



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Cardoso Hickel

Concreto Bombeável: Parâmetros reológicos e influência na performance de bombeamento

Florianópolis
2022

Guilherme Cardoso Hickel

Concreto Bombeável: Parâmetros reológicos e influência na performance de bombeamento

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
Orientador: Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Coorientador: Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hickel, Guilherme Cardoso

Concreto Bombeável: Parâmetros de influência na
performance de bombeamento / Guilherme Cardoso Hickel ;
orientador, Fernando Pelisser, coorientador, Alexandre
Lima de Oliveira, 2022.

150 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. concreto bombeável. 3. sistema
de bombeamento. 4. reologia. 5. desempenho de bombeamento.
I. Pelisser, Fernando. II. Oliveira, Alexandre Lima de.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Guilherme Cardoso Hickel

Concreto Bombeável: Parâmetros reológicos e influência na performance de bombeamento

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 13 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina
Coorientador

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Katia Rosana Cardoso e Rogério Hickel por me proporcionarem a oportunidade de em função de seu trabalho e dedicação comigo e com meu irmão, preocupar-me apenas com minha capacitação profissional sem que em nenhum momento exigissem nada em troca. Permitindo que eu ao estar desgostoso com outra linha profissional que estava seguindo largasse tudo e seguisse meu sonho de tornar-me engenheiro civil e pudesse continuar a trilhar tal caminho educacional seguindo até o presente momento de apresentação da presente dissertação de mestrado. Em função de seu esforço e dedicação hoje me encontro realizado e bem-posicionado no mercado exercendo atividades que amo na área de materiais de construção civil.

Agradeço meu irmão Fernando Seara Hickel pelo mesmo incentivo e estímulo dado, sendo um modelo de homem e profissional íntegro a ser seguido, bem como o apoio de minha cunhada Carolina e sobrinhas Isadora e Valentina.

Agradeço a minha namorada Vera Lúcia Correia pelo amor, apoio irrestrito e compreensão como por muitas vezes não pude fazer-me mais presente em razão dos compromissos acadêmicos e profissionais durante estes últimos anos de finalização da dissertação e posicionamento profissional.

Agradeço a toda minha família Cardoso e Hickel por serem parte essencial na minha formação, minhas tias Lúcia, Patrícia, Beatriz, Ronilda e Rosilda, meus primos André, Davi, Heitor, Dina e Ruth e a meus padrinhos Valério e Gilberto.

Um agradecimento em especial a minha tia Roná Hickel de Carvalho, que apesar de ter nos deixado no ano de 2020, foi a principal incentivadora em muitas de nossas conversas pelo caminho que hoje sigo feliz e sempre lembrando da senhora, faz falta.

Agradeço ao meu tio Cel. Milton Luiz Lemes do Prado, outro que no mesmo ano de 2020 se foi, meu grande amigo e conselheiro, me ensinando que a vida é feita para ser aproveitada, que não devemos nos abalar com as pancadas que ela nos dá, devemos continuar sorrindo e seguindo em frente.

Agradeço aos professores e técnicos do Instituto Federal de Santa Catarina por serem parte fundamental em minha formação enquanto Bacharel em Engenharia Civil, em especial Luciana Calçada e Rafael de Souza, bem como aos professores do Departamento de Construção Civil e Mecânica por serem parte em minha formação na Pós-graduação.

Agradeço ao meu orientador Fernando Pelisser, por ter acreditado no trabalho proposto e pela paciência e crença em minha pessoa, obrigado pelo apoio por todo esse tempo.

Agradeço ao meu coorientador, Alexandre Lima de Oliveira, do Instituto Federal de Santa Catarina, grande motivador e modelo a ser seguido, a verdadeira razão por ter seguido na área de materiais de construção civil e hoje estar realizado atuando na área que me ensinou a amar, és um monstro.

Agradeço a membra da banca Professora Janaíde, pelos ensinamentos e conversas ao longo do programa de pós-graduação, muito obrigado professora.

Agradeço ao professor Prudêncio, por proporcionar o desenvolvimento do presente trabalho, abrindo portas em muitas concreteiras e construtoras, onde fez-se possível o desenvolvimento do presente estudo, apesar de não ter tido aula com o senhor, aprendi muito do que sei com o senhor e quero continuar a aprendendo, muito obrigado.

Agradeço aos amigos de Colégio Catarinense Augusto, Luiz, Jamil, Rafael e Juliano, aos amigos de Instituto Federal Thiago, Geraldo, Bruno, Lucas, Ramon, Tiago e Gustavo e aos colegas de Azul Jovany e Raylson.

Agradeço aos profissionais da Azul Argamassas e Concretos, Marcos Roberto Rohde de Souza e Rodrigo Baltazar por abrirem as portas para mim em 2018 para a realização de estágio e que tornaram a abri-las para a realização do sonho que realizo hoje após o término de minha bolsa.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por possibilitar o andamento e desenvolvimento da pesquisa, por meio de bolsa de estudo.

RESUMO

O modelo de lançamento de concretos por meio de bombeamento é uma técnica utilizada há mais de 70 anos ao redor do mundo, sendo muito representativa em vários países incluindo o Brasil. A determinação prévia da bombeabilidade de concretos, entretanto não é tão difundida quanto a utilização da técnica, sendo normalmente determinada por tentativa e erro, ou por premissas de que quanto mais longa a rede de bombeamento maior deve ser o índice de abatimento do concreto. Esse trabalho visa contribuir com a redução da empiricidade do processo de bombeamento através do estudo de alterações no sistema de bombeamento e do concreto que impactam no processo de bombeamento. A primeira premissa para o entendimento do tema é de que a bombeabilidade não é uma característica intrínseca do concreto, mas sim definida pelo conjunto concreto/sistema de bombeamento. Assim, foram estudadas três campanhas experimentais independentes onde a partir da caracterização dos concretos, da rede de bombeamento e da determinação do desempenho de bombeamento foram apontados fatores de influência no desempenho de bombeamento do concreto. Determinou-se que os parâmetros reológicos dos concretos de tensão de escoamento e viscosidade são fatores determinantes no desempenho de bombeamento, tornando estes concretos mais ou menos propícios a serem submetidos ao bombeamento. Para determinar a influência da rede de bombeamento, das três campanhas realizadas, duas utilizaram-se de duas configurações de rede idênticas, e em análise global, demonstrou-se que a rede de bombeamento influi na demanda de pressão no sistema. Da determinação de que a rede influencia na demanda de pressão, realizou-se análise normalizada para determinar o grau de influência dos parâmetros reológicos, determinando que a propriedade de tensão de escoamento é o principal parâmetro de influência no desempenho de bombeamento, mas que o parâmetro de viscosidade exerce influência nesta demanda. Considerando que a rede de bombeamento é fixa em uma dada necessidade de bombeamento, e de que o concreto pode variar em função do processo de carregamento nas centrais de produção, foi estudada a influência desta variação de carregamento nas propriedades reológicas dos concretos. Constatou-se que variações de carregamento geram influência nas propriedades reológicas dos concretos e que consecutivamente influem na demanda de pressão ao sistema. Cuidados relativos ao processo de carregamento podem/devem ser adotados em função da necessidade de limitar alterações de demanda de pressão solicitadas pela configuração de bombeamento.

Palavras-chave: Concreto bombeável; sistema de bombeamento; reologia; desempenho de bombeamento; variações de carregamento.

ABSTRACT

Pouring concrete by using the pumping model is a technique used for over 70 years around the world and is very representative in several countries nowadays, including Brazil. The prior determination of the pumpability of concrete, however, is not as widespread as the use of the technique, which is normally determined by trial and error, or by assumptions that the longer the pumping network, a greater slump index will be needed from the applied concrete. This work aims to contribute to the reduction of the empiricism of the pumping process through the study of changes in the pumping system and in the concrete that impact the pumping process. The first premise for understanding the theme is that pumpability is not an intrinsic characteristic of concrete but defined by the set concrete/pumping system. Thus, three independent experimental campaigns were studied where, from the characterization of the concretes, the pumping network, and the determination of the pumping performance, factors influencing the pumping performance of the concrete were identified. It was determined that the rheological parameters of yield stress and viscosity from concretes are determining factors in pumping performance, making these concretes more suitable to be subjected to pumping or not. To determine the influence of the pumping network, of the three conducted campaigns, two used identical network configurations, and in a global analysis, it was shown that the pumping network influences the pressure demand in the system. From the determination that the network influences the pressure demand, a normalized analysis was performed to determine the degree of influence of the rheological parameters, determining that the yield stress property is the main parameter of influence on the pumping performance of concrete, but that the parameter of viscosity influences this demand in a minor degree. Considering that the pumping network is fixed in a given necessity and that the concrete can vary depending on the loading process in the production plants, the influence of this loading variation on the rheological properties of concrete was studied. It was found that loading variations generate influence on the rheological properties of concrete and that they consecutively influence the pressure demand of the system. Care related to the concrete loading process can/must be adopted due to the need to limit changes in pressure-demand requested by the pumping configuration.

Keywords: Pumpable concrete; pumping system; rheology; pumping performance; loading variations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do estudo	25
Figura 2 – Emprego cimento ensacado no Brasil	27
Figura 3 – Usina Central de Concreto S/A	29
Figura 4 – Abatimento de tronco de cone de Abrams	30
Figura 5 – Determinação de parâmetros de bombeamento	32
Figura 6 – Representação do fluxo do concreto bombeado.....	33
Figura 7 – Fluxo de pistão	34
Figura 8 – Influência das propriedades reológicas do concreto e da interface na perda de pressão no processo de bombeamento – tensão de escoamento a) concreto autoadensável, b) concreto convencional, viscosidade da interface c) concreto autoadensável, d) concreto convencional; e) viscosidade do concreto autoadensável	37
Figura 9 – Ensaio de Best e Lane	39
Figura 10 – Ensaio de Morinaga	40
Figura 11 – Equipamento desenvolvido por Kaplan	41
Figura 12 – Reômetro de tubo deslizante - Sliper	41
Figura 13 – a) Válvula “Rock” b) pistões	43
Figura 14 – Funcionamento bomba de sistema a pistão	44
Figura 15 – Bomba tipo estacionária.....	45
Figura 16 – Bomba tipo lança.....	45
Figura 17 – Ábaco para determinação de pressão	47
Figura 18 – Esquematização ações e reações no fluxo do concreto	49
Figura 19 – Validação do modelo de Kaplan, De Larrard e Sedran (2005).....	51
Figura 20 – Aplicação do modelo preditivo de Khatib (2013).....	53
Figura 21 – Processos de análise fatores de risco.....	54
Figura 22 – Processo de determinação de impacto de variações de carregamento	55
Figura 23 – Reômetro Pheso	58
Figura 24 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast.....	63
Figura 25 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Infinity Coast.....	64
Figura 26 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Infinity Coast.....	65
Figura 27 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast	66
Figura 28 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast	67

Figura 29 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Royal Tower.....	69
Figura 30 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Royal Tower.....	70
Figura 31 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Royal Tower.....	71
Figura 32 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Royal Tower	72
Figura 33 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Royal Tower	73
Figura 34 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz	75
Figura 35 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Ponte Hercílio Luz	76
Figura 36 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Ponte Hercílio Luz	76
Figura 37 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz.....	78
Figura 38 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz.....	78
Figura 39 – Tensão de Escoamento x Viscosidade – Análise Global	80
Figura 40 – Tensão de Escoamento x Viscosidade – Menores Valores Tensão de Escoamento	81
Figura 41 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento	82
Figura 42 – Índice de Abatimento x Viscosidade	83
Figura 43 – Medida de Espalhamento x Tensão de Escoamento	84
Figura 44 – Medida de Espalhamento x Viscosidade.....	85
Figura 45 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Análise Global.....	87
Figura 46 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Sem CAA	88
Figura 47 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas Infinity Coast e Royal Tower	89
Figura 48 - Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas	90
Figura 49 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas Royal Tower e Ponte Hercílio Luz.....	91
Figura 50 – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento Normalizada.....	94
Figura 51 – Viscosidade x Pressão de Bombeamento Normalizada	95
Figura 52 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento Normalizada	96
Figura 53 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento Normalizada	97
Figura 54 – Tensão de Escoamento x Pressão Normalizada – Análise em dois grupos	100
Figura 55 – Viscosidade x Pressão Normalizada – Análise em dois grupos.....	101
Figura 56 – Tensão de Escoamento x Pressão Normalizada – Análise em quatro grupos.....	104
Figura 57 – Viscosidade x Pressão Normalizada – Análise em quatro grupos.....	105
Figura 58 – Consumo de Cimento x Propriedades Reológicas	109

