensaio Tecnológicos

Nota Fiscal	Abatimento (cm)	Espalhamento (cm)	Escoamento de Cone Invertido (s)	Escoamento Funil-V (s)	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
34531	Aut.	65,0	x	4,30	2,364
34532	Aut.	70,5	x	4,05	2,341
34534	Aut.	66,0	x	6,12	2,376
34536	Aut.	63,0	x	4,61	2,376
34537	Aut.	64,5	x	2,58	2,303
34556	17,0	28,5	4,08	x	2,390
34557	23,5	43,0	2,29	x	2,411
34560	19,5	32,0	2,27	x	2,400
34567	22,0	40,0	2,87	x	2,384
34670	16,0	23,5	8,89	x	2,398
34671	19,5	30,0	3,45	x	2,384
34682	21,0	36,5	1,68	x	2,380
34685	24,0	46,5	1,97	x	2,374
34689	24,5	46,0	2,07	x	2,400

Aut = concreto autoadensável

Assim como destacado na primeira campanha experimental, os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone, escoamento de cone invertido e de escoamento em funil-V serão discutidos em conjunto com os demais resultados dos ensaios realizados em laboratório no item 5.3.

Diferentemente do material ensaiado na primeira campanha experimental, onde só foi especificado uma única resistência característica à compressão e uma única faixa de abatimento, nesta segunda campanha experimental foram empregadas 3 tipicidades diferentes de concretos, um autoadensável de resistência característica à compressão de 40 MPa, um concreto convencional de 40 MPa de resistência

característica à compressão e outro convencional de 50 MPa de resistência característica à compressão.

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros de bombeamento, a temperatura do material e do ambiente, bem como os resultados dos estudos de reologia rotacional realizados *in loco* no concreto recebido em conjunto com a metodologia de conversões de resultados do equipamento para as propriedades reológicas do material apresentadas no item 4.4.

Tabela 4 – Segunda Campanha – Parâmetros de Bombeamento e Propriedades Reológicas

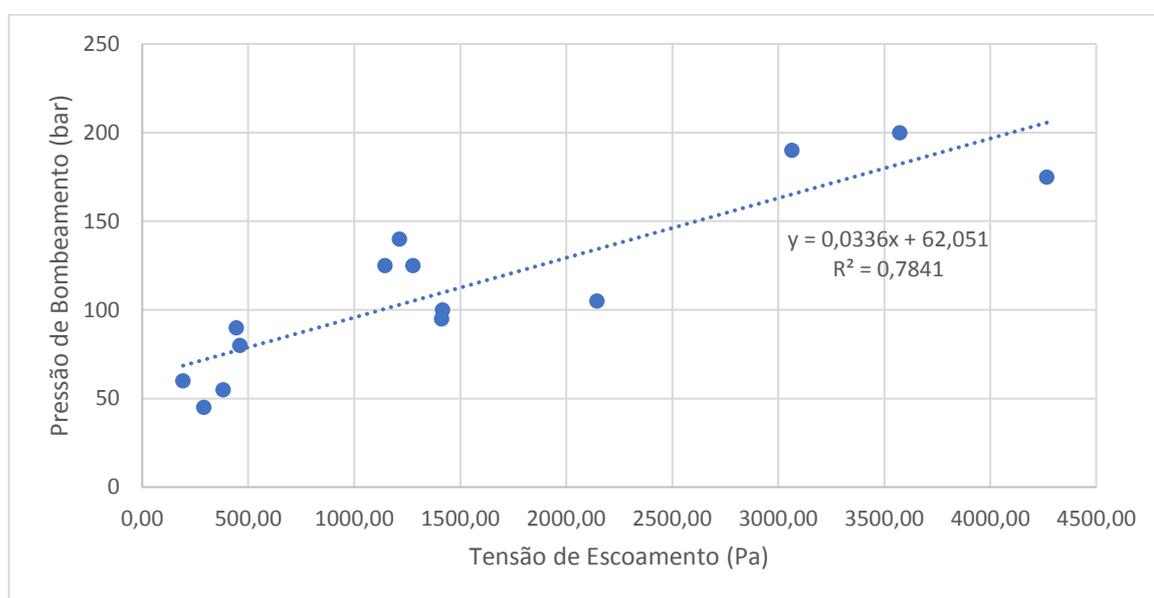
Nota Fiscal	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura do Concreto (°C)	Pressão Manômetro (bar)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
34531	25,0	21,0	55	381,80	246,84
34532	24,0	17,6	60	192,46	165,37
34534	25,0	16,1	80	461,89	308,76
34536	25,0	18,0	90	444,72	228,46
34537	25,0	20,4	45	290,69	98,60
34556	24,0	19,7	200	3573,20	289,83
34557	24,0	17,6	100	1416,70	430,47
34560	24,0	20,2	105	2145,80	300,18
34567	23,0	19,3	95	1413,10	233,53
34670	22,0	16,9	175	4267,20	350,81
34671	22,0	15,5	190	3065,20	287,75
34682	24,0	18,1	125	1277,70	188,91
34685	24,0	18,8	125	1145,10	228,29
34689	24,0	17,7	140	1214,20	284,76

Assim como observado na primeira campanha, os parâmetros de temperatura, espalhamento e massa específica também não apresentaram influência direta na tensão de escoamento e viscosidade do material, assim não serão objetos de estudo.

Diferentemente do material analisado na primeira campanha experimental o concreto fora bombeado por meio de sistema de bombeamento composto apenas por bomba lança com a utilização do braço lança, contando com uma rede de bombeamento de aproximadamente 40 metros de comprimento, sendo assim necessário isolar os resultados de parâmetros de bombeamento desta campanha, podendo apenas serem analisados entre si, não podendo ser objeto de comparação com os valores obtidos na primeira campanha experimental.

Assim, na Figura 24 são destacados os valores de pressão de bombeamento, bem como as tensões de escoamento encontradas correspondentes a cada mistura analisadas por meio da reometria rotacional. Assim como visualizado nos concretos analisados na primeira campanha experimental, os concretos da segunda campanha que apresentaram as maiores pressões de bombeamento apresentaram também os maiores valores de tensão de escoamento, indicando que há uma tendência de comportamento, onde quanto maior a tensão de escoamento do concreto maior será a pressão de bombeamento deste material.

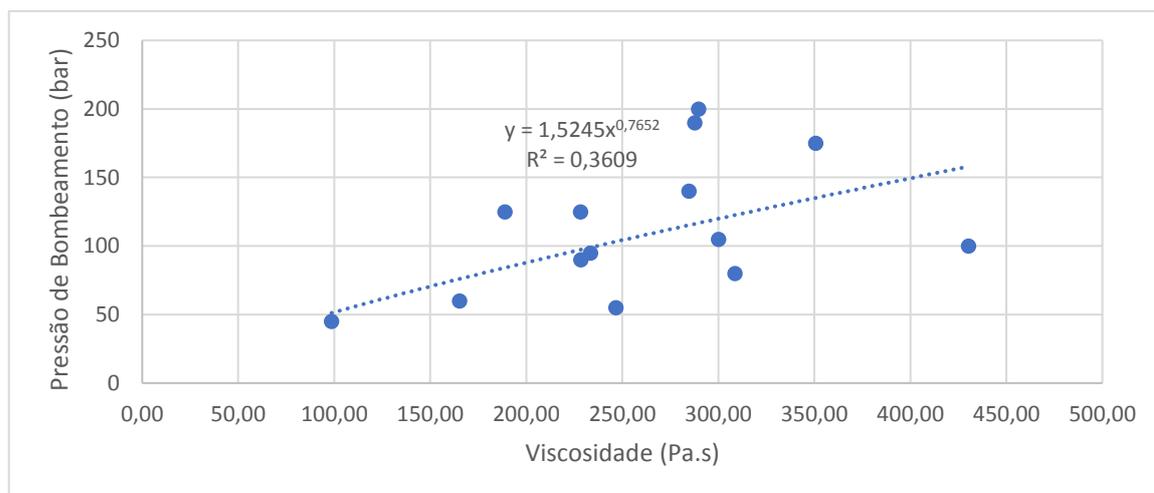
Figura 24 – Segunda Campanha Experimental – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento



Fonte: Autores

Assim como fora feito para a tensão de escoamento do material, a Figura 25 destaca o mesmo parâmetro de pressão de bombeamento desta vez sendo analisado em relação a viscosidade encontrada para cada mistura de concreto. Ao serem comparados com os resultados da primeira campanha experimental, a relação entre viscosidade e pressão de bombeamento indicou uma tendência de comportamento, porém com um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) muito baixo, indicando que para o sistema de bombeamento em questão há alguma influência da viscosidade do material nos parâmetros de bombeamento do sistema.

Figura 25 – Segunda Campanha Experimental – Viscosidade x Pressão de Bombeamento



Fonte: Autores

## 5.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Com o intuito de viabilizar alternativas que possibilitem melhorias no desempenho de concretos utilizados em conjunto com determinados sistemas de bombeamento, foram realizados em laboratório uma série de testes envolvendo variações de constituintes e aditivos; assim nos itens 5.2.1 e 5.2.2 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do estudo destas variações em laboratório.

### 5.2.1 Influência da Água e de Aditivo Super Plastificante

A Tabela 5 apresenta os valores das propriedades reológicas dos concretos obtidos com base nos métodos e conversão de dados propostos em 4.3 e 4.4.

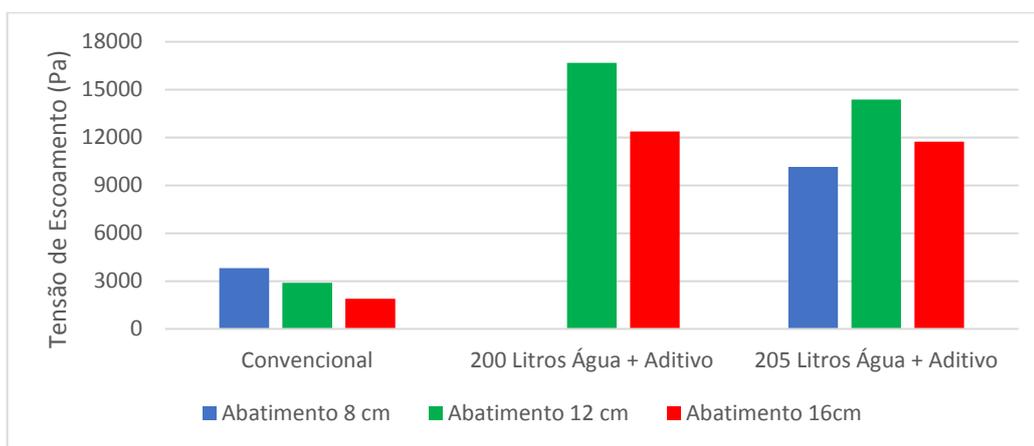
Tabela 5 – Influência de Super Plastificantes nas Propriedades Reológicas dos Concretos

Mistura	Abatimento (cm)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
Concreto sem Aditivos	8,0	3819,60	99,16
	12,0	2595,90	131,04
	16,0	1888,90	95,49
200 Litros + Aditivos	8,0	x	x
	12,0	16673,00	144,13
	16,0	12371,00	196,95
205 Litros + Aditivos	8,0	10166,00	155,63
	12,0	14370,00	384,14
	16,0	11745,00	337,38

Com base no exposto é possível verificar que a utilização de aditivo super plastificante e de água exerce influência nas propriedades reológicas dos concretos

produzidos, assim a Figura 26 destaca a influência destes componentes na tensão de escoamento do material, onde é possível verificar que a maior utilização de água no proporcionamento do concreto reduz a tensão de escoamento do material e o emprego de aditivos super plastificantes em substituição à água necessária para a obtenção dos índices de abatimento desejados gera um aumento na tensão de escoamento destes concretos.

Figura 26 – Influência de Aditivo Super Plastificante e Água na Tensão de Escoamento



Fonte: Autores

Já a Figura 27 apresenta a influência da utilização de aditivo super plastificante e da água na viscosidade dos concretos produzidos, onde ao analisar estes concretos em uma mesma faixa de índice de abatimento, é possível verificar o mesmo comportamento verificado na figura anterior, onde ao empregar a utilização de aditivo super plastificante em substituição à água geramos um aumento na viscosidade dos concretos produzidos.