Figura 59 – Consumo de Sílica Ativa x Propriedades Reológicas	110
Figura 60 – Consumo de Areia de Britagem x Propriedades Reológicas	111
Figura 61 – Consumo de Areia Natural x Propriedades Reológicas	112
Figura 62 – Consumo de Brita 0 x Propriedades Reológicas	113
Figura 63 – Consumo de Brita 1 x Propriedades Reológicas	114
Figura 64 – Consumo de Aditivo Superplastificante x Propriedades Reológicas	115
Figura 65 – Consumo de Aditivo Plastificante x Propriedades Reológicas	116
Figura 66 – Consumo de Água x Propriedades Reológicas	117
Figura 67 – Massa Específica Concreto x Propriedades Reológicas.....	121
Figura 68 – Teor de Ar Incorporado x Propriedades Reológicas	122
Figura 69 – Volume de Cimento x Propriedades Reológicas.....	124
Figura 70 – Volume de Sílica Ativa x Propriedades Reológicas	125
Figura 71 – Volume de Areia de Britagem x Propriedades Reológicas.....	126
Figura 72 – Volume de Areia Natural x Propriedades Reológicas.....	127
Figura 73 – Volume de Brita 0 x Propriedades Reológicas	128
Figura 74 – Volume de Brita 1 x Propriedades Reológicas	129
Figura 75 – Volume de Superplastificante x Propriedades Reológicas.....	130
Figura 76 – Volume de Plastificante x Propriedades Reológicas.....	131
Figura 77 – Volume de Água x Propriedades Reológicas.....	132
Figura 78 – Consumo de Aglomerantes x Propriedades Reológicas.....	136
Figura 79 – Consumo de Agregados Miúdos x Propriedades Reológicas	137
Figura 80 – Consumo de Agregados Graúdos x Propriedades Reológicas	138
Figura 81 – Percentual Areia Natural x Propriedades Reológicas	140
Figura 82 – Percentual Brita 0 x Propriedades Reológicas	141
Figura 83 – Teor de Argamassa x Propriedades Reológicas.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporcionamento Materiais Infinity Coast	61
Tabela 2 – Resultados Campanha Experimental Infinity Coast	63
Tabela 3 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Infinity Coast	65
Tabela 4 – Análise da Significância Ensaio Tecnológicos – Infinity Coast	67
Tabela 5 – Resultados Campanha Experimental Royal Tower	68
Tabela 6 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Royal Tower	71
Tabela 7 – Análise da Significância Ensaio Tecnológicos – Royal Tower	73
Tabela 8 – Resultados Campanha Experimental Ponte Hercílio Luz.....	74
Tabela 9 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Hercílio Luz..	77
Tabela 10 – Análise da Significância Ensaio Tecnológicos – Ponte Hercílio Luz.....	79
Tabela 11 – Análise de Significância Ensaio Tecnológicos – Análise Global	85
Tabela 12 – Análise de Significância Combinação de Campanhas x Pressão de Bombeamento	92
Tabela 13 – Análise de Significância Pressão Normalizada	98
Tabela 14 – Menores tensões de escoamento – Pressão Normalizada	99
Tabela 15 – Maiores tensões de escoamento – Pressão Normalizada.....	100
Tabela 16 – Análise de Significância Pressão Normalizada – Dois Grupos	102
Tabela 17 – Grupo 1 e 2 – Pressão Normalizada	103
Tabela 18 – Grupo 3 e 4 – Pressão Normalizada	104
Tabela 19 – Análise de Significância Pressão Normalizada – Quatro Grupos	106
Tabela 20 – Variações de Carregamento Laje 53 Infinity Coast.....	108
Tabela 21 – Análise de Significância Variações de Carregamento x Tensão de Escoamento	117
Tabela 22 – Análise de Significância Variações de Carregamento x Viscosidade	119
Tabela 23 – Volumetria Concretos	120
Tabela 24 – Análise de Significância Volumetria Concreto x Propriedades Reológicas.....	122
Tabela 25 – Constituintes Volumétricos dos Concretos – Infinity Coast.....	123
Tabela 26 – Análise de Significância Variação Volumétrica x Tensão de Escoamento	133
Tabela 27 – Análise de Significância Variação Volumétrica x Viscosidade	134
Tabela 28 – Características Volumétricas dos Concretos	135

Tabela 29 – Análise de Significância Consumo Agrupado x Propriedades Reológicas	139
Tabela 30 – Análise de Significância Características Volumétrica x Propriedades Reológicas	143

SUMÁRIO

1	Introdução	21
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos.....	23
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	Originalidade	24
2	Revisão de Literatura.....	26
2.1	Concreto.....	26
2.1.1	Concreto Usinado	28
2.1.2	Características do Concreto Bombeável.....	31
2.1.2.1	Reologia do Concreto	34
2.2	Bombeabilidade	38
2.3	Sistema de Bombeamento de Concreto	42
2.4	Modelos Preditivos	46
2.4.1	Modelo de Kaplan.....	50
2.4.2	Modelo de Khatib	52
3	Programa Experimental	54
3.1	Materiais	55
3.1.1	Campanha Experimental I – Infinity Coast	56
3.1.2	Campanha Experimental II – Royal Tower	56
3.1.3	Campanha Experimental III – Ponte Hercílio Luz	56
3.2	Métodos	57
3.2.1	Análise Individualizada	57
3.2.1.1	Concreto.....	58
3.2.1.2	Rede de Bombeamento	59
3.2.1.3	Desempenho de Bombeamento	59
3.2.2	Análise Global	60
3.2.3	Análise Normalizada	60
3.2.4	Variação de Carregamento	61
4	Resultados e Discussões	62

4.1	Fatores de Impacto no Desempenho de Bombeamento.....	62
4.1.1	Campanhas Experimentais	62
4.1.1.1	Infinity Coast	62
4.1.1.1.1	Ensaio Tecnológico X Propriedades Reológicas – Infinity Coast.....	66
4.1.1.2	Royal Tower	68
4.1.1.2.1	Ensaio Tecnológico X Propriedades Reológicas – Royal Tower.....	72
4.1.1.3	Ponte Hercílio Luz.....	74
4.1.1.3.1	Ensaio Tecnológico X Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz	77
4.1.2	Análise Global	79
4.1.2.1	Propriedades Reológicas.....	80
4.1.2.2	Sistema de Bombeamento.....	86
4.1.2.3	Análise com Pressão Normalizada	93
4.1.2.3.1	Significância de Parâmetros Reológicos por Faixa de Tensão de Escoamento.....	99
4.2	Impacto de Variações no Concreto na Performance de Bombeamento	107
4.2.1	Variações Materiais Constituintes	107
4.2.2	Volumetria Constituintes	120
4.2.3	Características Volumétricas Concreto.....	135
5	Conclusões.....	145
5.1	Considerações Finais	145
5.2	Sugestão de Trabalhos Futuros	148
	Referências	150

1 INTRODUÇÃO

Oriundo da necessidade de realização do transporte de concreto em tempo hábil para sua aplicação, o concreto começou a ser bombeado a partir de equipamentos de bombeamento próprios a esta utilização.

Sendo utilizada nos Estados Unidos desde 1933, o bombeamento de concreto é uma técnica de transporte aplicável ao concreto fresco utilizada em todo mundo a mais de 70 anos (KAPLAN, 2001).

Aplicável em edifícios residenciais de pequeno, médio e grande porte, indústrias, túneis, blocos de coroamento de edifícios altos, usinas geradoras de energia, dentre outras, o concreto bombeável é alternativa viável a estas construções, principalmente quando há dificuldades no acesso de equipamentos, limitação de espaço físico no terreno da obra, ou ainda quando há complexidade na execução do transporte vertical (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

A determinação da bombeabilidade de concretos é, entretanto, um corriqueiro desafio de engenharia tanto para a comunidade acadêmica quanto para os profissionais do mercado, inexistindo método de predição eficaz e preciso que permita decretar se um dado concreto é bombeável ou não.

Mesmo sendo uma técnica de transporte bem difundida mundialmente, a empiricidade governa o processo de bombeamento, sendo tema constante de estudo de alguns pesquisadores da área (FERRARIS, DE LARRARD e MARTYS, 2001, DE SCHUTTER e FEYS, 2016, SECRIERU *et al.*, 2017).

O desenvolvimento do tema teve contribuição de autores como Tolstoi (1953), Best e Lane (1960), Morinaga (1973), Browne e Bamforth (1977), Hu (1995), Kaplan (2001), De Shutter (2016), Feys (2016) e Secrieru (2017) para um melhor entendimento do funcionamento do concreto e da interação com o sistema de bombeamento.

Dentre os principais pontos desenvolvidos em relação ao bombeamento de concreto encontram-se os seguintes:

- Para que o concreto possa ser bombeado, ele deve ser capaz de se deformar ao longo de um sistema de bombeamento enquanto se permanece estável (KAPLAN, 2001);
- O concreto enquanto bombeado desliza sobre uma fina camada de lubrificação, podendo estar cisalhado ou não (SECRIERU, 2017);

- A bombeabilidade não é uma característica intrínseca ao material, mas sim definida pelo conjunto concreto/sistema de bombeamento (KAPLAN, 2001).

Soma-se a isso, o fato da existência de distintos equipamentos de bombeamento empregados para realizar o transporte do concreto (RIDING, FEYS, MALONE e LINDQUIST, 2016) e dificuldade de se realizar estudos em equipamentos de bombeamento. São poucos os centros de pesquisa que dispõem de recursos para a aquisição de um equipamento desse porte e/ou tem condições de realizar trabalhos em campo em função da logística envolvida.

Diante da importância do tema e da falta de informação, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar distintos parâmetros tanto do sistema de bombeamento, quanto do material a ser bombeado, que influenciam na bombeabilidade do concreto inserido em um sistema de bombeamento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Representando uma fração da produção de concreto de aproximadamente 10% na França, 30% na Alemanha e 50% na Itália, o concreto passível do processo de bombeamento é um material que demanda atenção dos tecnologistas de concreto (KAPLAN, 2001).

No caso do Brasil, mais especificamente na região da Grande Florianópolis, Estado de Santa Catarina, a fração do volume de concreto produzido em central dosadora de médio porte que foi submetida ao bombeamento correspondeu a aproximadamente 80% do volume de produção no período de janeiro de 2021 a julho de 2022, conforme levantamento apresentado no APENDICE A em concreteira de médio porte.

Extrapolando os valores anteriormente apresentados e com base nos indicativos do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022) que demonstram que em 2021 24,96% da produção de cimento em Santa Catarina foi direcionada diretamente à concreteiras, tem-se que aproximadamente 20% do volume do volume de cimento produzido e distribuído em Santa Catarina foi destinado à produção de concretos bombeáveis.

Apesar da representatividade de mercado mundial, a empiricidade do processo ainda leva a alguns problemas, como entupimentos na tubulação e até rupturas nos dutos de transporte.

No Reino Unido, por exemplo, já ocorreram mortes por conta de entupimentos em tubulações, tanto no porto de Felixstowe em uma tentativa de desbloqueio da rede de

bombeamento (BBC, 2015) quanto em uma rodovia em Wimbledon, onde um funcionário de 26 anos de uma companhia foi morto ao ser atingido pelo concreto que estava obstruindo a tubulação da rede de bombeamento (THE CONSTRUCTION INDEX, 2018).

Já em Melbourne, Austrália, um carro foi atingido e funcionários ficaram feridos pelo que populares chamaram de “tiros de concreto” derivados de problemas durante o bombeamento de concreto (PEARSON e MCMILLAN, 2019).

Como alternativa para evitar danos em cronogramas de execução de obra, empresas tendem a recorrer a locação de equipamentos de bombeamento extra, deixando-os em espera, tendo assim uma alternativa caso ocorra um problema de operação, alternativa esta que onera financeiramente a obra em questão, não garante de fato a segurança do empreendimento, mas que visa combater atrasos oriundos do empirismo do processo de bombeamento.

Assim, o presente trabalho se justifica na contribuição para com um melhor entendimento do processo de bombeamento, reduzindo assim o empirismo utilizado no mesmo, minimizando problemáticas de operação e, conseqüentemente, potencializando ganhos econômicos e de segurança nos canteiros de obras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Estudar e analisar alterações na interação sistema de bombeamento e concreto que exerçam influência no desempenho do concreto bombeável.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificação do impacto gerado no desempenho de bombeamento a partir da alteração dos parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade) do concreto a ser bombeado em uma configuração de bombeamento;
- Identificação de características do sistema de bombeamento que afetam a pressão de bombeamento do concreto;
- Verificar impacto no desempenho de bombeamento a partir de alterações na composição do concreto submetido ao bombeamento;

- Identificação de fatores críticos que mais impactem no desempenho de bombeamento.

1.3 ORIGINALIDADE

Decorrente da problemática da previsibilidade do bombeamento de concreto, a bombeabilidade destes é tema recorrente de pesquisas ao redor do mundo em função da árdua tarefa de garantir o transporte do concreto ao seu local de lançamento com segurança.

Usualmente pesquisas relacionadas a bombeabilidade dos concretos têm como foco propriedades intrínsecas do concreto onde, a partir da análise e alteração das suas propriedades reológicas, buscam correlações que modelem a pressão necessária ao bombeamento do concreto em um circuito experimental com base nestas propriedades analisadas.

Têm-se, segundo definição de Kaplan (2001), que um concreto é bombeável se este puder ser transportado por meio de um equipamento de bombeamento. Assim o estudo em questão garante sua originalidade por focar na análise do conjunto de bombeamento formado por equipamento de bombeamento (bombas) e o concreto, verificando o impacto que alterações geradas em qualquer dos constituintes do sistema afeta o desempenho do conjunto.