Figura 27 – Influência de Aditivo Super Plastificante e Água na Viscosidade



Fonte: Autores

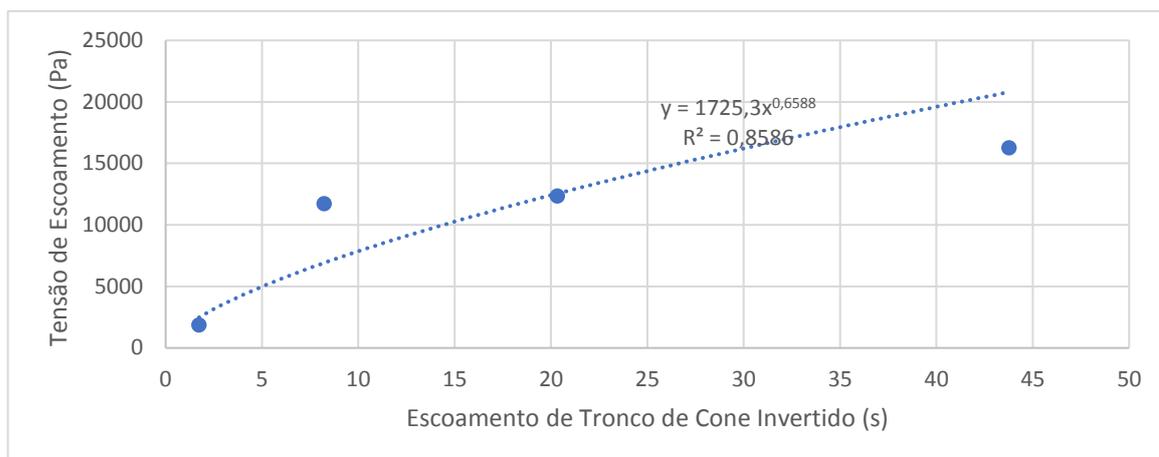
Apesar de executados em todas as misturas realizadas, conforme exposto na metodologia de ensaios apresentada em 4.3, o ensaio de escoamento de tronco de cone invertido proposto por Weidmann (2018) só apresentou resultados para as misturas com um índice de abatimento de 16,0 cm, pois as misturas com menores índices de abatimento acabaram por não escoar no tronco de cone. Assim realizou-se ainda outra mistura, desta vez com um consumo de água fixado em 190 litros por m<sup>3</sup> para verificação da influência destes aditivos no tempo de escoamento do concreto produzido, os resultados obtidos encontram-se expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Escoamento de Tronco de Cone Invertido e Propriedades Reológicas

Mistura	Abatimento (cm)	Tempo de Escoamento de Tronco de Cone Invertido (s)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Teor de Aditivo Utilizado
190 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	16,0	43,770	16283,00	265,15	1,00%
200 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	16,0	20,330	12371,00	196,95	0,50%
205 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	16,0	8,230	11745,00	337,38	0,60%
Concreto Sem Aditivo 250 Litros de Água	16,0	1,730	1888,90	95,49	0,00%

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para os ensaios realizados de escoamento de tronco de cone e a tensão de escoamento dos concretos apresentados na Tabela 6, onde se é possível visualizar que há uma relação direta entre o tempo de escoamento do concreto no tronco de cone invertido e a tensão de escoamento nestes concretos de mesma proporção de constituintes, variando apenas a quantidade de água empreendida na mistura e o teor de aditivo super plastificante utilizado.

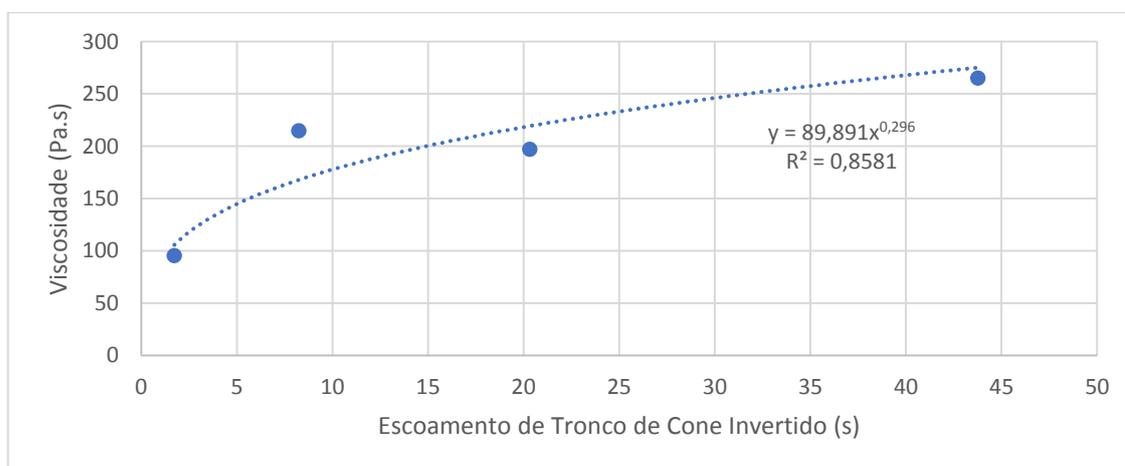
Figura 28 – Tempo de escoamento em Tronco de Cone Invertido e Tensão de Escoamento



Fonte: Autores

Já a Figura 29 apresenta os resultados obtidos de escoamento de tronco de cone e a viscosidade dos concretos apresentados na Tabela 6, onde é possível visualizar que há uma relação direta entre o tempo de escoamento do concreto no tronco de cone invertido e a viscosidade destes concretos.

Figura 29 – Tempo de Escoamento em Tronco de Cone Invertido e Viscosidade



Fonte: Autores

## 5.2.2 Influência da Forma dos Grãos

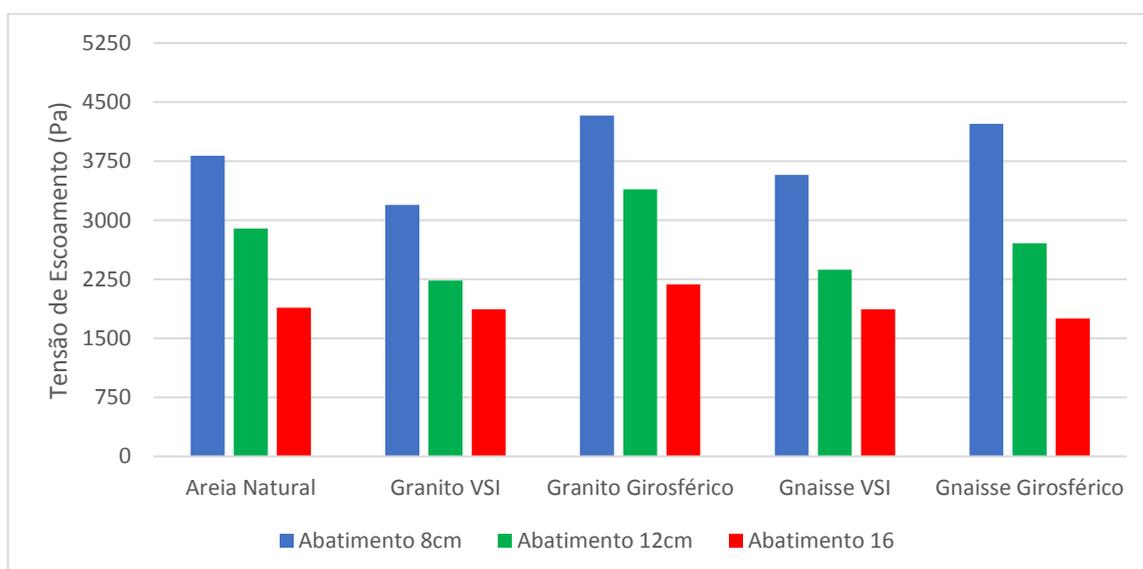
A Tabela 7 apresenta os valores de tensão de escoamento e viscosidade, para cada índice de abatimento, dos concretos produzidos com areias de diferentes origens mineralógicas e dois tipos diferentes de britadores, VSI (britadores de eixo vertical) e giroférico, bem como o coeficiente de forma ponderado destas areias de mesma granulometria composta, determinado conforme metodologia proposta por Hickel et al. (2018).

Tabela 7 – Influência de Origens Mineralógicas e de Diferentes Britadores nas Propriedades Reológicas dos Concretos

Mistura	Abatimento (cm)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Coefficiente de Forma Ponderado
Areia Natural	8,0	3819,60	99,16	0,6245
	12,0	2595,90	131,04	
	16,0	1888,90	95,49	
Granito VSI	8,0	3196,50	158,26	0,6067
	12,0	2234,00	149,45	
	16,0	1869,30	102,72	
Granito Girosférico	8,0	4328,50	178,10	0,5609
	12,0	3391,70	146,16	
	16,0	2183,50	124,54	
Gnaisse VSI	8,0	3574,20	199,39	0,5927
	12,0	2373,00	148,91	
	16,0	1867,40	111,99	
Gnaisse Girosférico	8,0	4225,50	197,31	0,5606
	12,0	2709,10	147,38	
	16,0	1752,80	135,90	

Com base no exposto na Tabela 7, a Figura 30 apresenta que, dentro de cada concreto ensaiado, a modificação dos materiais constituintes fixando-se a mesma proporção em massa dos materiais, gera uma alteração nas propriedades de tensão de escoamento destes materiais, bem como a adição de água em cada uma destas composições realizadas para a obtenção dos índices de abatimento 8, 12 e 16cm reduz a tensão de escoamento dos concretos produzidos.

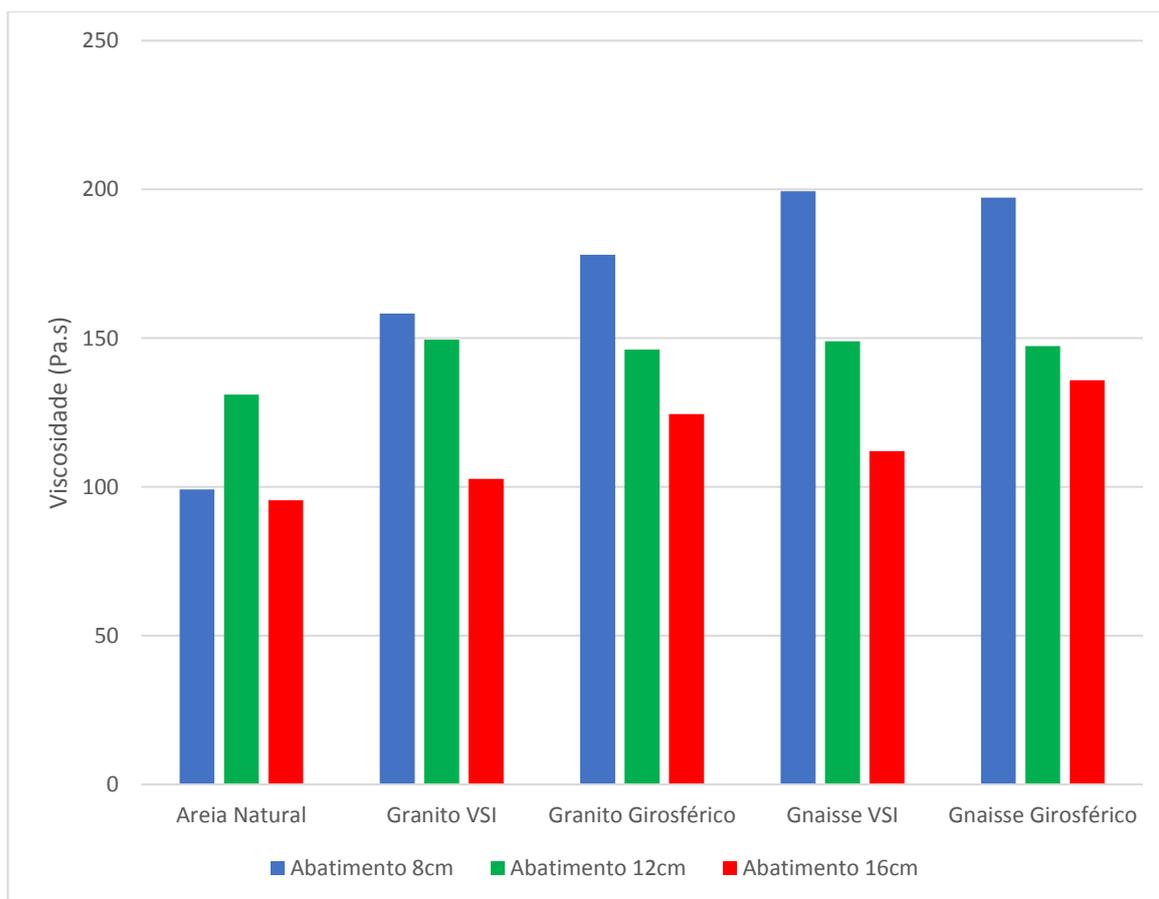
Figura 30 – Influência da Forma do Grão na Tensão de Escoamento do Concreto



Fonte: Autores

Assim como apresentado na Figura 30, a Figura 31 apresenta que, em cada concreto ensaiado, a troca do material utilizado como areia média, constituintes permanecendo fixa a proporção em massa dos materiais, gera uma alteração na viscosidade destes concretos, bem como a adição de água em cada uma destas composições realizadas reduziu, na maioria dos casos, a viscosidade da mistura.

Figura 31 – Influência da Forma do Grão na Viscosidade

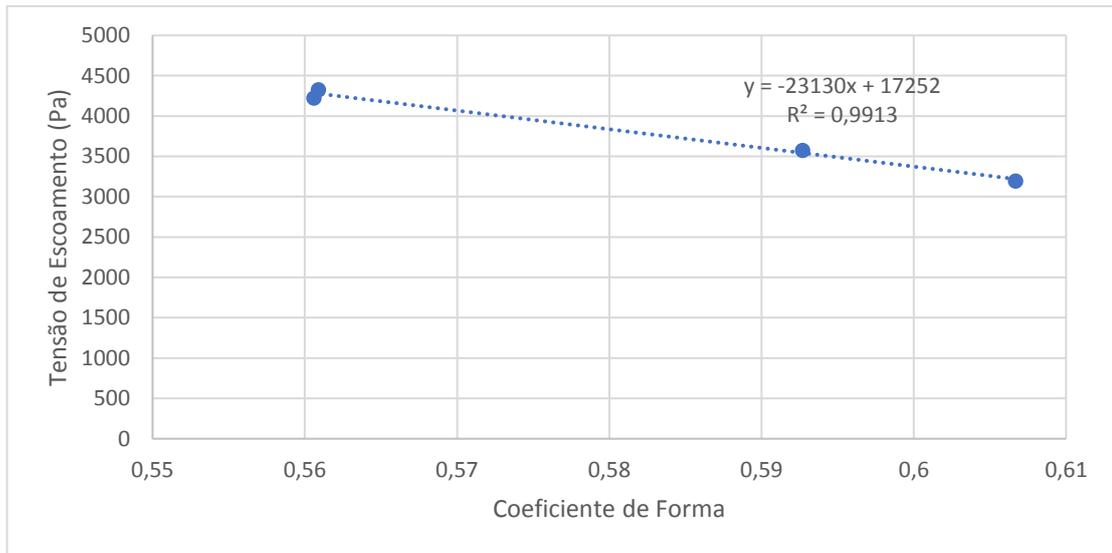


Fonte: Autores

Com o intuito de analisar a influência da forma nas propriedades reológicas dos concretos produzidos, isolou-se os concretos confeccionados em cada faixa de índice de abatimento estudada.

Tendo enfatizado tal ponto, a Figura 32 apresenta a influência da forma dos grãos na tensão de escoamento dos concretos de índice de abatimento de 8 centímetros, produzidos com agregados de britagem, de diferentes origens mineralógicas e oriundos de diferentes britadores, apresentando uma tendência de comportamento onde o agregado mais arredondado proveniente de britadores VSI produz concretos com menores tensões de escoamento.

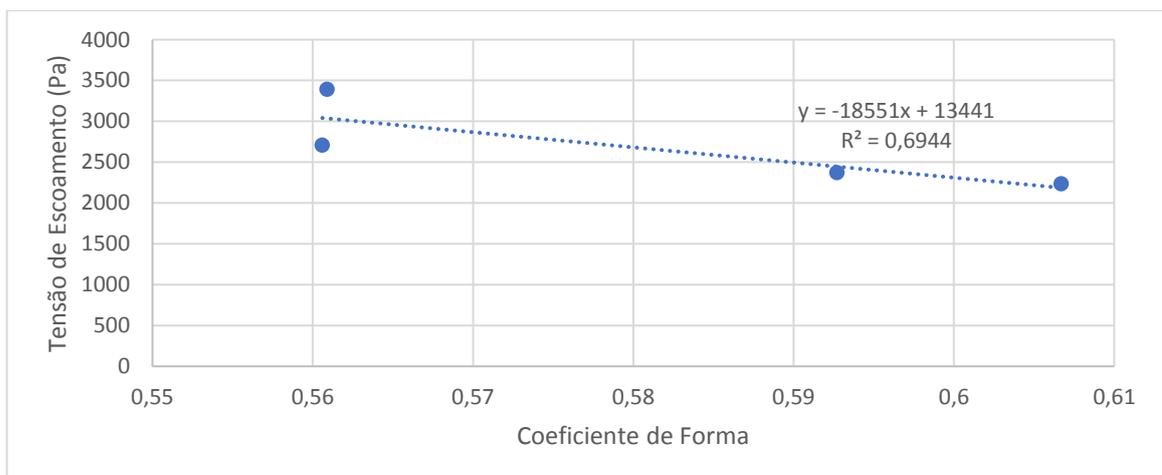
Figura 32 – Influência da Forma na Tensão de escoamento – Abatimento 8cm



Fonte: Autores

Assim como a tendência apresentada na Figura 32, a Figura 33 apresenta a influência da forma dos grãos na tensão de escoamento dos concretos produzidos com agregados de britagem, de diferentes origens mineralógicas e britadores, para o índice de abatimento de 12 centímetros, apresentando uma tendência de comportamento onde o agregado mais arredondado proveniente de britadores VSI tende a produzir concretos com menores tensões de escoamento, entretanto ao comparar com o resultado obtido na figura anterior com uma relativa redução no coeficiente de determinação.

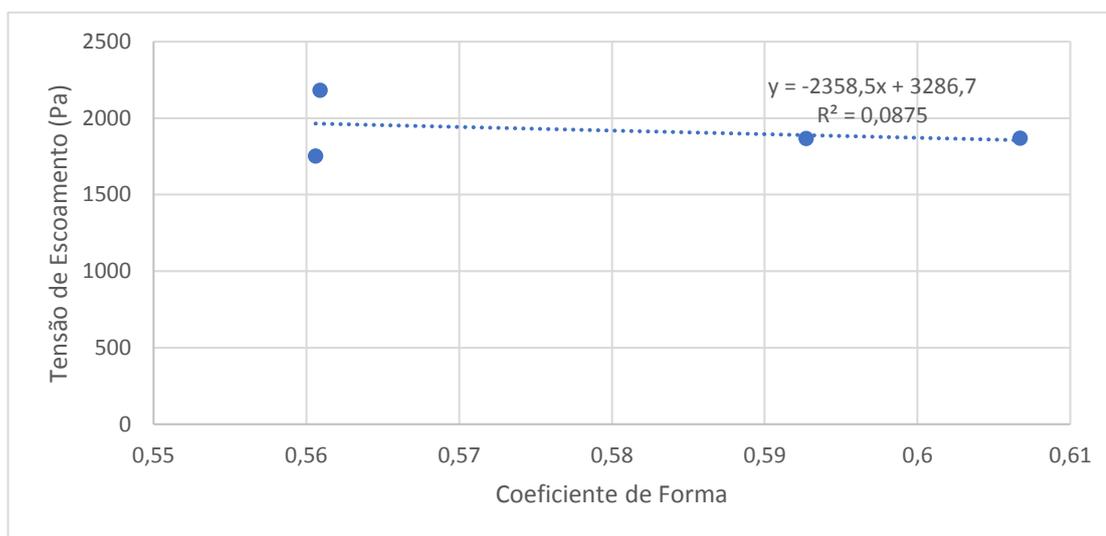
Figura 33 – Influência da Forma na Tensão de Escoamento – Abatimento 12cm



Fonte: Autores

Já a Figura 34, apresenta a influência da forma dos grãos na tensão de escoamento dos concretos produzidos tendo fixado o índice de abatimento em 16 centímetros, onde não influência direta deste parâmetro nas propriedades de tensão de escoamento destes concretos.

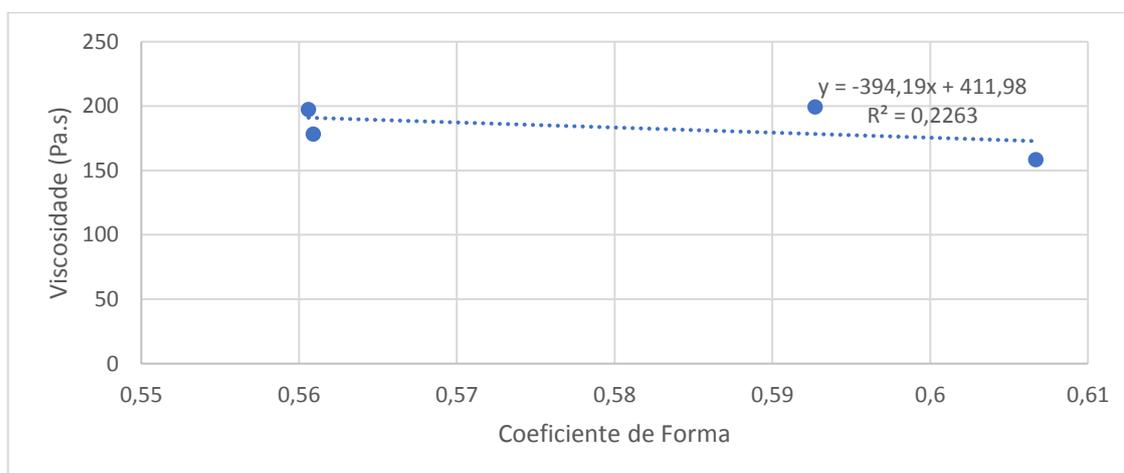
Figura 34 – Influência da Forma na Tensão de Escoamento – Abatimento 16cm



Fonte: Autores

Assim como foi realizado para a tensão de escoamento, tomou-se como parâmetro de análise a influência da forma dos grãos na viscosidade dos concretos produzidos em cada faixa de abatimento, onde a Figura 35 apresenta a influência da forma dos grãos na viscosidade dos concretos produzidos com índice de abatimento de 8 centímetros.

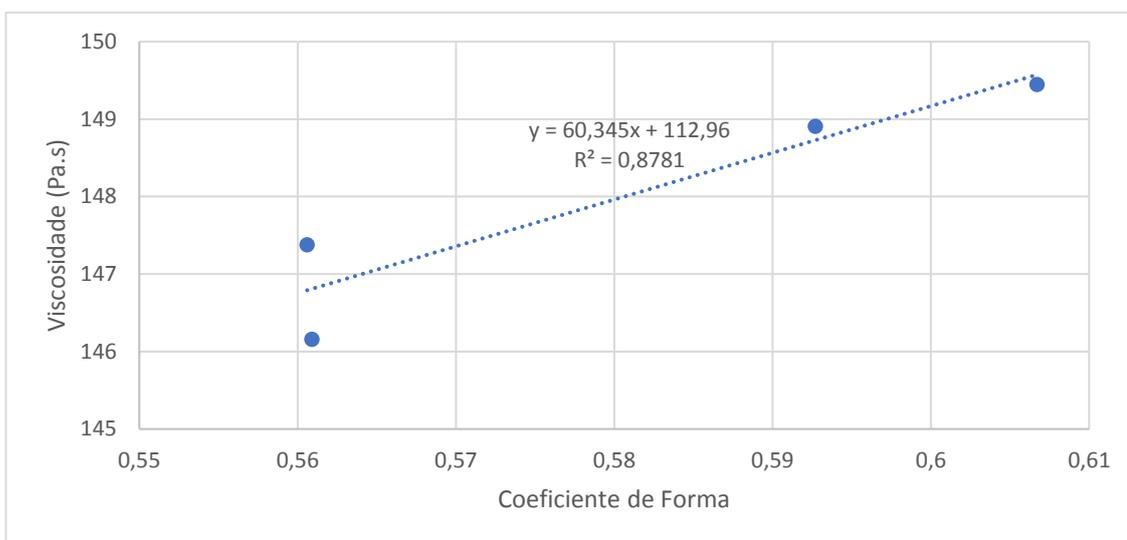
Figura 35 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 8cm



Fonte: Autores

A Figura 36 apresenta a influência da forma na viscosidade dos concretos produzidos com a fixação do índice de abatimento em 12 centímetros, onde quanto mais arredondados forem os agregados da areia em questão maior será a viscosidade dos concretos produzidos.

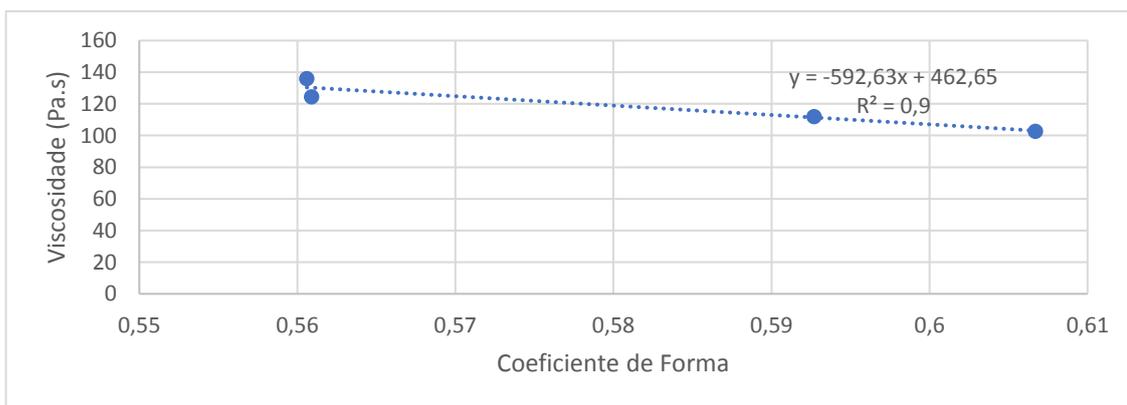
Figura 36 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 12cm



Fonte: Autores

Já a Figura 37 apresenta a inversão do que foi verificado na análise dos concretos de 12 centímetros de abatimento, onde quão mais arredondado for a forma do agregado analisado menor será a viscosidade do concreto produzido.