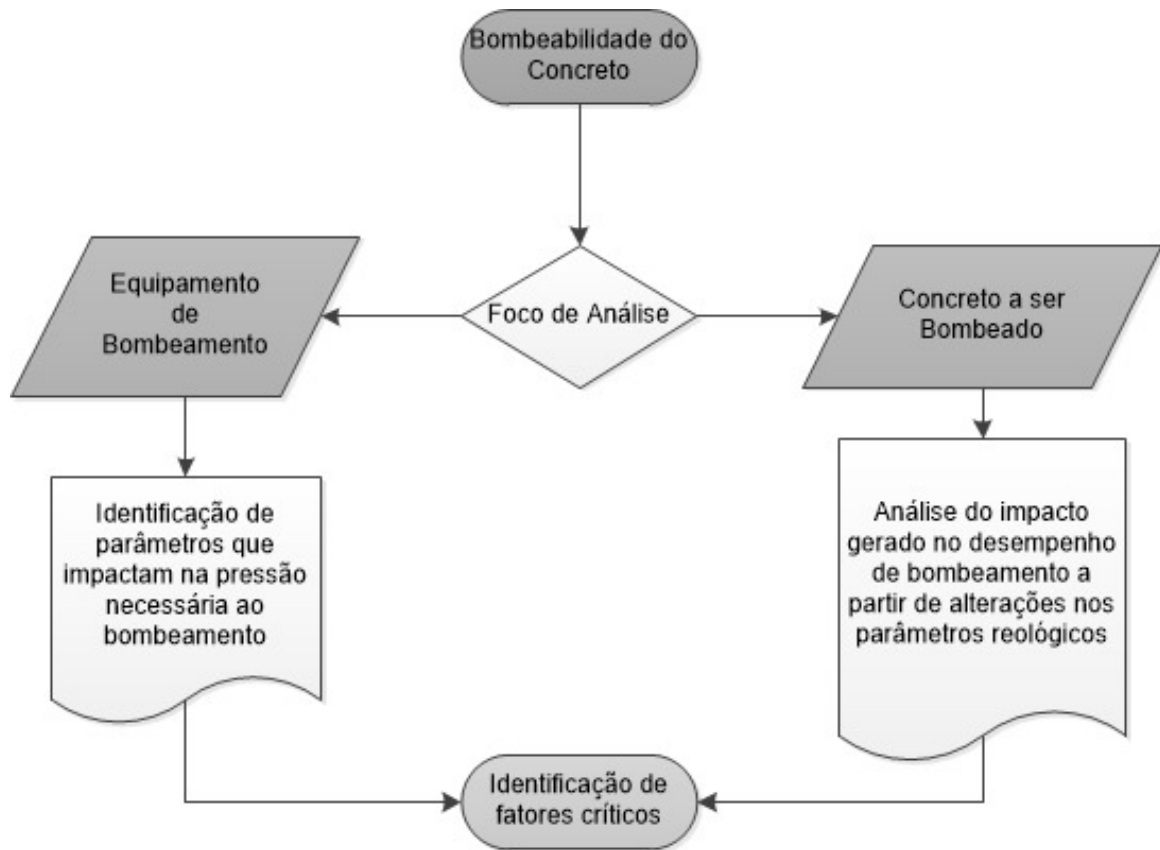
Foram analisadas e estudadas variações nas propriedades reológicas dos concretos em campo identificando seu impacto, ou não, no desempenho de bombeamento do concreto.

Configurações distintas de rede de bombeamento serão testadas em canteiros de obra, avaliando seu possível impacto no funcionamento do sistema de bombeamento concreto/bomba.

Alterações usuais na composição de concretos em linha de produção serão identificadas e correlações destas com o possível impacto no desempenho de bombeamento serão efetuadas.

Assim, a Figura 1 apresenta o fluxograma do estudo proposto no presente documento.

Figura 1 – Fluxograma do estudo



Diante disso, o presente trabalho tem como principal diferencial a metodologia de estudo que será implementada, uma vez que sua originalidade em relação aos demais estudos realizados é garantida por não contar com uma análise em um ambiente controlado de laboratório com um único circuito de bombeamento experimental e por estar focado na identificação de fatores críticos que possam significar o sucesso de uma operação de bombeamento ou o seu fracasso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura visa conceituar os principais fatores relacionados à bombeabilidade dos concretos, apresentando o sistema na qual o concreto é usualmente bombeado, conceituando o concreto enquanto material de construção e exibindo histórico do desenvolvimento do concreto usinado enquanto produto industrializado voltado ao bombeamento.

2.1 CONCRETO

Oriundo da aplicação do cimento, o concreto é o material de construção mais produzido no mundo (em massa), sendo ainda a segunda matéria mais consumida pela humanidade, gerando forte impacto social, ambiental e econômico na indústria da construção (SCRIVENER, JOHN e GARTNER, 2018).

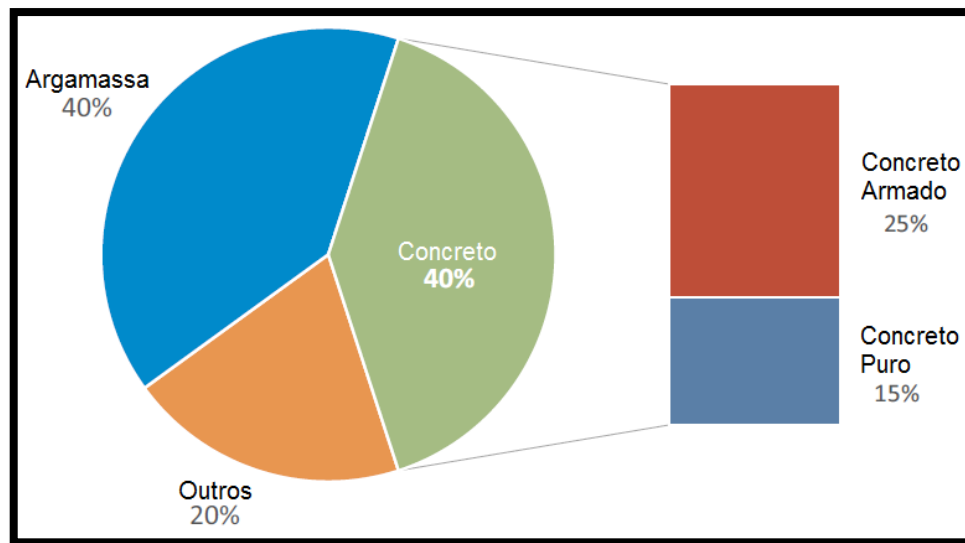
No ano de 2017, de acordo com dados da *International Energy Agency* (2019), aproximadamente 4.100.000.000 toneladas de cimento foram necessárias à implementação em materiais cimentícios (concreto e argamassa), estimando que no ano de 2060 esta demanda seja próxima à 4.500.000.000 toneladas.

Não há indícios de dados concretos que determinem qual a fração real da produção cimentícia seja destinada a confecção de concreto no mundo. Entretanto, Scrivener, John e Gartner (2018) estimam que aproximadamente 25% desta seja utilizada na construção de estruturas de concreto armado.

No Brasil, com base em relatórios do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2019), foram distribuídas 52.847.636 toneladas de cimento no ano de 2018, valor correspondente a 1,30% da produção mundial. Desta produção cimentícia, 11.508.177 toneladas foram absorvidas pela indústria para a produção de concreto, aproximadamente 22% da distribuição total.

Apesar de não existir um controle da utilização do cimento ensacado entregue a revendedores e construtoras, Scrivener, John e Gartner (2018) estimam que 40% desta fração de produção cimentícia brasileira seja destinada a utilização em concreto, conforme reproduzido na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Emprego cimento ensacado no Brasil



Fonte: Adaptado de Scrivener, John e Gartner (2018)

O concreto pode ser definido como um material composto de uma fase aglomerante onde estão imersos agregados, e o proporcionamento de seus constituintes – a água, os agregados graúdos e miúdos, o cimento, as adições e os aditivos – definem suas propriedades tanto em estado fresco quanto em estado endurecido (METHA e MONTEIRO, 2014).

As propriedades dos concretos, segundo Tattersall (1991), podem ser descritas como qualitativas, quando voltadas a questões de aplicação que não envolvem medições como a trabalhabilidade, a fluidez, a compacidade, a estabilidade e a bombeabilidade dos concretos, ou ainda como quantitativas. Dentre as propriedades quantitativas há uma subdivisão entre as propriedades quantitativas empíricas, como o índice obtido no ensaio de abatimento de tronco de cone, e propriedades fundamentais, como os dados resultantes de um estudo reológico para a determinação da tensão de escoamento e a viscosidade do material.

Definir se um concreto tem boas ou más propriedades reológicas, de maneira generalista, está conceitualmente errado, uma vez que existem distintos tipos de concreto voltados a distintas formas de aplicação. Para definir se possui ou não propriedades adequadas, deve-se sempre ter em mente qual o comportamento mecânico, e em estado fresco, necessário a utilização final do material, somente assim o concreto terá, ou não, boas propriedades.

2.1.1 Concreto Usinado

Tendo surgido como um conceito de metodologia de produção e entrega de material, o concreto usinado é patenteado em 1903 na Alemanha. Entretanto, devido a inexistência de meios de transporte que o viabilizassem, sua efetiva implementação e exploração no mercado deu-se anos depois sendo pela primeira vez aplicado em obra no ano de 1913 na cidade de Baltimore, nos Estados Unidos da América. Anos mais tarde, em decorrência do desenvolvimento do caminhão betoneira, houve um amplo crescimento de sua aplicação e aceitação no mercado, principalmente na década de trinta diante da importação destes caminhões (DEWAR e ANDERSON, 1992).

No Brasil, a aplicação do concreto dosado em central iniciou com a instalação da primeira central dosadora de concreto, a Usina Central de Concreto S/A em 1951, apresentada na Figura 3, destinada a fornecer concreto para a viabilização da construção de um trecho de rodovia no Estado de São Paulo. Concluída a obra, a produção da usina em questão passou a ser comercializada e absorvida pelo mercado. Na década de 1950, o concreto usinado como produto apresentou crescimento em seu emprego oriundo do crescimento das cidades, das instalações de fábricas e da construção de Brasília (ABESC, 2003).

Figura 3 – Usina Central de Concreto S/A



Fonte: Mandinga (2016)

Tendo como principal objetivo viabilizar a redução de custos relacionados a produção de concreto em canteiros de obras e otimização do concreto produzido, o concreto usinado apresenta benefícios relacionados a eliminação de perdas de materiais relacionados a produção de concreto (areia, brita e cimento), eliminação da necessidade de funcionários destacados a produção do concreto, aumento na agilidade e produtividade da equipe de trabalho e, sobretudo, qualidade garantida pelo fornecedor do (ABESC, 2015).

Com fim de atestar a qualidade do concreto fornecido, técnicas de caracterização em estado fresco e endurecido são utilizadas. Em estado endurecido, realiza-se o ensaio de resistência à compressão e em estado fresco analisa-se sua consistência (ABNT, 2015).

O ensaio prescrito pela Associação Brasileira de Normas Técnicas para o controle da consistência do concreto, caso não seja autoadensável, é o ensaio de abatimento de tronco de cone de Abrams, apresentado na Figura 4, técnica de caracterização que avalia a deformação de um tronco de cone preenchido por concreto a partir da ação de seu peso próprio (ABNT, 1998). Este ensaio se trata de uma técnica de caracterização empírica que, apesar de ser fonte importante de controle de qualidade de recebimento de material, define apenas uma pequena

parcela do real comportamento do concreto quando submetido a aquela situação específica de ensaio (TATTERSALL,1991).

Figura 4 – Abatimento de tronco de cone de Abrams



Fonte: Hickel e Viera (2018)

Uma alternativa à realização do ensaio de abatimento é a aplicação de sistemas de automação inteligentes em caminhões betoneira, que permitem a realização da leitura da pressão hidráulica necessária a executar a rotação do balão com concreto, correlacionando-a ao valor do ensaio de abatimento (VENANCIO, 2019).

O sistema permite a correção do abatimento do concreto contido no balão do caminhão betoneira de maneira automática, sem a intervenção de equipe de campo das concreteiras. Por meio de sensores de pressão, temperatura e velocidade utilizados em conjunto com tanques de água e aditivos, é realizada a correção do concreto no momento da descarga do material, permitindo com que a realização da entrega do material ocorra em conformidade com o definido pela equipe técnica da usina de concreto (VENANCIO, 2019).

Sendo ainda uma prática comum adotada por profissionais da área – motoristas de caminhão betoneira – a correlação entra o índice de abatimento do concreto obtido em ensaio no momento da descarga com a pressão hidráulica de giro do balão betoneira em determinada rotação.