Figura 37 – Influência da Forma na Viscosidade – Abatimento 16cm



Fonte: Autores

### 5.3 PARÂMETROS REOLÓGICOS X ENSAIOS TECNOLÓGICOS

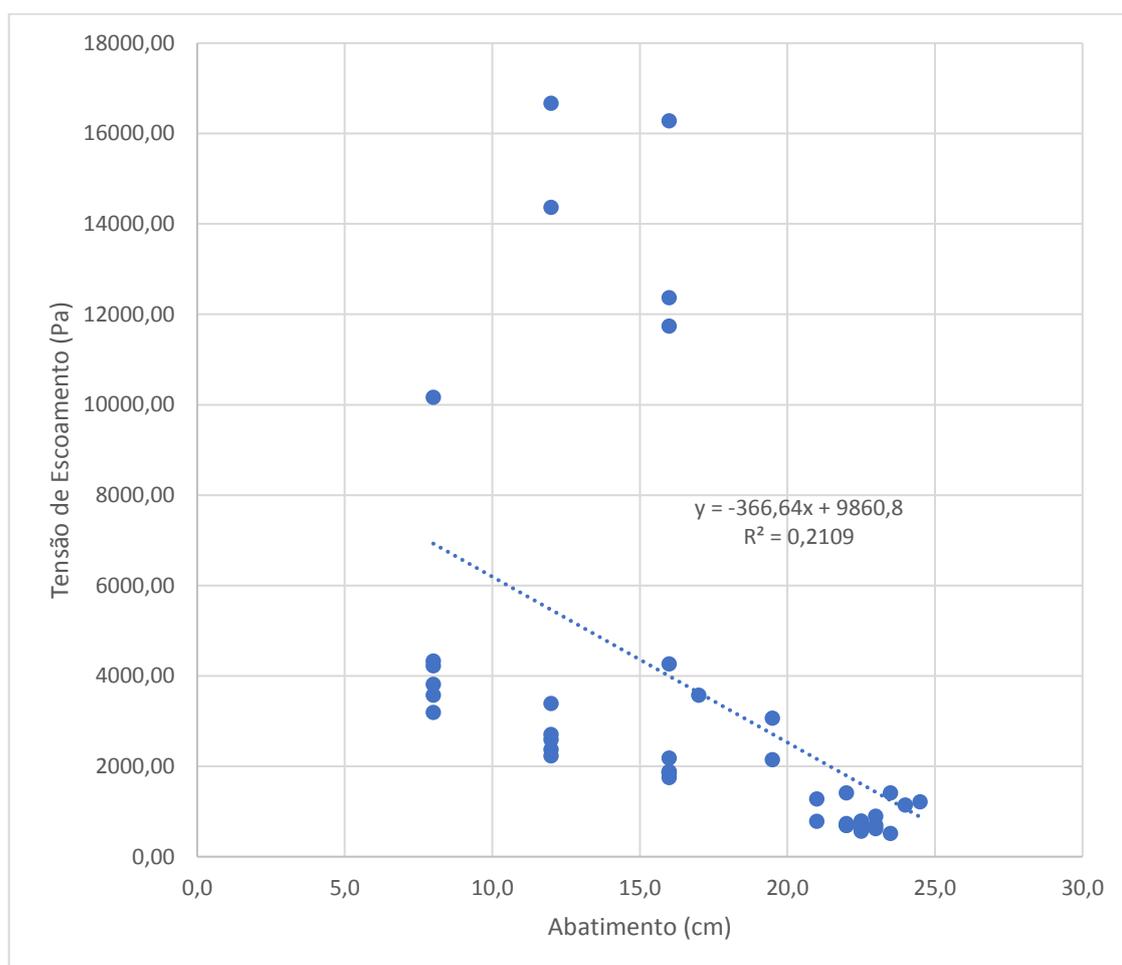
Levantado como uma problemática constante na literatura por autores como Secrieru et al. (2017), De Schutter *et al.* (2016), Ferraris *et al.* (2001) dentre

outros, a determinação da bombeabilidade ou não de concretos a partir de ensaios práticos executáveis em campo correlacionados a parâmetros determinados em laboratório é um importante ponto de estudo dentro da área de determinação de bombeabilidade ou não de concretos, assim os ensaios tecnológicos realizados no presente estudo serão objetos de análise nos tópicos 5.3.1 e 5.3.2 a seguir.

### 5.3.1 Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone

Com base nos resultados obtidos tanto nas duas campanhas experimentais realizadas em campo, apresentadas nos itens 4.2.1 e 4.2.2, quanto nos ensaios realizados em laboratório, apresentado em 4.3, foram condensados todos os resultados obtidos de índice de abatimento e tensão de escoamento na Figura 38, buscando assim a obtenção de uma tendência de comportamento reológico a partir da execução deste ensaio tecnológico.

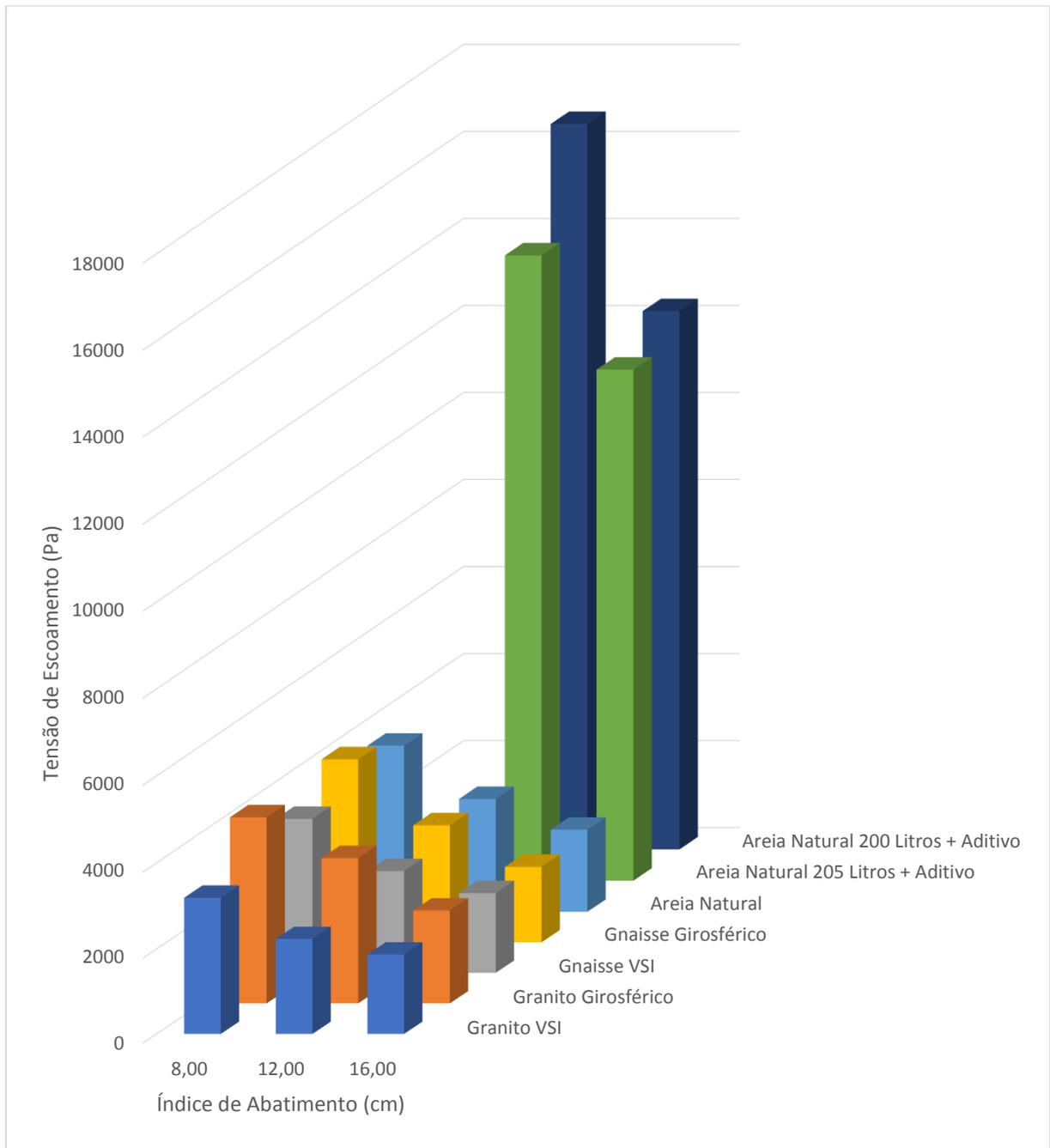
Figura 38 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento – Todos Ensaios



Fonte: Autores

Diante do apresentado é possível verificar que ao analisar em conjunto todos os concretos estudados não há uma tendência de comportamento geral. Entretanto ao analisar a Figura 39 é possível verificar que dentro de cada composição o índice de abatimento pode ser correlacionado a tensão de escoamento destes concretos.

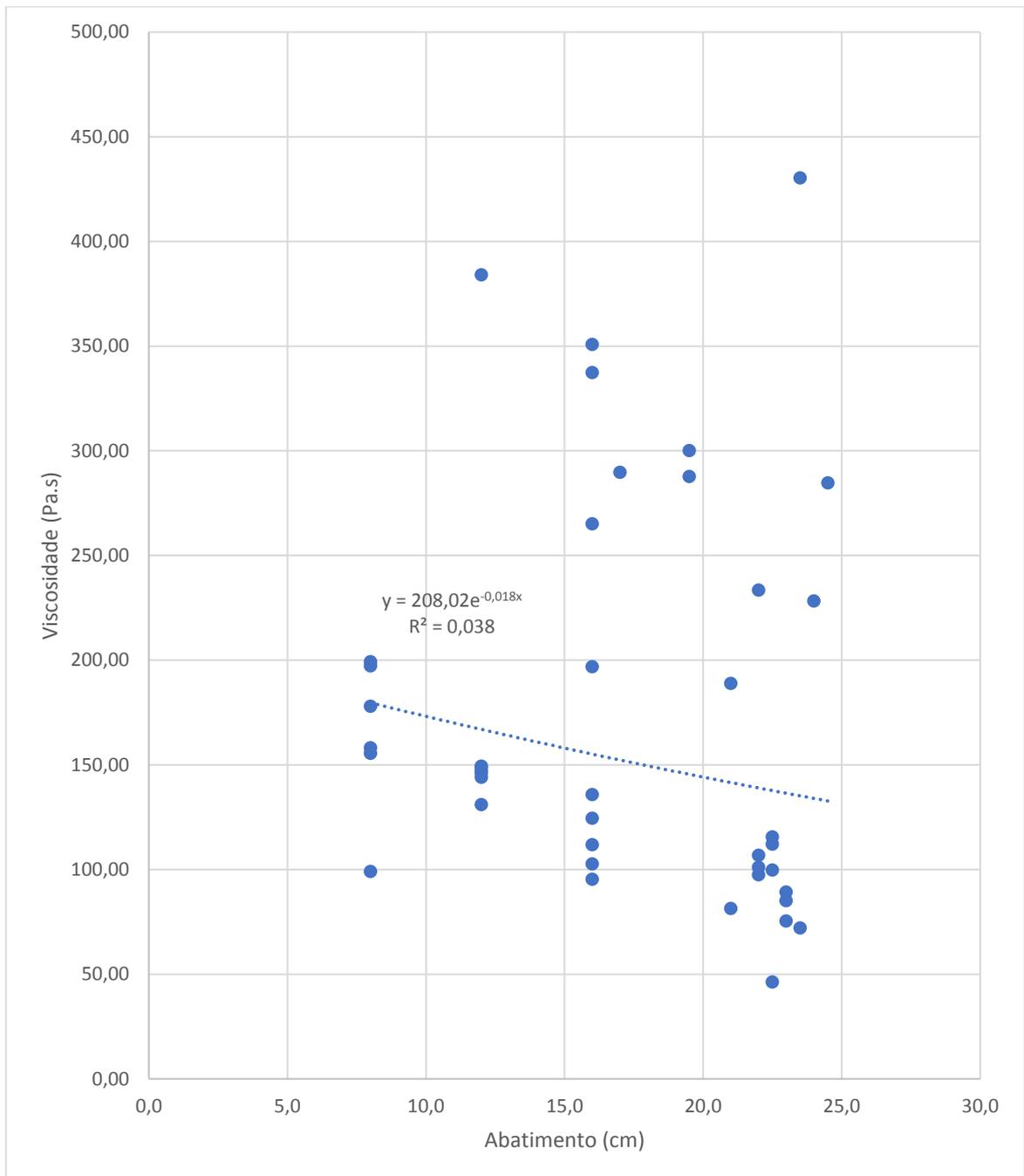
Figura 39 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento – Categorias Isoladas



Fonte: Autores

Assim como no caso da comparação entre índice de abatimento e tensão de escoamento realizada na Figura 38, tal comparação também foi realizada para verificar se o ensaio de abatimento de tronco de cone poderia ser correlacionado diretamente com a viscosidade do material, apresentando os resultados dos ensaios na Figura 40. Também se verificou que ao generalizar todos os ensaios não há uma relação direta entre índice de abatimento e viscosidade.