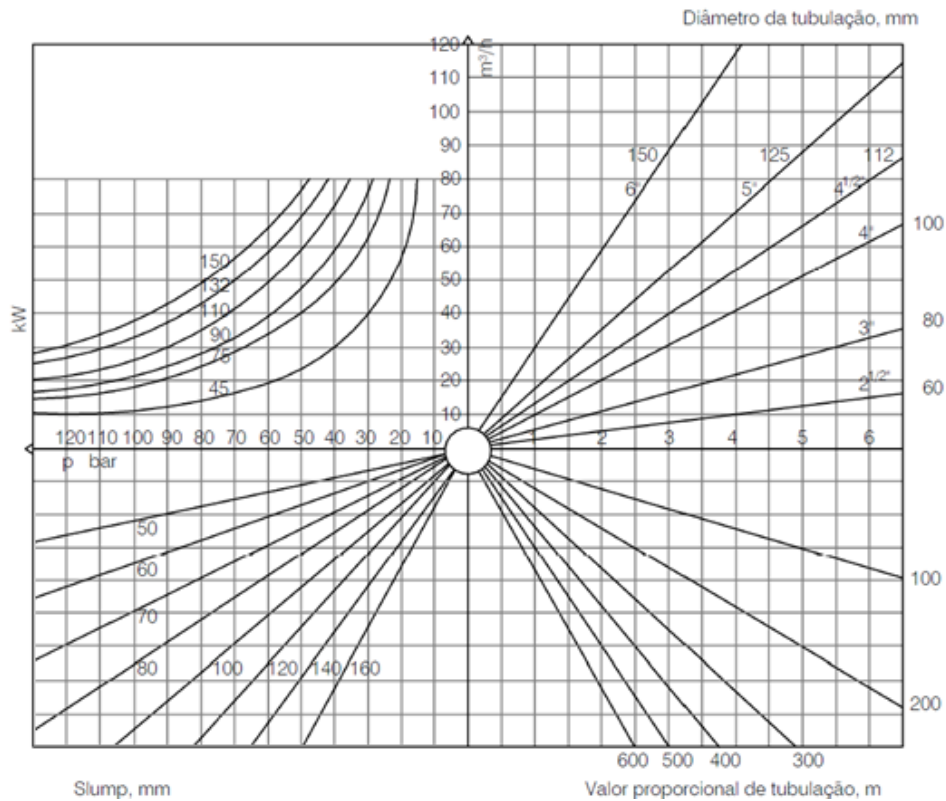
2.1.2 Características do Concreto Bombeável

Apesar de não haver consenso na literatura para uma definição das características que fazem um concreto ser bombeável, há a concordância que, se um concreto for bombeado em um dado sistema de bombeamento, este foi um concreto bombeável para aquela configuração de bombeamento (Kaplan, 2001).

Em tempos onde o uso de aditivos super plastificantes em concreto não era tão usual, Bauer (2008) determinava que para o concreto ser passível do processo de bombeamento, seja este usinado ou não, deveria apresentar comportamento quando submetido ao ensaio de abatimento de tronco de cone contido no intervalo de abatimento de 60 mm a 160 mm.

Algumas fabricantes de equipamentos para o bombeamento de concreto utilizam-se de tabelas para a determinação de parâmetros de bombeamento baseadas em índices obtidos por meio de ensaios empíricos, como o ensaio de abatimento, para a realização de correlações, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Determinação de parâmetros de bombeamento



Fonte: adaptado de Schwing (2017), Hickel e Viera (2018)

Para utilizar da metodologia para determinação de parâmetros de bombeamento apresentada na Figura 5, faz-se necessário a obtenção de três parâmetros oriundos do canteiro de obras (taxa de bombeamento, diâmetro e comprimento da tubulação) e um oriundo do concreto (índice de abatimento). A taxa de bombeamento desejada (eixo vertical) será determinada pela quantidade de caminhões betoneira que deverá ser bombeada em um dado intervalo de tempo. O diâmetro da tubulação (primeiro quadrante) deverá ser o disponibilizado pela equipe de bombeamento. O comprimento da tubulação (quarto quadrante) é a distância linear proporcional da bomba até o ponto final de descarga do concreto.

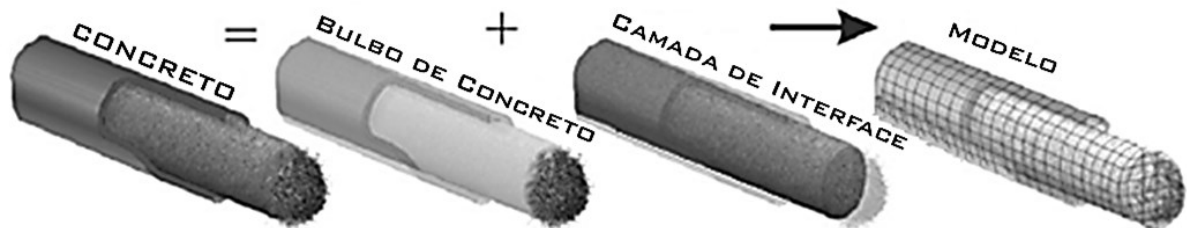
Entretanto, com o advento de agentes modificadores de propriedades para concretos (aditivos) e aplicação de concretos de ultra alto desempenho, com elevada compacidade de seus constituintes e baixo volume de água, tabelas como a apresentada na Figura 5 não são mais eficazes para a determinação da bombeabilidade dos concretos. A falta de material lubrificante na matriz dificulta a migração de partículas da fração fina do esqueleto granular e da pasta de cimento às paredes internas dos dutos, prejudicando o desempenho destes concretos quando inseridos no sistema de bombeamento (DE SCHUTTER e FEYS, 2016).

Apesar de Bauer (2008) e fabricantes de equipamentos de bombeamento utilizarem índices obtidos por meio de ensaios empíricos para delimitar uma faixa de concretos que viriam a ser bombeáveis, Jolin *et al.* (2009) questiona tal conceito simplista, relativizando o estado do concreto e definindo que, para o concreto ser passível do processo de bombeamento, este necessita ser estável e capaz de deformar-se e mobilizar-se enquanto submetido à pressão.

Durante o processo de bombeamento, de maneira geral, há a tendência de migração de uma fração de pasta de cimento, em conjunto com uma parcela de material fino dos agregados, à face interna dos tubos, constituindo assim uma camada de lubrificação, uma zona de interface entre o aço do sistema de bombeamento e o bulbo de concreto, por onde este último desliza durante seu processo de bombeamento (FERRARIS, DE LARRARD e MARTYS, 2001).

Secrieru *et al.* (2017) determina que o fluxo do concreto durante o processo de bombeamento pode ser representado por um modelo constituído pelas características de fluxo do bulbo de concreto (parte central do fluxo) e da camada de lubrificação, conforme Figura 6.

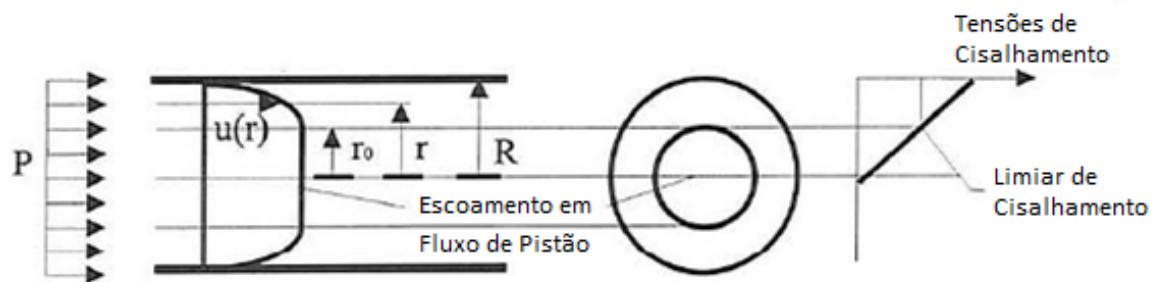
Figura 6 – Representação do fluxo do concreto bombeado



Fonte: Secrieru et al. (2017)

De acordo com Kaplan (2001) há duas possibilidades de fluxo, variando em função das características do concreto e da taxa de cisalhamento que lhe é exercida, sendo um fluxo onde há ocorrência da camada de lubrificação na interface do concreto e o aço, denominado fluxo de pistão, representado na Figura 7, e um fluxo onde não há distinção entre camada de lubrificação e bulbo de concreto. A alteração na forma como o concreto escoar dá-se por conta da taxa de cisalhamento a qual o concreto é submetido, quando submetido a taxas de cisalhamento superiores à sua capacidade de manutenção do mecanismo de deslizamento por pistão, acaba por cisalhar-se durante o processo de bombeamento, não havendo assim distinção entre o bulbo de concreto e a camada de lubrificação.

Figura 7 – Fluxo de pistão



Fonte: Jolin *et al.* (2009)

Com base na relevância do conhecimento do comportamento do material que será submetido ao processo de bombeamento, a reologia do concreto será tema de discussão do item 2.1.2.1 a seguir.

2.1.2.1 Reologia do Concreto

Por vezes tendo seu comportamento em estado fresco relacionado a faixa de abatimento obtida em ensaio de abatimento de tronco de cone, Hu (1995) determina que o ensaio em questão mede apenas uma fração do real comportamento do material, não conseguindo de fato representar a totalidade de seu comportamento em estado fresco, indicando que a maneira ideal de realizar tal determinação seria por meio do estudo de sua reologia.

Reologia é uma área da ciência voltada ao estudo do fluxo e da deformação de todas as formas de matéria a partir da influência de um esforço de deformação, baseada na lógica de que a matéria real se encontra no limiar entre o sólido e o líquido, ou seja, apresenta propriedades viscoelásticas (DINGER, 2010).

Durante dois séculos a ideia de que o comportamento da matéria seria dividido entre líquidos e sólidos regidos pelas leis estudadas por Newton (1687) e Hooke (1678) foi absoluta, até que engenheiros e cientistas como Weber (1835) e Maxwell (1867) desenvolveram modelos que originam o conceito de viscoelasticidade, ou seja, sólidos elásticos com parcela de comportamento similar à de líquidos viscosos e vice-versa (BOTELLA, 2005).

Modelos como estes definiam a matéria como se possuísse um comportamento linear, proporcional a carga aplicada, necessitando por vezes uma carga inicial para seu deslocamento e um aumento gradual para acelerá-la, surgindo assim conceitos como a tensão de escoamento e a viscosidade (BOTELLA, 2005).

A tensão de escoamento de um material é definida por Botella (2005) como o esforço aplicado no material onde, se o material encontra-se em estado sólido, começa a se comportar de maneira similar a um líquido, escoando, ou se em estado líquido, o líquido vem a deformar-se constantemente sem aumento do esforço aplicado. Barnes e Walters (1985) entretanto, contestam este conceito de tensão de escoamento, por determinar que não há escoamento, ou deformação, perceptível, existindo parcela de deformação imperceptível antes deste suposto ponto de mudança de comportamento.

Já a viscosidade de um material é definida por Dinger (2010) como a facilidade com que a matéria flui, onde um material de baixa viscosidade tende a fluir mais rapidamente do que um material de alta viscosidade. Apesar de ter surgido como um conceito absoluto, hoje, sabe-se que a viscosidade de um material pode, ou não, ser constante, variando conforme a sollicitação que lhe é imposta (DINGER, 2010).

Assim modelos reológicos mais recentes buscam simular este comportamento da matéria real, que por vezes não apresenta este comportamento linear, alterando sua resposta conforme lhe é alterada a sollicitação. Modelos como o de Herschel-Bulkley (1926) surgem descrevendo o comportamento da matéria com base na taxa de deformação a qual lhe é imposta, podendo, ou não, apresentar alterações em sua viscosidade durante o ensaio (BOTELLA, 2005).

Apesar de não definir parâmetros de viscosidade, o modelo de Herschel-Bulkley, descrito na equação 1 a seguir, é usualmente utilizado para a descrição do comportamento de alguns tipos de concreto, como o autoadensável (FERRARIS, DE LARRARD e MARTYS, 2001).

$$\tau = \tau'_0 + a\dot{\gamma}^b \quad (1)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ'_0 = tensão de escoamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (1/s);

$a; b$ = parâmetros do comportamento reológico do material.

O modelo de Herschel-Bulkley pode ser utilizado para determinar se a matéria em análise possui propriedades de incremento de viscosidade (dilatante), se é constante (pseudo-plástica ou newtoniana), ou ainda se há decréscimo na viscosidade (fluidificante). A partir da análise do parâmetro de comportamento reológico “b” do modelo de Herschel-Bulkley

(equação 1) se faz possível determinar qual a característica do material em análise (BOTELLA, 2005).

Apesar da ampla gama de aplicação, o modelo de Herschel-Bulkley não é o mais comumente utilizado por pesquisadores da área de concreto, mas sim o modelo de Bingham representado na equação 2 a seguir (KAPLAN, 2001; FERRARIS, DE LARRARD e MARTYS, 2001; FEYS, VERHOEVEN e DE SCHUTTER, 2007 ; JOLIN *et al.*, 2009; DE SHUTTER e FEYS, 2016; SECRIERU *et al.*, 2017).

$$\tau = \tau_0 + (\mu \times \dot{\gamma}) \quad (2)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de escoamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (1/s);

μ = viscosidade plástica (Pa.s).

O modelo de Bingham é um modelo linear que simplifica o comportamento do material em estudo aos dois parâmetros anteriormente apresentados, a tensão de escoamento e a viscosidade, desconsiderando a deformação do material em baixas taxas de deformação (BARNES e WALTERS, 1985).

A obtenção dos dados para a caracterização da matéria por quaisquer destes modelos, entretanto, não é simples, sendo necessária a utilização de aparelhos que sejam capazes de quantificar o esforço e a velocidade de cisalhamento a qual o material sob estudo é submetido. Os equipamentos dotados de tais capacidades são denominados reômetros, podendo ser por meio de placas paralelas, ou rotacionais, conforme a forma com qual realizam a aquisição de dados (HU, 1995).

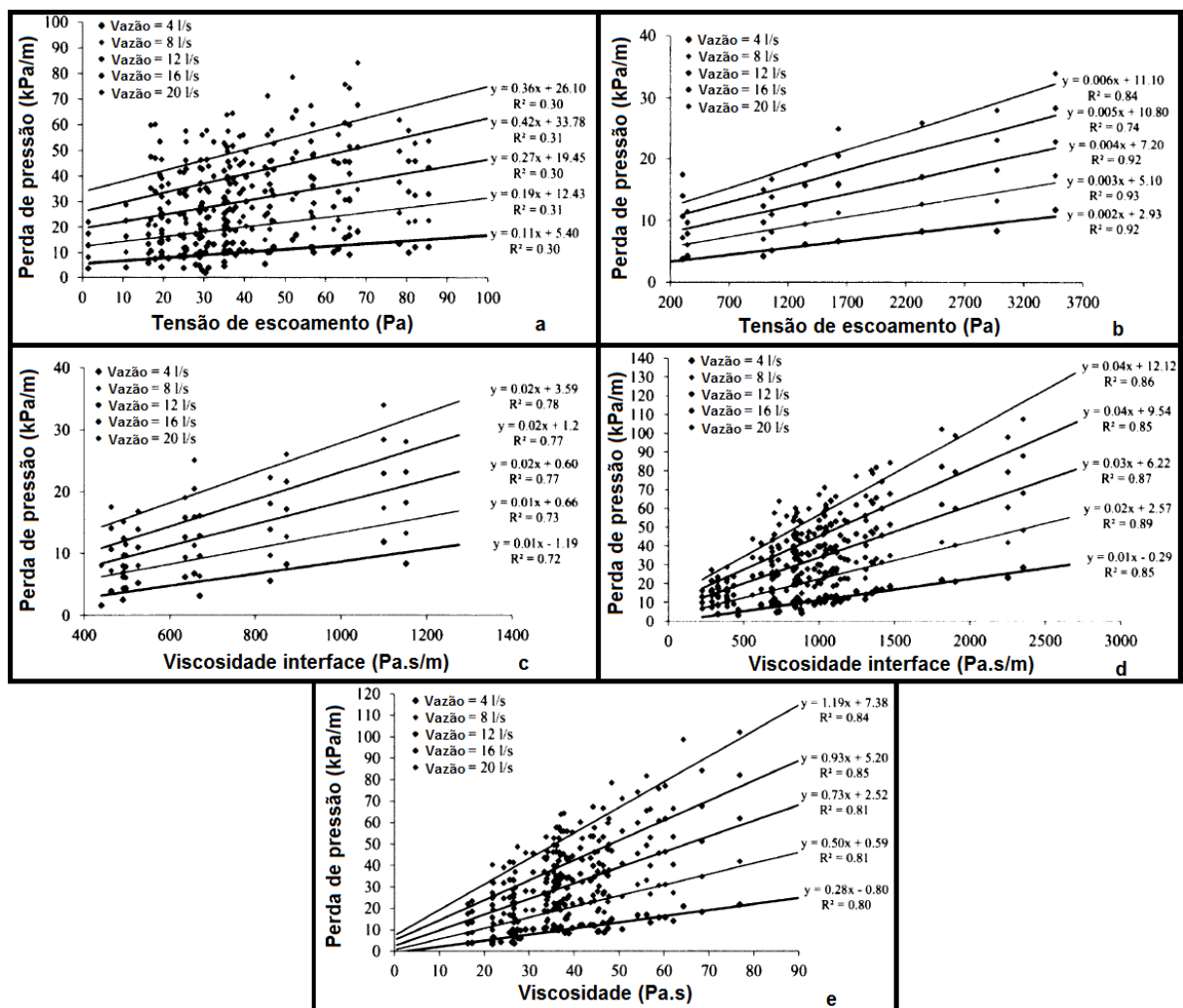
A medida da reologia de um material por meio de reometria de placas paralelas dá-se por meio da confinamento de uma amostra de material por entre duas placas paralelas, com aplicação de uma rotação controlada na placa superior enquanto inferior permanece imóvel, sendo registrada a tensão por meio de uma célula de carga ao longo do ensaio.

Já a reometria rotacional se dá por meio da aplicação de sucessíveis ciclos de taxas de cisalhamento pré-determinadas por meio de haste, pás, placas ou cilindros com registro do torque necessário a realização do cisalhamento do material nestas taxas (FEYS, DE SCHUTTER e VERHOEVEN, 2007).

Do estudo de fatores que exercem influência nas propriedades reológicas dos concretos, Castro, Liborio e Pandolfelli (2011) destacam que os materiais constituintes da mistura, a sequência e energia aplicada a mistura e a temperatura exercem influência. Complementarmente, Hickel e Viera (2018) constataam a influência da forma dos grãos de agregados, da quantidade de água empregada na mistura e o teor de aditivo utilizado.

Esta variação nas propriedades reológicas dos concretos e, conseqüentemente, na sua camada de interface, exerce influência no desempenho de bombeamento dos concretos, conforme apresentado na Figura 8 a seguir (KHATIB, 2013).

Figura 8 – Influência das propriedades reológicas do concreto e da interface na perda de pressão no processo de bombeamento – tensão de escoamento a) concreto autoadensável, b) concreto convencional, viscosidade da interface c) concreto autoadensável, d) concreto convencional; e) viscosidade do concreto autoadensável



Fonte: adaptado de Khatib (2013)

Com base no exposto na Figura 8 sobre o estudo desenvolvido por Khatib (2013), verifica-se que há uma tendência de comportamento do concreto, durante seu processo de bombeamento, em relação a suas características reológicas, sejam estes concretos autoadensáveis, ou concretos convencionais.

No caso de concretos de elevada fluidez (Figura 8 “a”, “c” e “e”), a tensão de escoamento destes não se caracteriza como uma variável que exerça elevada influência na perda de pressão do sistema, entretanto, a viscosidade da camada de interface e do concreto são parâmetros que apresentam certa linearidade para com a perda de pressão gerada no sistema de bombeamento.

Em relação ao concreto convencional (Figura 8 “b” e “d”), a viscosidade de interface do concreto convencional apresenta comportamento análogo ao do observado nos concretos de elevada fluidez, onde concretos com menor valor de viscosidade de interface apresentaram menor demanda de pressão do sistema. Em relação aos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade do concreto há a ocorrência de uma inversão de comportamento, apresentando uma maior demanda de pressão de bombeamento nos concretos que apresentaram um maior valor para sua tensão de escoamento, já em relação à viscosidade, Khatib (2013) aponta que não há linearidade entre tal propriedade e a demanda de pressão exercida no sistema.

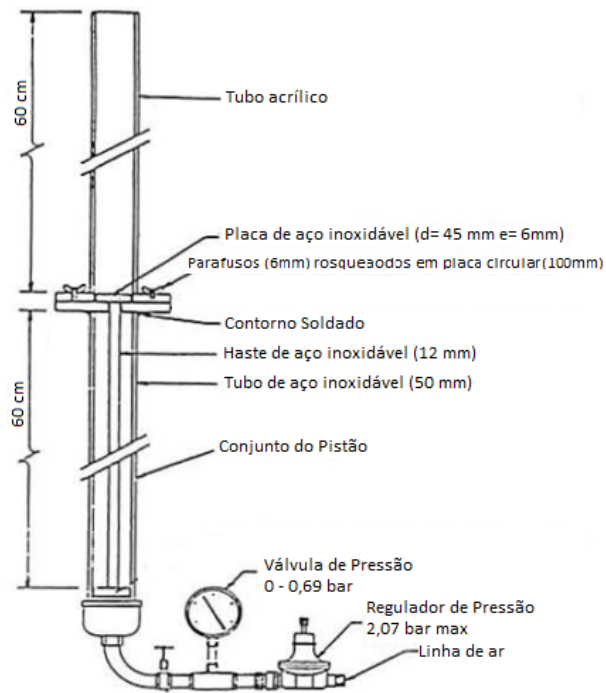
Entretanto, as características reológicas dos concretos não são os únicos fatores que determinarão se o concreto em questão é bombeável ou não, sendo assim a bombeabilidade tema do item 2.2 a seguir.

2.2 BOMBEABILIDADE

Conforme discutido anteriormente, distintos autores voltaram suas atenções para a determinação da bombeabilidade de concretos, buscando soluções para reduzir a empiricidade do processo de bombeamento.

Buscando simular o processo de bombeamento submetido ao concreto, Best e Lane (1960) desenvolveram instrumento, apresentado na Figura 9, que busca avaliar a pressão necessária para deslocar um pistão recoberto por argamassa.

Figura 9 – Ensaio de Best e Lane

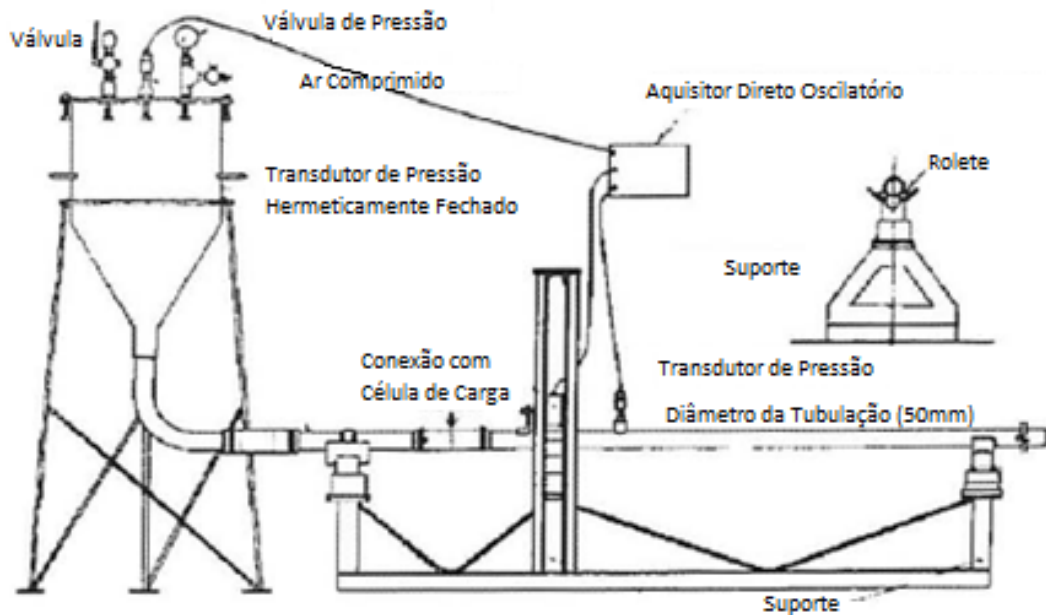


Fonte: Kaplan (2001)

O funcionamento do instrumento de Best e Lane (1960) ocorre por meio da inserção de ar comprimido na parte inferior de um pistão, buscando a sua movimentação por dentro da argamassa, que resiste sua movimentação.

Morinaga (1973) por sua vez determinou a força de atrito atuante no sistema a partir de um sistema complexo, apresentado na Figura 10, onde mediante uma tubulação de bombeamento com parte móvel sobre rodas, mensurou-se, através de uma célula de carga, a força necessária a manter esta parte móvel no local.

Figura 10 – Ensaio de Morinaga

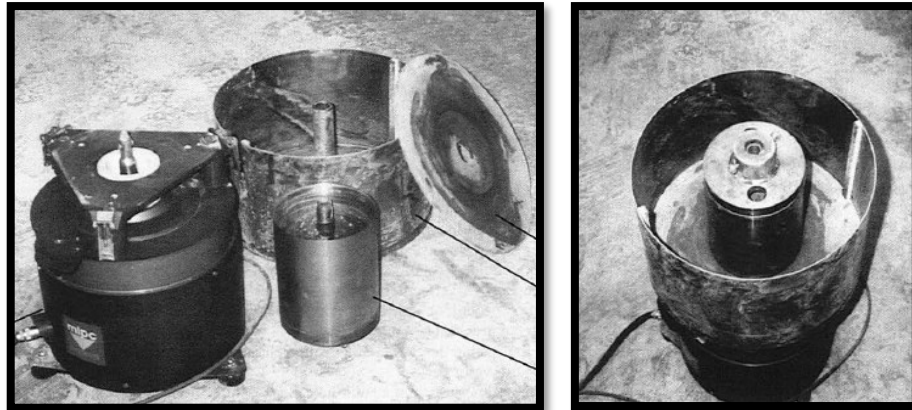


Fonte: Kaplan (2001)

O ensaio desenvolvido por Morinaga (1973) difere-se do proposto por Best e Lane (Figura 9) por simular a pressão a qual o concreto é submetido durante o processo de bombeamento. Morinaga realiza a inserção de pressão por meio de ar comprimido no concreto, não trabalhando com o material em repouso, avaliando assim, questões relacionadas à viscosidade do concreto e não apenas a sua tensão de escoamento.