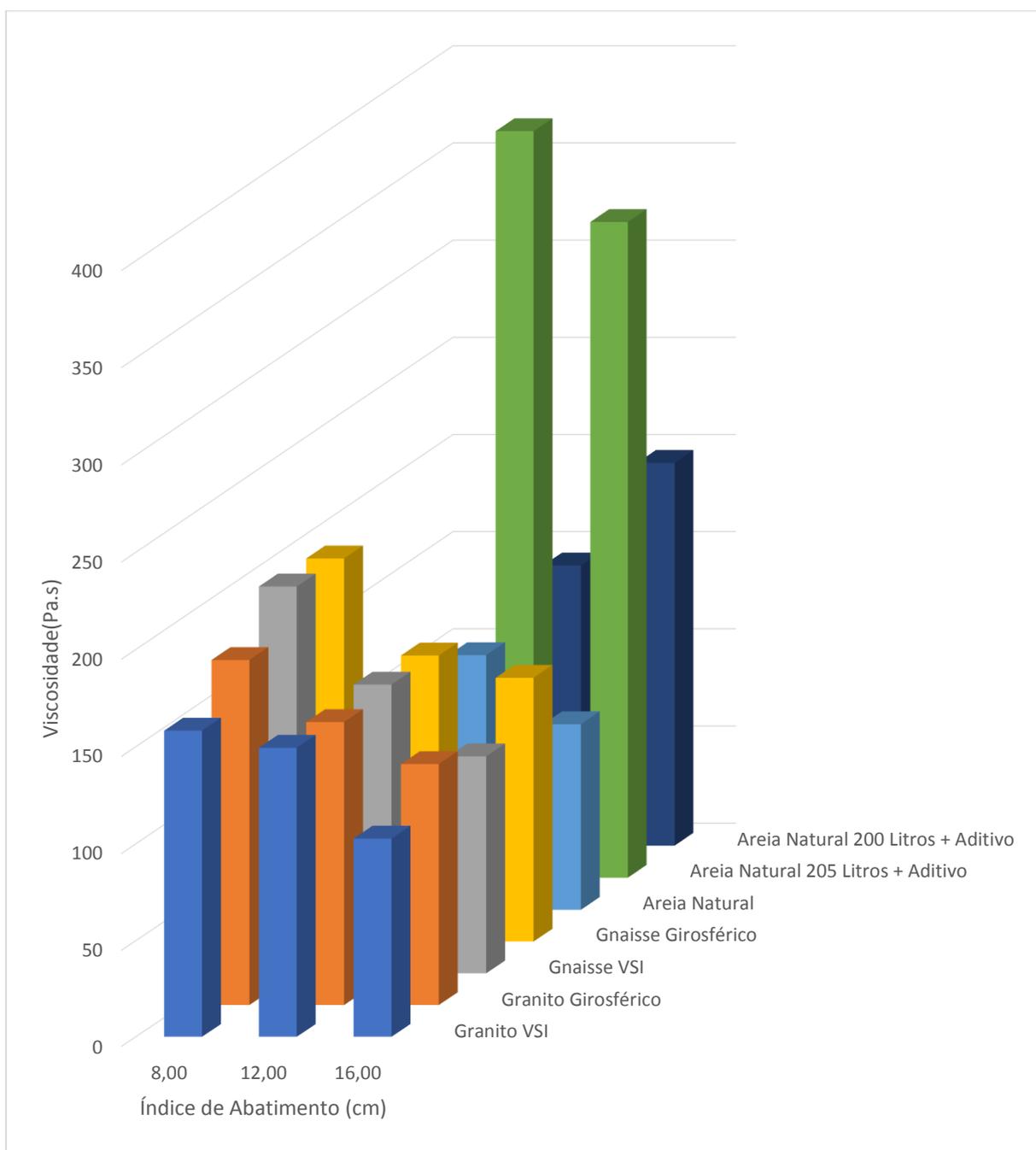
Figura 40 – Índice de Abatimento x Viscosidade - Todos Ensaios



Fonte: Autores

Como visualizado para a tensão de escoamento é possível verificar que ao analisar em conjunto todos os concretos estudados não há uma tendência de comportamento geral para a obtenção da viscosidade do material a partir do índice de abatimento. Entretanto ao analisar a Figura 41 é possível verificar que, na maioria dos casos, dentro de cada composição, o índice de abatimento pode ser correlacionado a viscosidade destes concretos.

Figura 41 – Índice de Abatimento x Viscosidade – Categorias Isoladas



Fonte: Autores

A inversão do valor encontrado para viscosidade nos concretos com consumo de água em 200 litros por metro cúbico e aditivo super plastificante pode estar relacionada ao fato de que, no momento do trabalho experimental, o teor de aditivo utilizado em cada mistura variou, e ao realizar o concreto de índice de abatimento de 12 centímetros, fora utilizado um teor maior de super plastificante do que o empregado no concreto com índice de 16 centímetros, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Concretos com Aditivo Super Plastificante – Viscosidade e Teor de Aditivo Utilizado

Mistura	Abatimento (cm)	Viscosidade (Pa.s)	Teor de Aditivo
Convencional	8,0	99,16	0,00%
	12,0	131,04	0,00%
	16,0	95,49	0,00%
205 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	8,0	155,63	0,30%
	12,0	384,14	0,90%
	16,0	337,38	0,60%
200 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	12,0	144,13	0,50%
	16,0	196,95	0,50%
190 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	16,0	265,15	1,00%

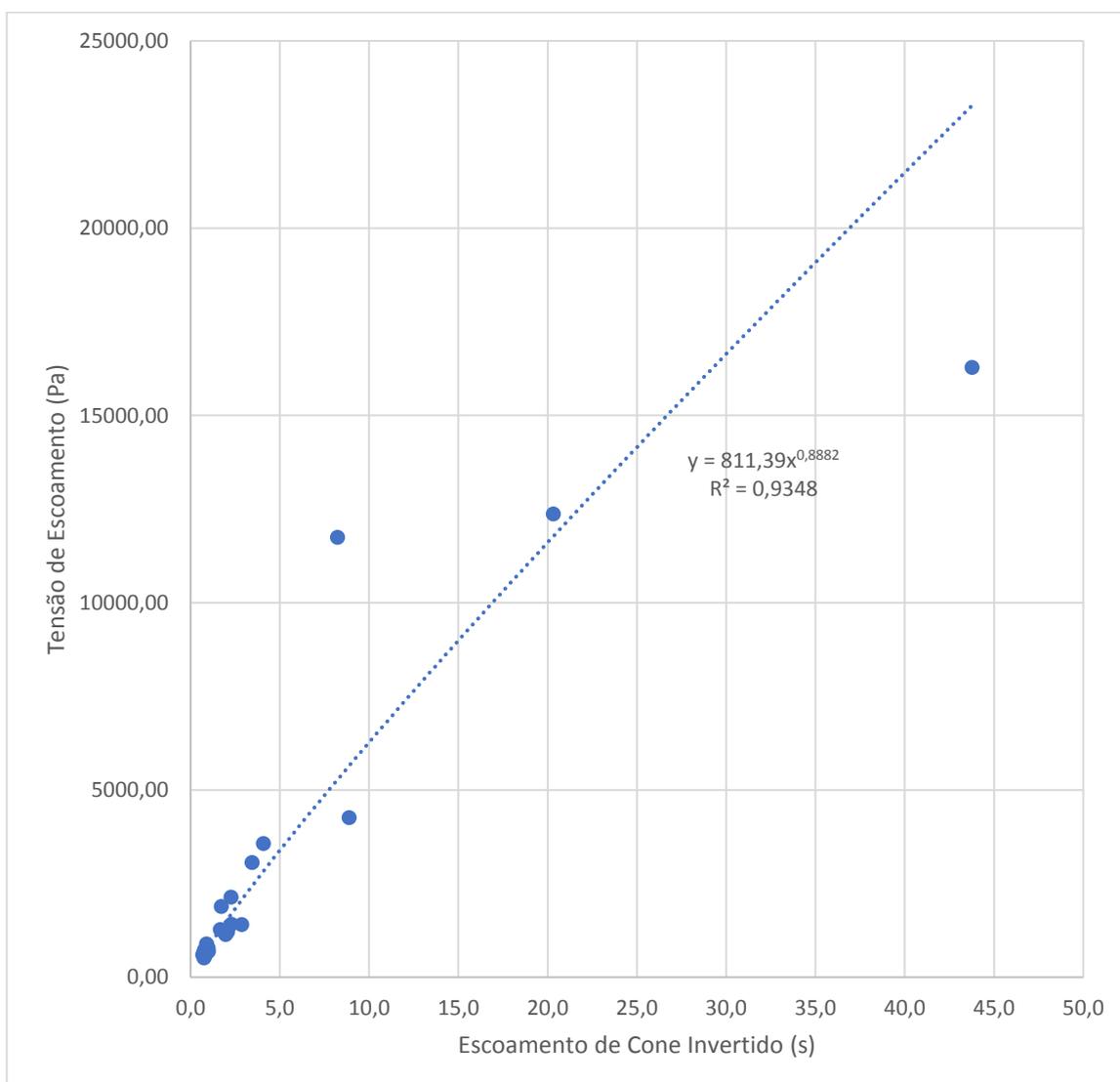
### 5.3.2 Ensaio de Escoamento de Tronco de Cone

Ainda buscando uma alternativa para a execução de ensaios em campo que possam ser utilizados para estimar o comportamento do concreto no sistema de bombeamento utilizou-se do aparato desenvolvido por Weidmann (2008), onde a partir de uma modificação de um tronco de cone normalmente utilizado para o ensaio de abatimento de cone de Abram's, Weidmann (2008) adicionou uma portinhola a menor abertura do tronco de cone, inverteu sua posição e fixou o tronco de cone em uma mesa. A execução do ensaio consiste no preenchimento deste aparato com concreto adensando-o em três camadas iguais e aplicando o mesmo número de golpes prescrito na norma brasileira NM 67 (Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone) em cada camada preenchida. Após realizado o

preenchimento do tronco de cone um cronometro é acionado assim que a portinhola é aberta, tomando este tempo de escoamento como um parâmetro de ensaio.

Diante disso, conforme explanado nos item 4.2 e 4.3, o ensaio foi executado em todos os concretos que escoassem pelo equipamento e não fossem autoadensáveis, tendo seus resultados destacados na Figura 42 e relacionados com a tensão de escoamento do material, apresentando uma boa correlação para toda a gama de ensaios realizados no presente trabalho, sejam eles executados em campo ou propriamente em laboratório.