Diante da impossibilidade de aplicação prática do equipamento concebido por Morinaga em campo por conta de suas dimensões, Kaplan (2001) propôs uma adaptação de um reômetro pré-existente, portátil, possibilitando sua utilização em canteiros de obras, apresentado na Figura 11, analisando o atrito gerado entre o concreto e o aço do sistema de bombeamento.

Figura 11 – Equipamento desenvolvido por Kaplan



Fonte: Kaplan (2001)

Além de Kaplan (2001), Kasten (2010) também desenvolve equipamento buscando a determinação da bombeabilidade de concretos em campo, o equipamento conhecido como reômetro de tubo deslizante, apresentado Figura 12.

Figura 12 – Reômetro de tubo deslizante - Sliper



Fonte: Nerella (2013) e adaptação Greim (2015)

Como ponto de convergência destes estudos verifica-se que todos acabam por simular o conjunto sistema de bombeamento/concreto, corroborando com a definição de Kaplan (2001) que a bombeabilidade ou não dos concretos não é função direta de suas propriedades reológicas enquanto em estado fresco, mas sim destas em conjunto com o sistema de bombeamento a qual o concreto será submetido.

Feys *et al.* (2016) aponta que fatores relacionados a rede de bombeamento e variações nas propriedades reológicas dos concretos são fatores de risco à bombeabilidade do concreto, retornando assim a ideia de compatibilidade entre sistema e material.

Assim, o item 2.3 a seguir foca na apresentação dos constituintes do sistema de bombeamento, descrevendo como se dá seu funcionamento e apresenta fatores que venham a prejudicar a bombeabilidade dos concretos.

2.3 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE CONCRETO

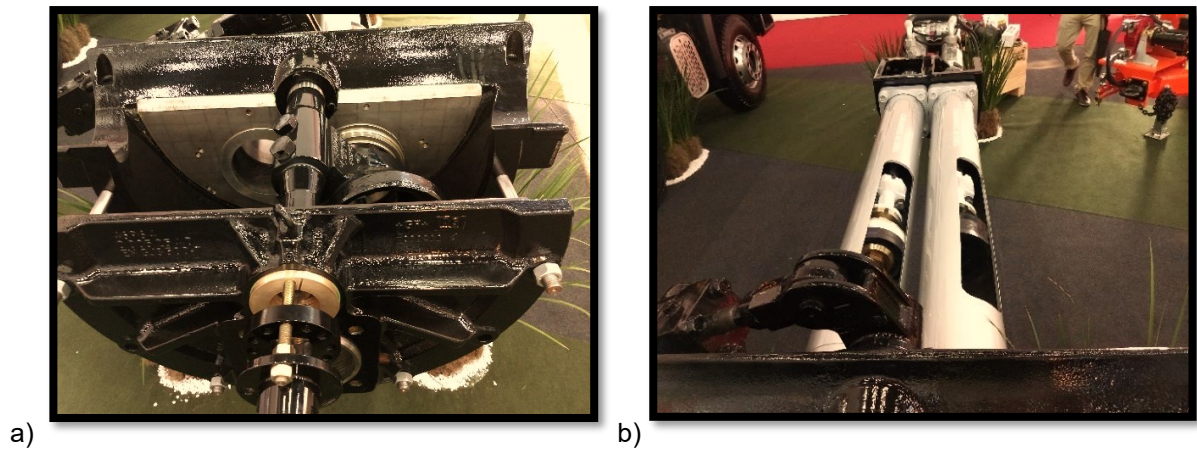
Sendo o sistema mais especializado para a realização do transporte de concreto ao ser comparado a jericas, esteiras e carrinhos de mão, o sistema de bombeamento de concreto é constituído por bomba, tubulação e conexões (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Parte obrigatória para o bombeamento de qualquer material, as bombas são máquinas hidráulicas que transformam energia mecânica em trabalho, realizando assim o transporte de fluídos à elevadas distancias verticais e horizontais (BAPTISTA *et al.*, 2010).

Na construção civil as principais bombas utilizadas para o transporte de materiais cimentícios (concreto e argamassa) são as bombas por sistema pistão e rotativas, diferenciando-se na capacidade de bombeamento e o fluxo de material, sendo contínuo no sistema rotativo e intermitente no sistema a pistão (KAPLAN, 2001).

Para o transporte de concreto, o mais usual é a realização de seu bombeamento por meio de sistema a pistão, composto por pistões, motor hidráulico e válvula tipo “Rock”, apresentados na Figura 13.

Figura 13 – a) Válvula “Rock” b) pistões

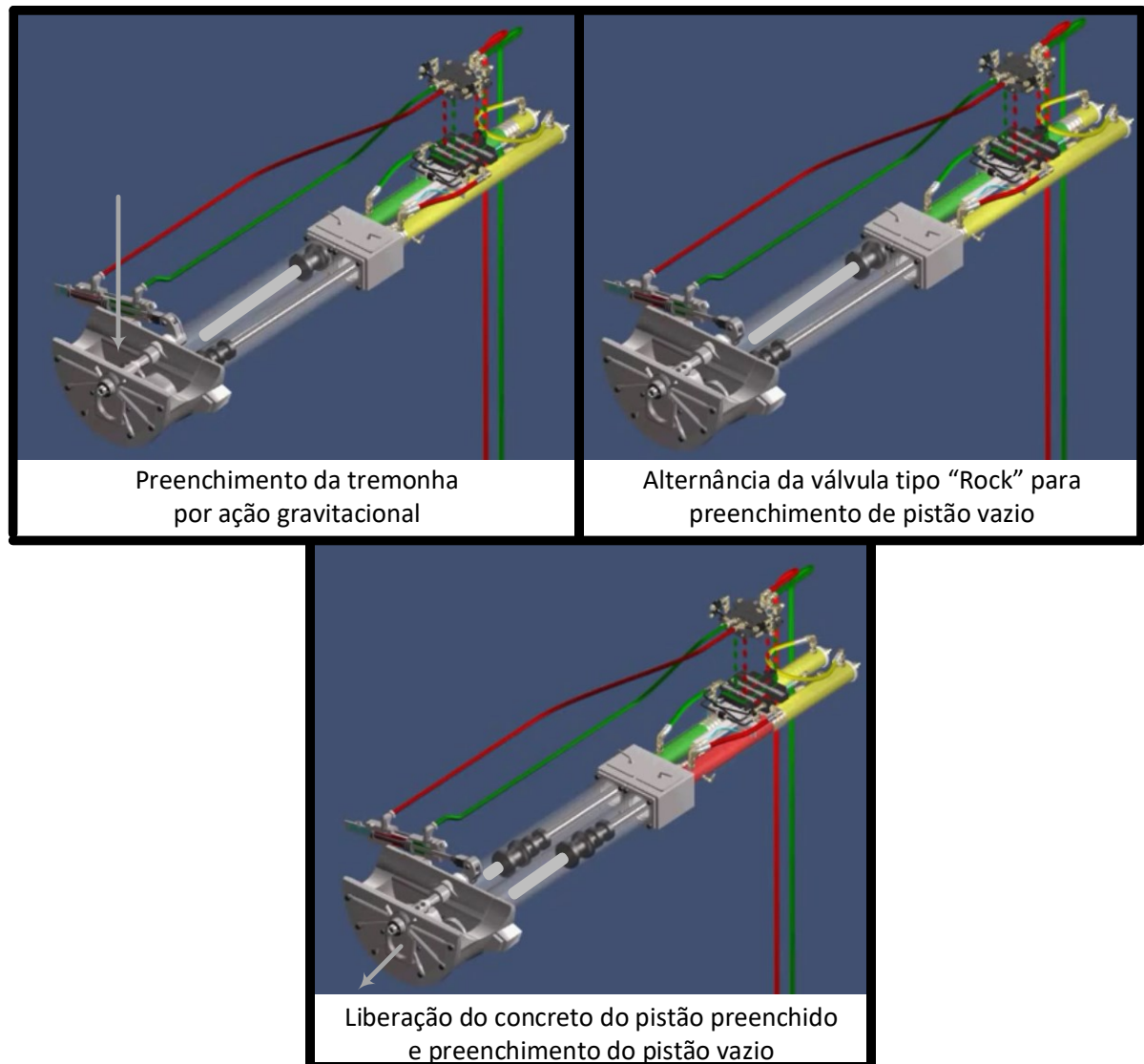


Fonte: Hickel e Viera (2018)

A alimentação do sistema a pistão, segundo Neville e Brooks (2013), ocorre por parte majoritária devido a ação da gravidade do concreto despejado pelo caminhão betoneira na tremonha e parte por sucção da ação dos pistões, Figura 13 b, acionados pelo sistema hidráulico da bomba, a válvula tipo “Rock”, apresentado na Figura 13 a, alterna a abertura e fechamento dos pistões, permitindo assim o preenchimento de um dos pistões e liberação do outro pistão anteriormente preenchido, bombeando concreto a cada pulso do sistema.

O funcionamento da bomba de sistema a pistão é esquematizado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Funcionamento bomba de sistema a pistão



Fonte: do autor

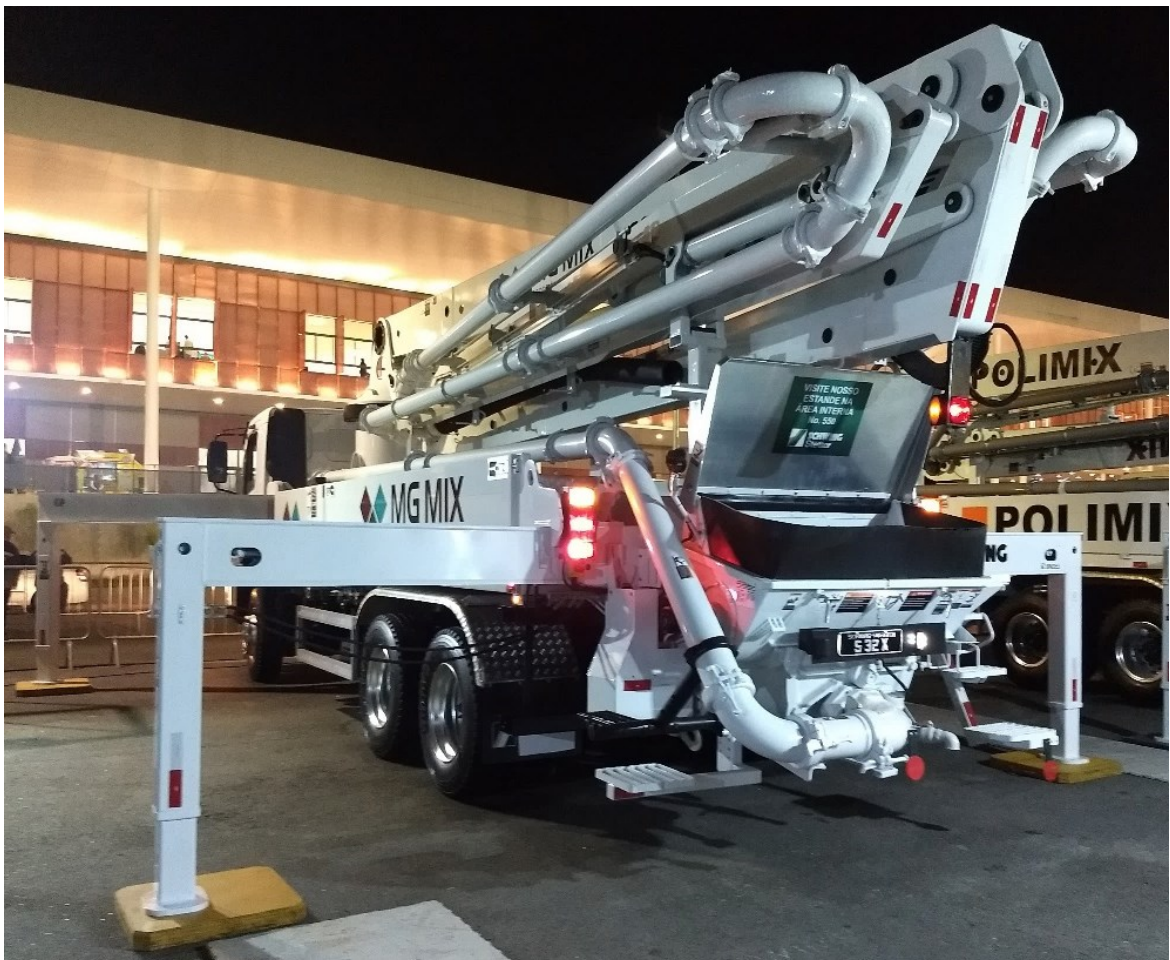
O sistema a pistão descrito anteriormente é encontrado nas bombas tipo estacionária e tipo lança apresentadas na Figura 15 e Figura 16, respectivamente.

Figura 15 – Bomba tipo estacionária



Fonte: Hickel e Viera (2018)

Figura 16 – Bomba tipo lança



Fonte: Hickel e Viera (2018)

O material, ao ser liberado pelo sistema, é submetido ao transporte por meio de tubos e conexões da rede de bombeamento, onde no caso das bombas estacionárias, Figura 15, são

montadas na saída da bomba a pistão instalada no caminhão e nas bombas com mastro de distribuição lança já estão instaladas no caminhão, Figura 16.

Com a pressão necessária provocada pela bomba de concreto, seu transporte ocorrerá pelos tubos. Por definição da ABNT NBR 5578 (2015) trata-se de um produto siderúrgico oco por todo seu comprimento de diferentes tipos de seções. Já as conexões, segundo a mesma normativa, são “acessórios destinados a interligar tubos entre si ou com outros acessórios” podendo ser utilizadas para a mudança de direção da rede de bombeamento (curvas) ou o prolongamento desta (luvas).

Por meio destes tubos e conexões, ocorre o transporte de fluídos, podendo dar-se por maneira livre mediante a ação gravitacional, sendo denominado como conduto livre, ou por ação de pressão externa, conduto forçado. No caso do bombeamento de concreto, este transporte ocorre por meio de condutos forçados, escoando de maneira uniforme com pressão interna não coincidente com a pressão atmosférica (BAPTISTA, 2010; AZEVEDO NETTO, 2007).

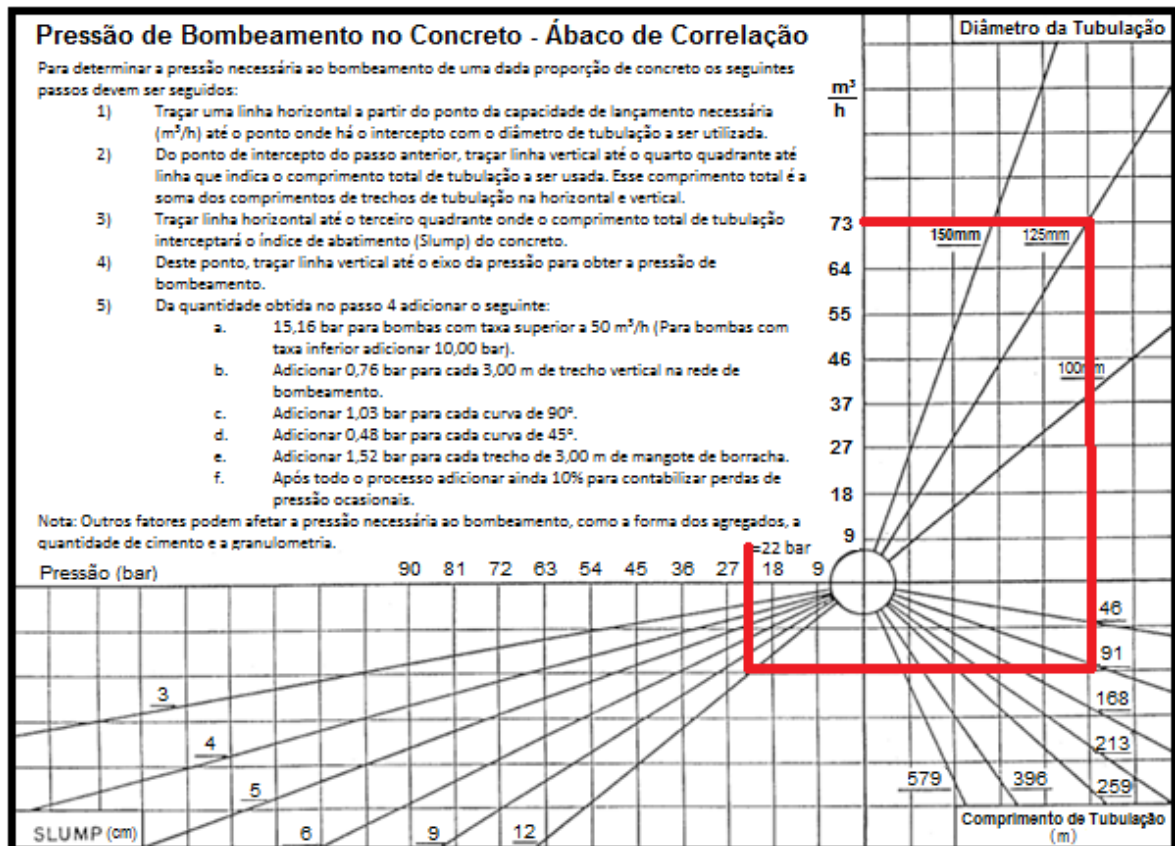
Este transporte de fluídos foi, e ainda é, motivo de estudos de diversos cientistas e engenheiros ao redor do mundo, como o suíço Daniel Bernoulli, o inglês Julius Weisbach e o francês Henry Darcy. Estes notáveis autores contribuíram para o entendimento atual de que a perda de carga gerada pelo atrito em uma rede de tubulações ocorre em função das características reológicas do material e sua velocidade durante seu escoamento em conjunto com fatores relacionados ao sistema no qual este está inserido como o diâmetro da tubulação, a rugosidade dos tubos, o comprimento da tubulação e suas conexões, sendo fundamentos básicos da área de estudo (BROWN, 2002).

Assim, ao conhecer as características do concreto e do sistema ao qual será inserido modelos de predição podem vir a ser empregados para vislumbrar o desempenho do conjunto de bombeamento, tema do item 2.4 a seguir.

2.4 MODELOS PREDITIVOS

Distintas metodologias para predição do bombeamento são adotadas ao redor do globo, a Figura 17, por exemplo, apresenta metodologia proposta pelo comitê do ACI 304 (2008) para a predição da pressão de bombeamento a uma dada taxa de bombeamento.

Figura 17 – Ábaco para determinação de pressão



Fonte: Comitê ACI 304 (2008)

O modelo proposto pelo comitê do ACI 304 (2008) toma como base a necessidade da taxa de bombeamento desejada em canteiro de obra e das características do sistema de bombeamento para só depois levar em consideração o índice de consistência do concreto.

Um exemplo destacado na Figura 17, supõe que há a demanda de uma taxa de bombeamento de $73 m^3/h$, em uma tubulação de 5 polegadas (125 mm) com 91 metros de comprimento de tubulação para o bombeamento de um concreto de índice de abatimento (slump) 12 cm, gerando uma demanda de 22 bar de pressão. A quantidade resultante no ábaco ainda deve ser acrescida de 15,16 bar por conta da demanda na bomba e de características gerais de bombeamento. Supondo que dos 91 metros de tubulação, 30 sejam equivalentes a trechos verticais – um bombeamento no décimo andar de uma edificação, por exemplo – adiciona-se assim 7,6 bar de pressão. Para o direcionamento do fluxo de material supõe-se necessária a utilização de duas curvas de 90° , somando mais 2,06 bar de pressão ao total. Ao final da rede ainda se faz necessária a utilização de 6 metros de mangote de borracha para direcionamento final no ponto de descarga, acrescentando-se assim mais 3,04 bar de pressão. Ao final de todo o

processo proposto pela ACI 304 (2008) estimasse a perda de 49,86 bar de pressão, acrescidos de 10% para possíveis perdas de pressão ocasionais, gerando assim um total de 54,85 bar.

Verifica-se que, no modelo proposto, não há conversão de conexões da rede de bombeamento para comprimento linear equivalente para entrada no comprimento de tubulação, mas ao final do processo computa-se valores adicionais correspondentes a estas e determinadas características do sistema, como se há utilização de mangote de borracha, capacidade da bomba, dentre outros.

Riding *et al.* (2016) determina que, apesar de complexa a tarefa de realizar o transporte de concreto por meio de bombeamento, tal processo obedece aos princípios de equilíbrio de energia descrito pela equação proposta de Bernoulli, descrita na equação 3 a seguir adaptada considerando ainda a parcela correspondente à energia fornecida pela bomba ao sistema.

$$\left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_1 g} \right) = \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2 g} \right) + \Delta h - h_{\text{bomba}} \quad (3)$$

Onde:

$h_{1,2}$ = altura de referência;

$v_{1,2}$ = velocidade do material bombeado;

g = aceleração gravitacional;

$p_{1,2}$ = pressão;

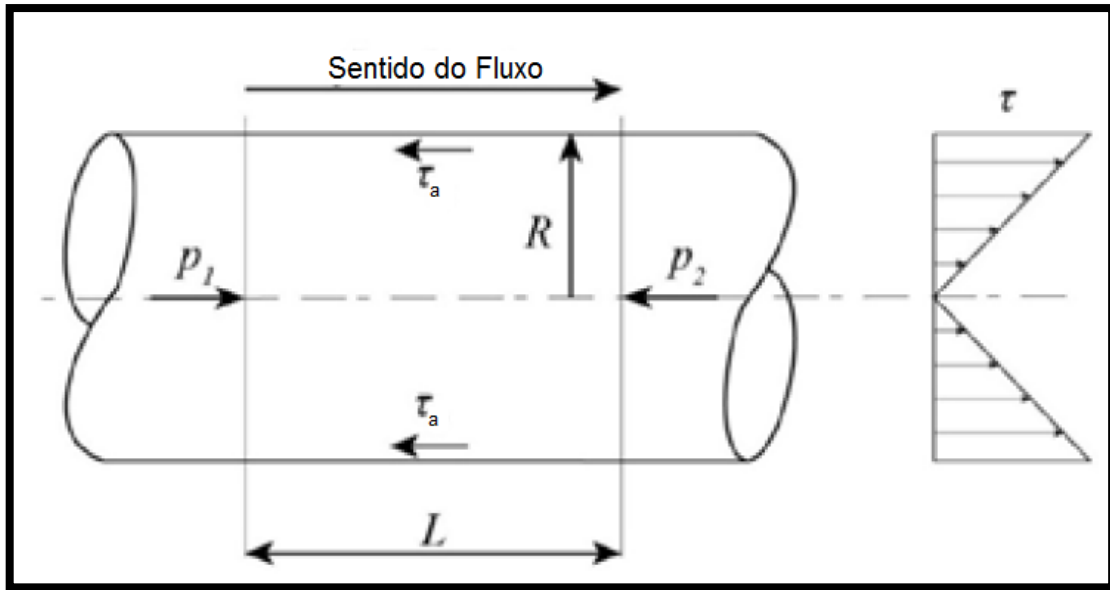
$\rho_{1,2}$ = densidade do material bombeado;

Δh = perda de carga na rede de bombeamento;

h_{bomba} = energia fornecida pela bomba.

A perda de carga na rede de bombeamento descrita na Equação 3 corresponde a somatória de perdas de carga localizadas nas conexões e equipamentos hidráulicos da rede e ao atrito gerado na tubulação, ou seja, a perda de pressão do processo de bombeamento ocorre em razão do atrito na tubulação, representada na Figura 18 e balanceada pelas Equações 4, 5, 6 e 7 no equacionamento das forças envolvidas no processo (RIDING *et al.*, 2016).

Figura 18 – Esquematização ações e reações no fluxo do concreto



Fonte: Adaptado de Riding *et al.* (2016)

$$\sum F_L = 0 \quad (4)$$

$$p_1 \times \pi R^2 = p_2 \times \pi R^2 + \tau_a \times 2\pi RL \quad (5)$$

$$(p_1 - p_2) \times \pi R^2 = \tau_a \times 2\pi RL \quad (6)$$

$$\tau_a = \frac{\Delta p \times R}{2L} \quad (7)$$

Onde:

F_L = Forças atuantes ao longo da tubulação;

$p_{1,2}$ = Pressão atuante;

τ_a = Força de atrito atuante na tubulação;

R = Raio da tubulação;

L = Comprimento da tubulação.

Com base na premissa de que a pressão atuante no processo de bombeamento é preponderantemente proporcional a ação do atrito no sistema, surgem modelos de predição de pressão desenvolvidos por Kaplan, De Larrard e Sedran (2005) e Khatib (2013), a serem discutidos nos itens 2.4.1 e 2.4.2.

2.4.1 Modelo de Kaplan

Kaplan, De Larrard e Sedran (2005), para a confecção de seu modelo de predição, partem do preceito de que o concreto apresenta dois perfis distintos de escoamento, um em fluxo tipo pistão, onde há o escorregamento de um bulbo de concreto envolto por uma fina camada de lubrificação e um fluxo cisalhado, onde há cisalhamento deste bulbo de concreto, total ou parcial, em função da atuação da tensão de atrito no processo de bombeamento.

Assim, Kaplan, De Larrard e Sedran (2005) definem que o fluxo de material durante o processo de bombeamento é dado pelo expresso na Equação 8, reproduzida a seguir.

$$Q_{Total} = \begin{cases} Q_{Pistão} ; \text{ se } \tau_a \leq \tau_0 \\ Q_{Pistão} + Q_{Cisalhado} ; \text{ se } \tau_a > \tau_0 \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

$Q_{Total; Pistão; Cisalhado}$ = Vazão;

τ_a = Tensão de atrito;

τ_0 = Tensão de escoamento do concreto.