Figura 42 – Escoamento de Cone Invertido x Tensão de Escoamento – Todos Ensaios

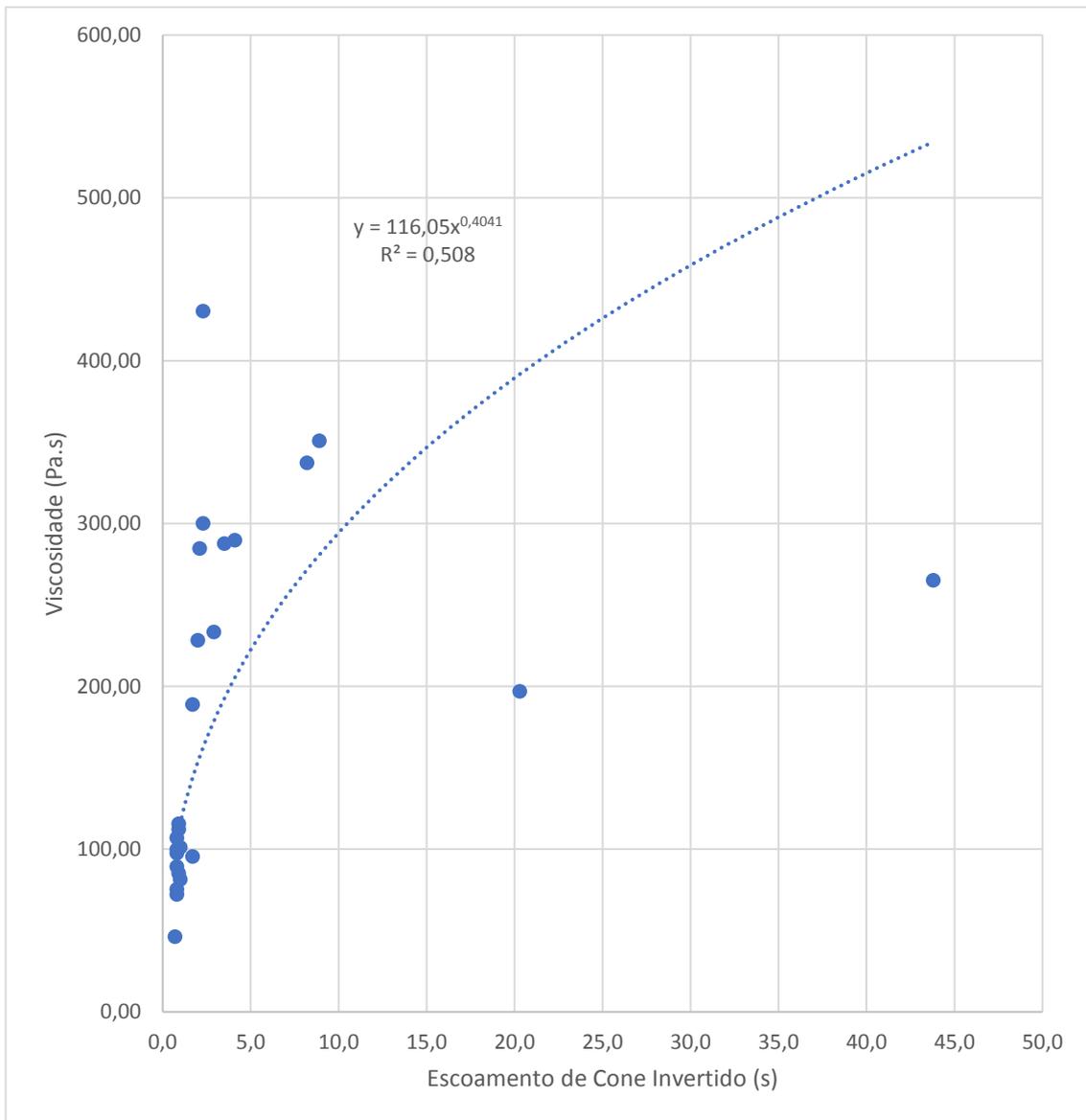


Fonte: Autores

Assim como realizado para a tensão de escoamento do material, na Figura 43 é apresentada a análise entre os mesmos resultados obtidos para o tempo de

escoamento do material, com a viscosidade encontrada a partir de ensaio de reometria rotaciona nestes concretos; não tendo sido obtido um bom coeficiente de correlação, ao comparar com a tendência encontrada através da análise realizada pela Figura 42.

Figura 43 – escoamento de Cone Invertido x Viscosidade – Todo Ensaio



Fonte: Autores

### 5.3.3 Ensaio de Escoamento em Funil-V

Executado nos concretos autoadensáveis encontrados no estudo realizado em campo, o ensaio de escoamento em Funil-V, normatizado por meio da NBR 15823 Parte 5 (Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do Funil V), foi utilizado nos concretos apresentados na Tabela 9.

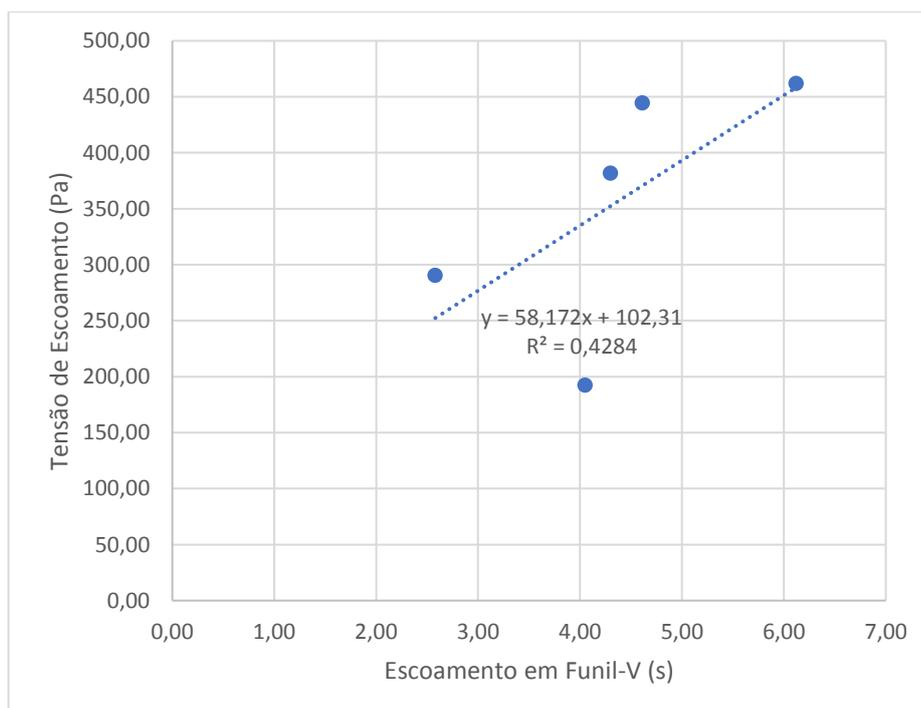
Tabela 9 – Concretos Autoadensáveis – Resultado Funil-V e Propriedades Reológicas

Nota Fiscal	Espalhamento (cm)	Escoamento Funil-V (s)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
34531	65,0	4,30	381,80	246,84
34532	70,5	4,05	192,46	165,37
34534	66,0	6,12	461,89	308,76
34536	63,0	4,61	444,72	228,46
34537	64,5	2,58	290,69	98,599

Apesar de poucas amostras de concretos autoadensáveis estudadas foram contempladas as classes de espalhamento SF 1 e 2, a classe de viscosidade plástica aparente VF 1 e classe de estabilidade visual IEV 0 e 1 (apenas no concreto de nota fiscal 34537), conforme NBR 15823-1 (Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco).

Diante disto, a Figura 44 apresenta análise da relação entre o tempo de escoamento no funil e a tensão de escoamento encontrada no ensaio de reometria rotacional realizado nestes concretos, apresentando um ponto amostral destoante ao compará-lo com os demais pontos de ensaio, sendo necessário um maior estudo no objeto de estudo para melhor avaliação do emprego deste ensaio como meio de estimativa de tensão de escoamento em campo.

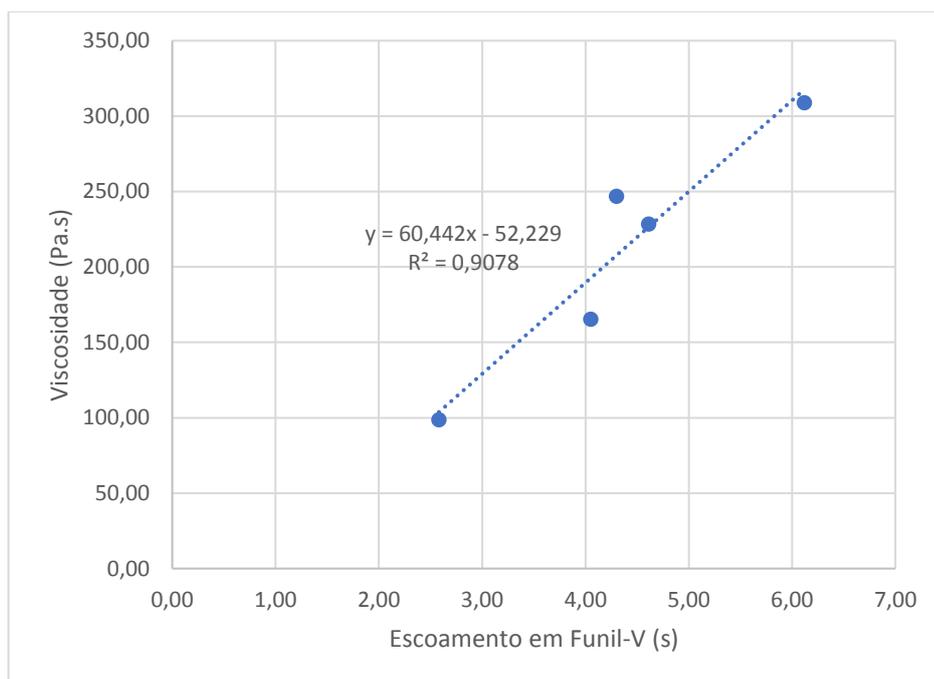
Figura 44 – Concretos Autoadensáveis – Escoamento em Funil-V x Tensão de Escoamento



Fonte: Autores

Entretanto ao comparar os valores obtidos no ensaio de escoamento em Funil-V com a viscosidade encontrada no ensaio de reometria rotacional, apresentados na Figura 45, encontrou-se um bom coeficiente de correlação, sendo um indicativo de uma relação onde quanto maior for o tempo de escoamento do material inserido no Funil-V mais viscoso este concreto o será.

Figura 45 – Concretos Autoadensáveis – Escoamento em Funil-V x Viscosidade



Fonte: Autores

## 6 CONCLUSÃO

Diante do estudo proposto foi possível a realização de uma série de conclusões que contribuem com os estudos relacionados ao comportamento de concretos bombeáveis, bem como possíveis modificações em sua composição que venham possibilitar seu bombeamento, ou mesmo potencializar seu uso.

Entre estas conclusões encontram-se as seguintes:

- Com base nos estudos realizados nas campanhas experimentais, apresentadas no item 5.1, foi possível concluir que a tensão de escoamento encontrada para os concretos analisados em campo teve relação direta a pressão de bombeamento encontrada para cada um destes concretos, onde cada campanha experimental obteve uma equação derivada de sua linha de tendência diferente, comprovando que a pressão de bombeamento não depende apenas do material bombeado, mas também a rede de bombeamento empregada;
- Enquanto a tensão de escoamento teve influência direta com a pressão de bombeamento do sistema, a viscosidade do material não apresentou a mesma tendência em ambas campanhas realizadas, não tendo uma proporcionalidade direta entre a viscosidade do concreto estudado e a pressão de bombeamento do sistema;
- Em laboratório foram executadas uma série de tentativas de modificação das propriedades reológicas dos concretos estudados buscando alternativas para viabilizar o bombeamento do concreto, conforme item 5.2, entre as quais se encontram o consumo de água, a influência da forma e a influência de aditivos nestes parâmetros;
- Ao estudar uma mesma composição de concreto apenas variando a quantidade de água para obtenção de vários índices de abatimento, foi possível concluir que o consumo de água em uma dosagem de concreto influencia positivamente na tensão de escoamento do material, onde quanto mais água é empregada na mistura menor será a tensão de escoamento e viscosidade do concreto. Ainda, ao aumentar o emprego de água enquanto resta coeso o concreto há

uma redução na pressão necessária ao bombeamento do concreto empregado no sistema;

- Na contramão do emprego da água no concreto, a utilização de aditivos super plastificantes na dosagem de concretos bombeáveis aumenta a tensão de escoamento do material, gerando um aumento na pressão de bombeamento. Entretanto devem ser levados em consideração que o emprego de super plastificantes otimiza a resistência dos concretos por diminuir a necessidade de água na mistura, devendo ser balanceado o seu emprego em conjunto com o emprego de água, encontrando um ponto comum entre a resistência característica desejada deste concreto com a tensão de escoamento desejada para seu emprego em uma rede de bombeamento;
- No caso da utilização de agregados de britagem na dosagem de um concreto bombeável, foi verificado que o arredondamento de sua forma devido ao emprego de diferentes tipos de britadores exerce influência nas propriedades reológicas do concreto. O arredondamento do grão diminui a tensão de escoamento do material em concretos com baixo índice de abatimento, sendo esta influência reduzida conforme é aumentado este índice;
- A influência da forma do grão também foi estudada em relação a viscosidade da mistura, onde a relação encontrada para o índice de abatimento é invertida, encontrando maior influência do arredondamento dos grãos na viscosidade das misturas com maior índice de abatimento;
- Ensaios tecnológicos como o escoamento de tronco de cone invertido, o escoamento de concretos autoadensáveis em funil-V, e o abatimento de tronco de cone, podem ser utilizados para estimar a tensão de escoamento do concreto em campo, desde que sejam realizados ensaios em laboratório para determinar curvas de correlação para cada composição de concreto empregada em campo;

- Dentro de uma mesma composição em um concreto dosado, o índice de abatimento obtido na mistura pode ser diretamente correlacionado a tensão de escoamento deste material. Quanto maior o seu índice menor será a tensão de escoamento do concreto. Entretanto não há uma correlação absoluta onde todo concreto dosado com mesmo índice de abatimento terá necessariamente um mesmo valor obtido para sua tensão de escoamento, sendo dependente de seus materiais constituintes;
- Apesar de não ser aplicável em todas as dosagens de concretos, o ensaio de escoamento de tronco de cone invertido, proposto por Weidmann (2008), pode ter o tempo de escoamento obtido nos ensaios diretamente relacionado a tensão de escoamento do concreto estudado;
- Assim como o ensaio proposto por Weidmann, (2008) o escoamento realizado em Funil-V pode ser utilizado para estimar os parâmetros reológicos de tensão de escoamento e de viscosidade dos concretos autoadensáveis, onde quanto maior for o tempo de escoamento dos concretos ensaiados maior será a viscosidade destes concretos.

## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação de influência de alterações na composição de concretos autoadensáveis nas propriedades de tensão de escoamento e viscosidade destes;
- Avaliação da influência de diferentes teores de pasta e de argamassa nas propriedades reológicas dos concretos;
- Avaliação do emprego de aditivos promotores de bombeabilidade nos parâmetros reológicos dos concretos;
- Verificar a influência de bombeamento realizado em múltiplos patamares nos concretos, verificando se há a possibilidade de desenvolvimento de composições próprias para propiciar o bombeamento de concreto em múltiplos patamares;
- Realizar a comparação entre a tensão de escoamento estimada com base em curvas de correlações realizadas em laboratório a partir do ensaio de abatimento realizado no ponto de aplicação e o ensaio de reometria rotacional realizado *in loco* verificando se há diferença entre estes e suas relações com a pressão de bombeamento;
- Encontrar maneira de verificar e visualizar o fenômeno de formação de camada de lubrificação, bem como sua influência nos parâmetros de bombeamento obtidos em campo;
- Encontrar maneira de linearizar a pressão de bombeamento com base no comprimento da rede de bombeamento;
- Encontrar forma de determinar o fluxo indicado ao bombeamento de diferentes dosagens de concreto, uma vez que, com o advento de concretos especiais a base de aditivos, os ábacos de determinação de parâmetros de bombeamento deixam de ser precisos.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 304.2R-96**: Placing Concrete by Pumping Methods. Detroit: American Concrete Institute, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5578**: Produtos tubulares de aço – Terminologia. Rio de Janeiro: Abnt, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833** – Versão Corrigida 2009: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: Abnt, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do Funil V. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Abnt, 1998.
- AZEVEDO NETTO, José M. de. **Manual de Hidráulica**. 9ªed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.
- BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3ªed. Belo Horizonte: Editora UFMG.2010.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Concreto madeira cerâmica metais plásticos asfalto**. 5ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC.2008.
- BETIOLI, Andrea Murillo. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 211 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- BROWNE, R.; BAMFORTH, P. **Tests to establish concrete pumpability**. ACI Journal, nº74. mai, 1977.
- CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão**. Cerâmica, n. 57, p. 63-75, 2011.
- CHALIMO, T.; TOULOUPOV, N.; MARKOVSKIY, M. **Особенности трубопроводного транспорта бетонных смесей бетононасосами**, “Particularidades no lançamento de concreto através do bombeamento. Editora “Стройкнига”, Minsk, 171p. 1989.
- CHAPDELAINÉ, Frédéric. **Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton**. 2007. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Quebec, 2007.

DAIBERT, João Dalton; MENDONÇA, Antonio Valter Rodrigues Marques de. **Equipamentos e Instalações para Construção Civil**. 1ªed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

DE SCHUTTER, G.; FEYS, D. **Pumping of fresh concrete: Insights and challenges**. RILEM Technical Letters, n 1, p. 76-80, 2016.

DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE. European Federation of Foundation Contractors. **EFFC/DFI Best Practice Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations**: Best Practice Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations. 2016. Disponível em: <[https://www.effc.org/content/uploads/2016/02/EFFC\\_Tremie\\_Concrete\\_Guide\\_Final.pdf](https://www.effc.org/content/uploads/2016/02/EFFC_Tremie_Concrete_Guide_Final.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2017.

FERRARIS, C.; DE LARRARD, F.; MARTYS, N. **Fresh concrete rheology: Recent developments**. Materials Science of Concrete VI, p. 215-241, 2001.

FEYS, D.; DE SCHUTTER, G.; VERHOEVEN, R. **Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh Self-Compacting Concrete**. Applied Rheology, v. 17 n. 5, p. 56244-1-10, jan. 2007.

FEYS, D.; KHAYAT, K. H.; KHATIB, R. **How do concrete rheology, tribology, and pipe radius influence pumping pressure?**. Cement and Concrete Composites, n. 66, p. 38-46, 2016.

FRANÇA, M. S.; PILEGGI, R. G. **Avaliação de sequências de mistura no preparo de argamassas com fibras de PVA**. Porto Alegre, XI SBTA, 2015.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Bombas de Concreto Dimensionamento**. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2016/08/bombas-de-concreto-3-dimensionamento.html>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

HICKEL, Guilherme Cardoso, BOAVENTURA, Giovane Carlos, SOUZA, Rafael Andrade de, CALÇADA, Luciana Maltez, CASALI, Juliana Machado, BETIOLLI, Andrea Murilo, OLIVEIRA, Alexandre Lima de. **Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2018 (a publicar).

HU, C. **Rhéologie des bétons fluides**. 1995. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, Paris, 1995.

JOLIN, M.; BURNS, D.; BISSONNETTE, B.; GAGNON, F.; BOLDUC, L. **Understanding the pumpability of concrete**. In: Shotcrete for Underground Support XI. Engineering Conferences International, 2009.

KAPLAN, Denis. **Pompagem dos bétons**. 2001. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, Paris, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis**. Florianópolis, 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001.

POPOV, Egor Paul. **Engineering Mechanics of Solids**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1998.

SAKANO, Victor Keniti. **Metodologia para aquisição de sinal elétrico e tratamento de dados em reômetros servo controlados**. 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SAKANO, V. K.; *et al.* **Aplicação do método squeeze flow sobre bloco cerâmico para comparação com a aplicação de argamassas em paredes**. Porto Alegre, XI SBTA, 2015.

SCHANKOSKI, R. A.; PILAR, R.; PILEGGI, R.; PRUDÊNCIO JR, L. R. **Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo fílers de britagem**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 02, p.1-16, fev. 2017.

SECRIERU, E.; FATAEI, S.; SCHROFL, C.; MECHTCHERINE, V. **Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology**. Construction and Building Materials, n. 144, p.451-461, 2017.

SILVA, D. SCHWING STETTER (org). **Apostila de Treinamento de Operadores**. Fabricação – Transporte – Bombeamento – Reciclagem. 2017.

WEIDMANN, Denis Fernandes. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento portland**. 2008. 295 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

## APÊNDICE A – PROPORCIONAMENTO REALIZADO

Visando a realização dos estudos em laboratório foram executadas as seguintes dosagens de concretos, apresentadas na Tabela A.

Tabela A – Proporção de Materiais na Dosagem dos Concretos

Identificação	Índice de Abatimento (cm)	Quantidade de Materias					Teor de Aditivo
		Cimento	Areia Fina	Areia Média	Brita Zero	Água	
Concreto Convencional Areia Natural	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,66	0,00%
	12,00					0,69	
	16,00					0,73	
190 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	16,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,55	1,00%
200 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,58	0,50%
	12,00					0,58	0,50%
	16,00					0,58	0,50%
205 Litros de Água e Aditivo Super Plastificante	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,59	0,30%
	12,00					0,59	0,90%
	16,00					0,59	0,60%
<b>Avaliação de Forma   Troca de Areia Média por Areia de Britagem</b>							
Granito VSI	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,55	0,00%
	12,00					0,59	
	16,00					0,63	
Granito Girosférico	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,56	0,00%
	12,00					0,60	
	16,00					0,64	
Gnaisse VSI	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,54	0,00%
	12,00					0,58	
	16,00					0,63	
Gnaisse Girosférico	8,00	1,00	0,99	1,49	2,52	0,56	0,00%
	12,00					0,60	
	16,00					0,64	

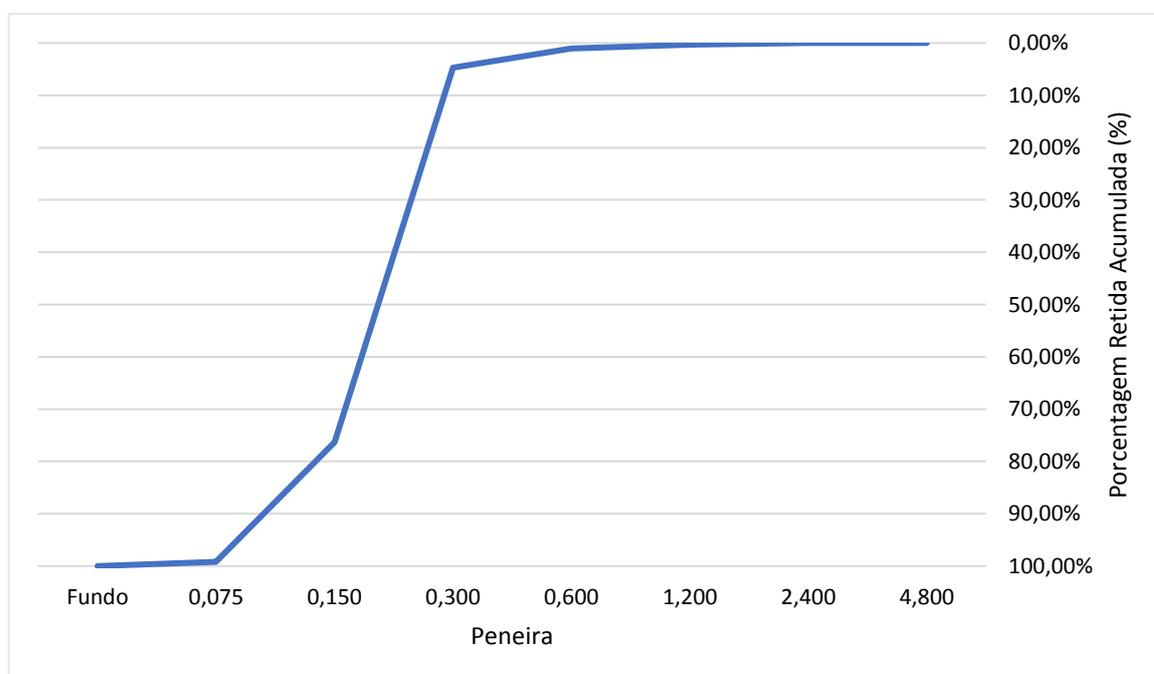
## APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS

Os agregados utilizados no presente trabalho apresentaram as seguintes propriedades dispostas na Tabela B, e suas curvas granulométricas apresentadas nas Figuras A, B, C, D, E, F e G a seguir.

Tabela B – Propriedades dos Agregados Utilizados

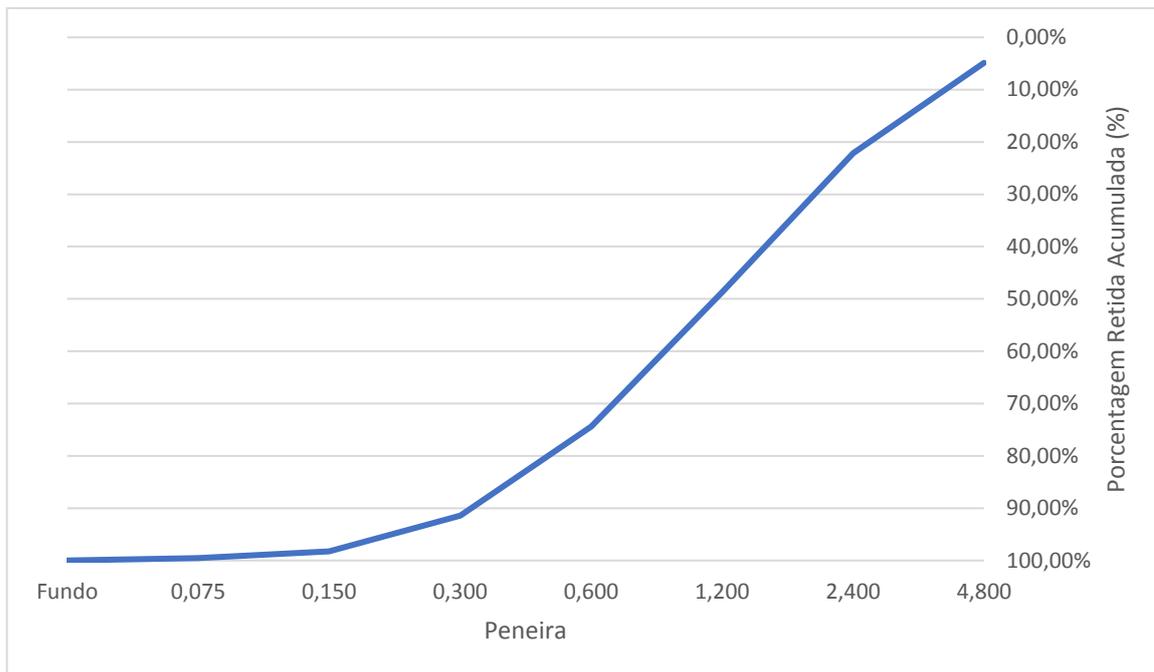
Propriedade	Material						
	Areia Fina	Areia Média	Areia Granito VSI	Areia Granito Girosférico	Areia Gnaisse VSI	Areia Gnaisse Girosférico	Brita Zero
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,68	2,68	2,70	2,74	2,74	2,71
Módulo de Finura	0,82	3,40	2,56	2,62	2,75	2,72	5,45
Coefficiente de Forma Ponderado	0,6425	0,6245	0,6027	0,5609	0,5927	0,5606	Não Realizado

Figura A – Curva Granulométrica Areia Fina



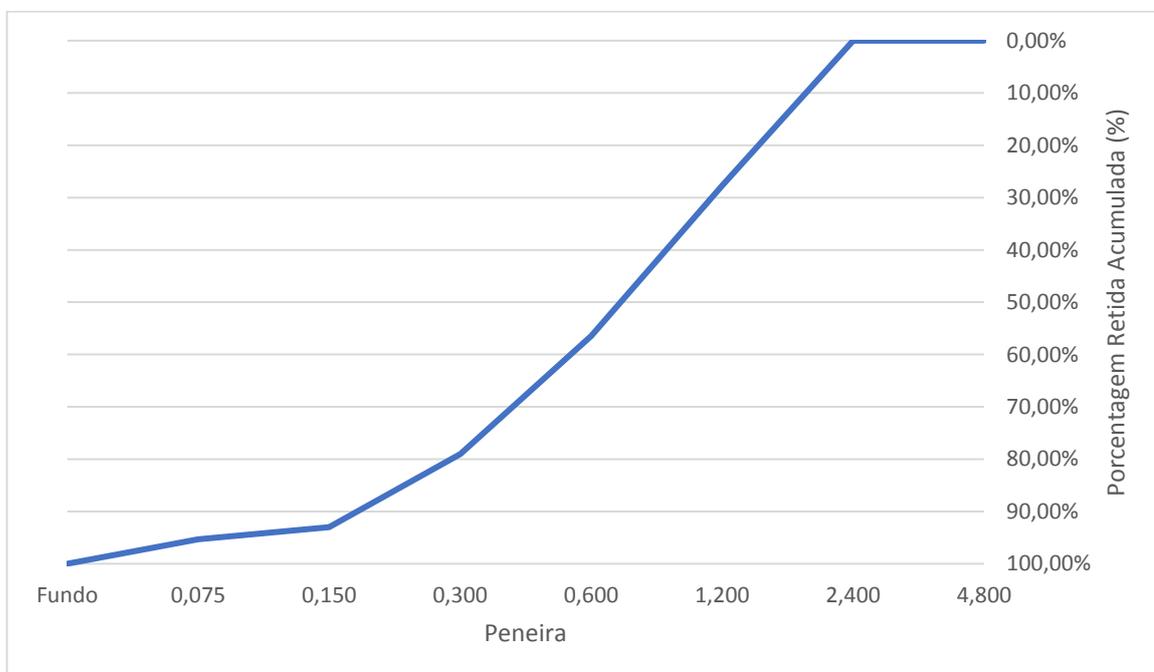
Fonte: Autores

Figura B – Curva Granulométrica Areia Média



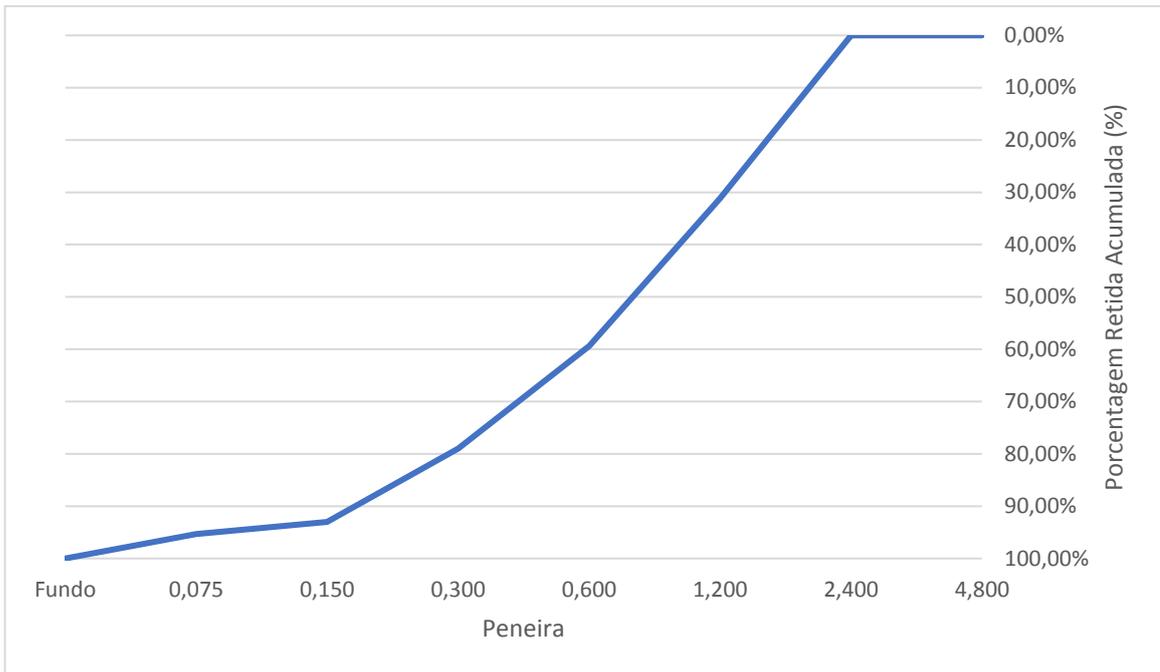
Fonte: Autores

Figura C – Curva Granulométrica Areia Granito VSI



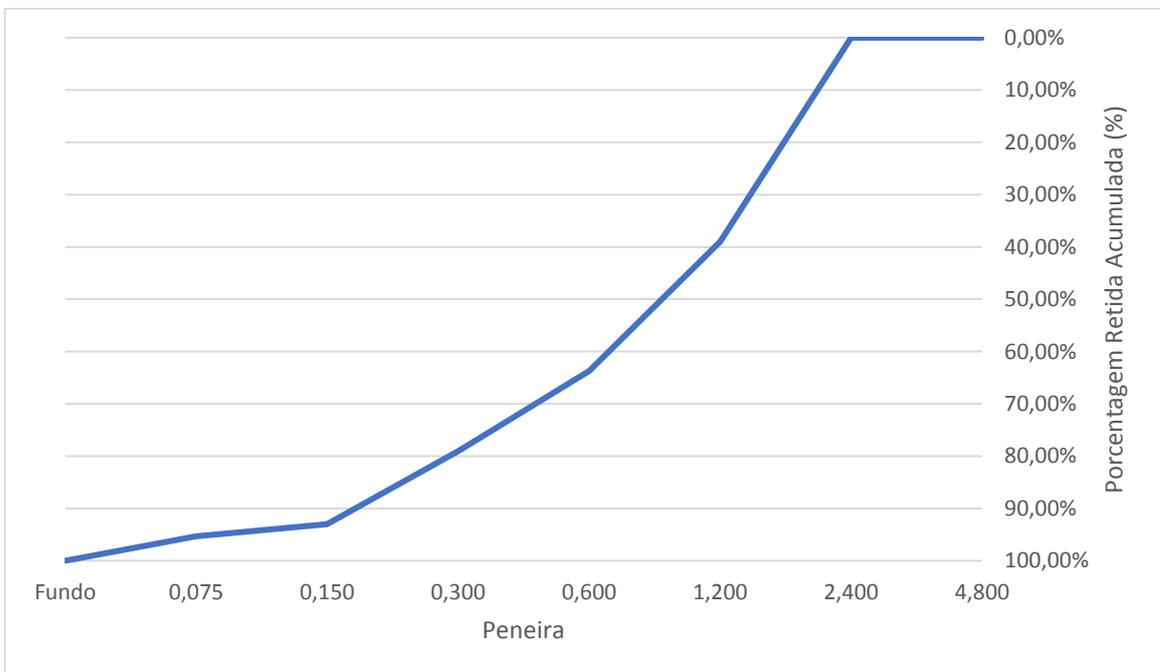
Fonte: Autores

Figura D – Curva Granulométrica Areia Granito Girosférico



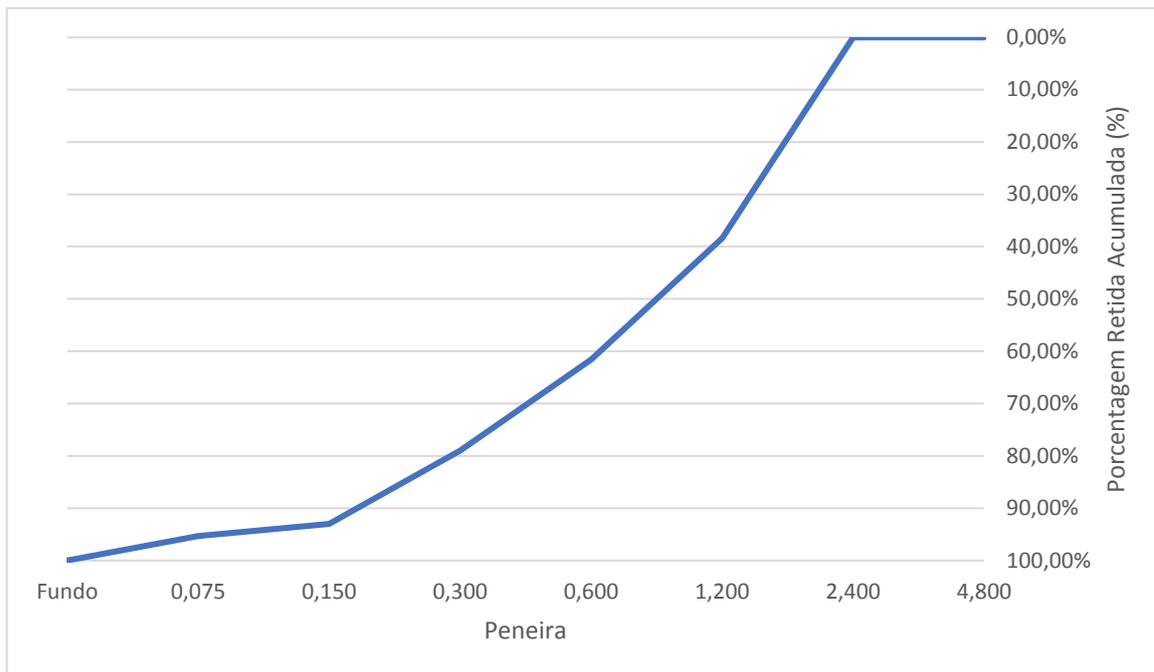
Fonte: Autores

Figura E – Curva Granulométrica Areia Gnaiss VSI



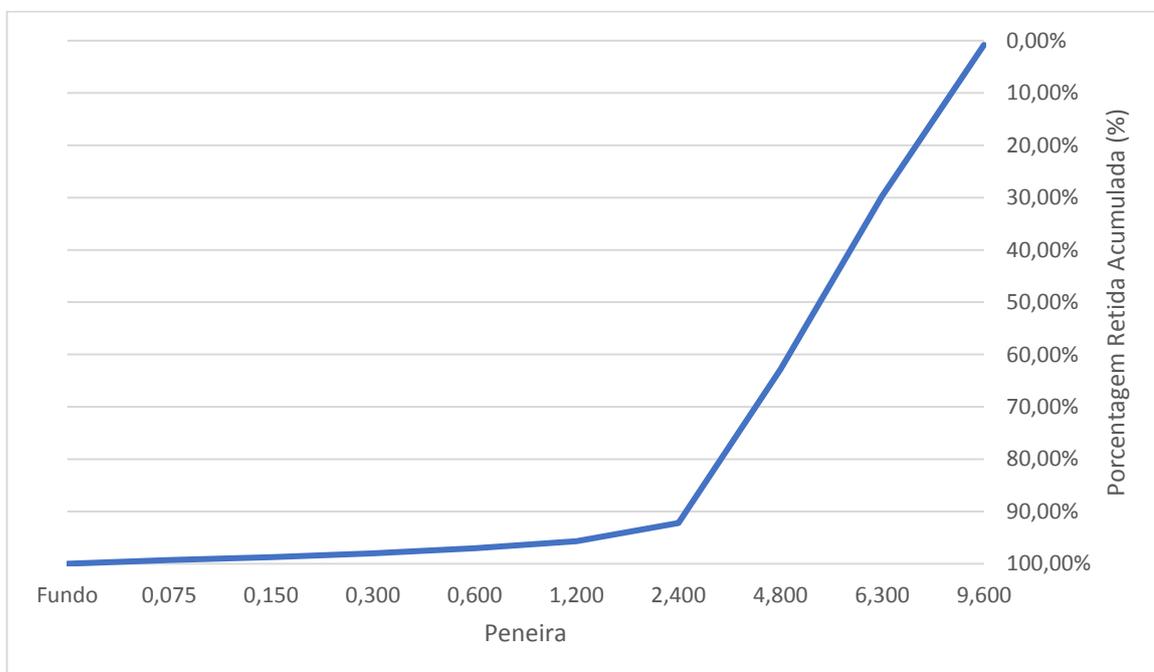
Fonte: Autores

Figura F – Curva Granulométrica Areia Gnaisse Girosférico



Fonte: Autores

Figura G – Curva Granulométrica Brita Zero



Fonte: Autores