A partir da constatação de que a vazão total é imposta pelo pistão, ou seja, o que de fato é bombeado pela bomba, Kaplan, De Larrard e Sedran (2005) determinam dois modelos de cálculo para estimar a pressão de bombeamento, um para determinado valor de vazão onde a tensão de atrito atuante é inferior à tensão de escoamento do concreto – fluxo de pistão – e outro para valor superior – fluxo cisalhado –, representados nas equações 9 e 10 a seguir.

$$P = \left(\frac{2L}{R}\right) \times \left(\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} \eta + \tau_0\right) \quad (9)$$

$$P = \left(\frac{2L}{R}\right) \times \left(\frac{v_p R^2 - \frac{R^3}{4\mu} \tau_{0i} + \frac{R^3}{3\mu} \tau_0}{R^2 + \frac{R^3}{4\mu} \eta} \eta + \tau_0\right) \quad (10)$$

Onde:

P = pressão de bombeamento;

L = comprimento da tubulação;

R = raio da tubulação;

Q = vazão do concreto na bomba;

K_r = coeficiente de preenchimento de pistão;

η = constante de viscosidade da interface;

τ_0 = tensão de escoamento do concreto;

v_p = velocidade do pistão da bomba;

R_p = raio do pistão da bomba;

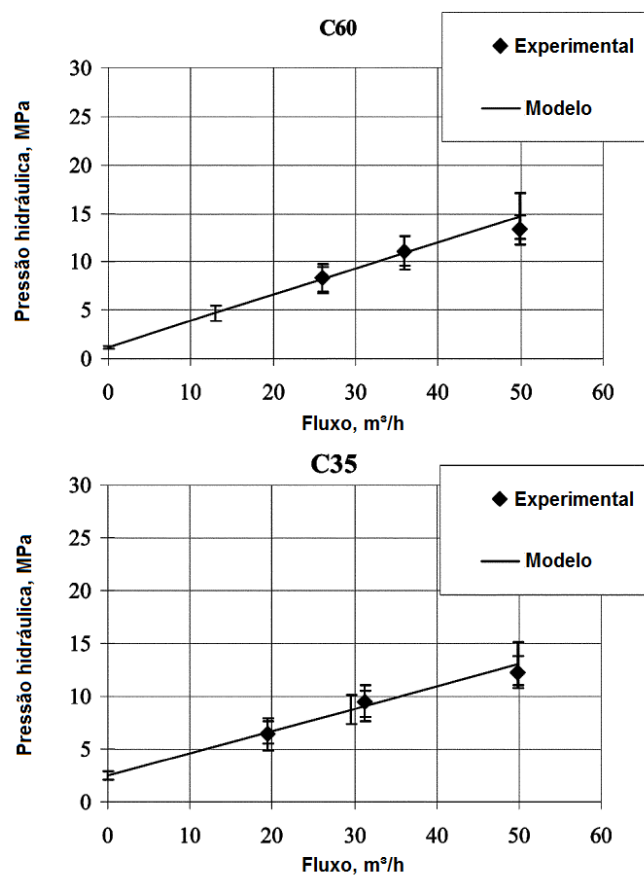
τ_{0i} = tensão de escoamento da interface;

μ = viscosidade plástica do concreto.

Kaplan, De Larrard e Sedran (2005), utilizaram seu modelo em dois distintos canteiros de obra quantificando as características para a aplicação do modelo em concretos bombeados de classe de resistência C35 e C60, comparando os parâmetros de bombeamento atingidos no efetivo bombeamento com o modelo analítico.

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos por Kaplan, De Larrard e Sedran (2005) durante a etapa de validação de seu modelo.

Figura 19 – Validação do modelo de Kaplan, De Larrard e Sedran (2005)



Fonte: adaptado de Kaplan, De Larrard e Sedran (2005)

Riding *et al.* (2016) apontam que o modelo apresentado e validado por Kaplan comprova que concreto convencional frequentemente não é cisalhado durante o processo de bombeamento, dado as taxas de bombeamento implementadas, e que apresenta relação linear a taxa de deslizamento do concreto com a pressão de bombeamento.

2.4.2 Modelo de Khatib

Com base no modelo proposto por Kaplan, Khatib (2013) elimina a ideia de prever a pressão necessária a um dado sistema de bombeamento e visa identificar a perda de pressão atuante na rede a partir da caracterização do concreto a ser bombeado.

A equação 11 apresenta a relação existente entre a vazão no sistema de bombeamento, características reológicas do concreto e camada de lubrificação e a perda de pressão atuante no sistema.

$$Q = \frac{\pi}{24R^4\Delta p^3\mu_c\mu_{ll}} \left(-12\mu_{ll}\Delta p^4R^7t_{ll} + 18\mu_{ll}\Delta p^4R^6t_{ll}^2 - 12\mu_{ll}\Delta p^4R^5t_{ll}^3 - 8\tau_{oc}\mu_{ll}\Delta p^3R^7 + \right. \\ \left. 12\mu_c\Delta p^4R^7t_{ll} - 18\mu_c\Delta p^4R^6t_{ll}^2 + 12\mu_c\Delta p^4R^5t_{ll}^3 + 24\tau_{oc}\mu_{ll}\Delta p^3R^6t_{ll} - 24\tau_{oc}\mu_{ll}\Delta p^3R^5t_{ll}^2 + \right. \\ \left. 8\tau_{oc}\mu_{ll}\Delta p^3R^4t_{ll}^3 - 24\tau_{oll}\mu_c\Delta p^3R^6t_{ll} + 24\tau_{oll}\mu_c\Delta p^3R^5t_{ll}^2 - 8\tau_{oll}\mu_c\Delta p^3R^4t_{ll}^3 + \right. \\ \left. 16\tau_{oc}^4\mu_{ll}R^4 + 3\mu_{ll}\Delta p^4R^8 + 3\mu_{ll}\Delta p^4R^4t_{ll}^4 - 3\mu_c\Delta p^4R^4t_{ll}^4 \right) \quad (11)$$

Onde:

Q = vazão de bombeamento;

R = raio da tubulação;

Δp = perda de pressão;

μ_c = viscosidade do concreto;

μ_{ll} = viscosidade da camada de lubrificação;

t_{ll} = espessura camada de lubrificação;

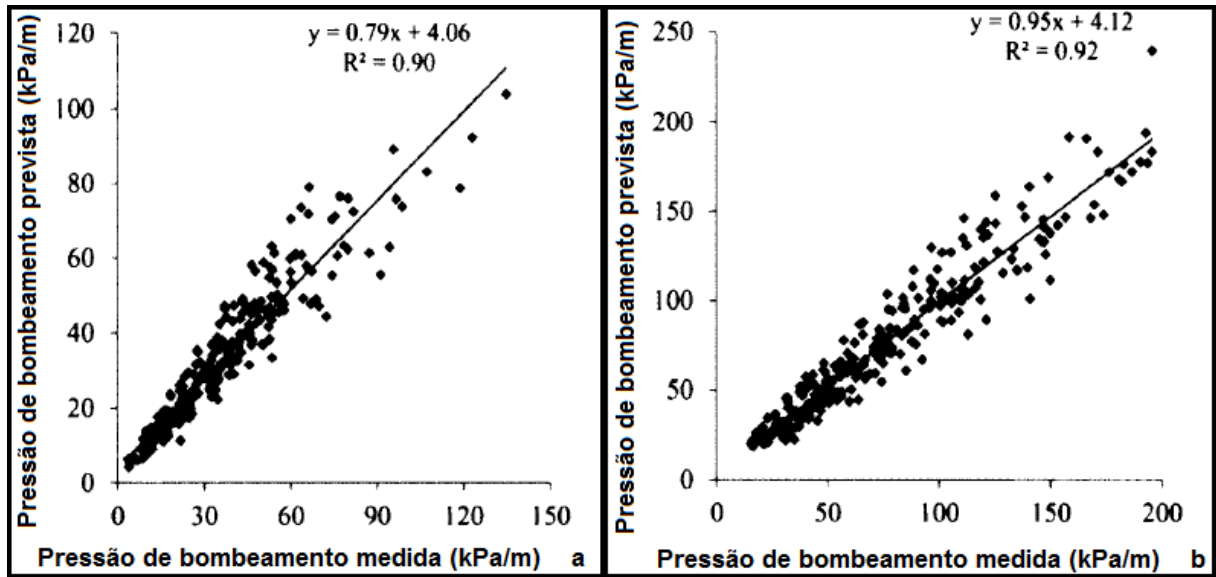
τ_{oc} = tensão de escoamento do concreto;

τ_{oll} = tensão de escoamento da camada de lubrificação.

Khatib (2013) utiliza da parte analítica de seu estudo para determinar a perda de pressão em um sistema de bombeamento com base nas características reológicas de concretos

e do sistema de bombeamento. No laboratório da Universidade de Sherbrooke o bombeamento destes mesmos concretos foi analisado em escala real, sendo apresentado na Figura 20 o comparativo entre a perda de pressão estimada através da aplicação de sua metodologia e o que de fato foi encontrado nos medidores de pressão durante o bombeamento real dos concretos do estudo (a – concretos com alto índice de abatimento, b – concretos convencionais).

Figura 20 – Aplicação do modelo preditivo de Khatib (2013)



Fonte: adaptado de Khatib (2013)

Khatib (2013), encontra uma tendência de comportamento que permite estimar a pressão de bombeamento com relativa precisão, entretanto diante da dificuldade de constatar e definir a espessura da camada de interface, há pontos de dissonância entre o modelo e o que é observado no momento de bombeamento. Riding et al. (2016) apontam que apesar de tal problemática, o modelo de Khatib (2013) é indicado ao desenvolvimento de simulações de como dar-se-á o processo de bombeamento através do estudo de composições de concretos que busquem reduzir a demanda exercida ao sistema de bombeamento.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

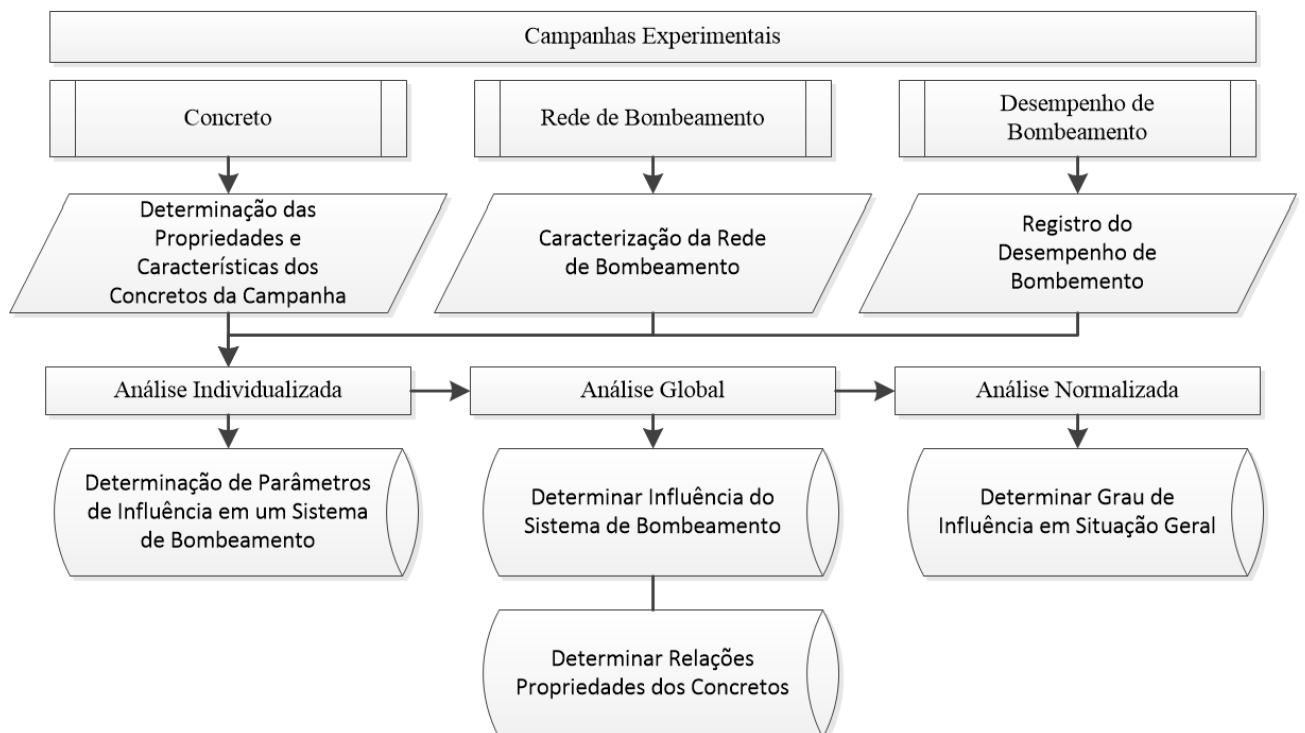
Com o objetivo de analisar fatores críticos que influenciam o desempenho do conjunto concreto/sistema de bombeamento são apresentados nos itens a seguir o programa experimental adotado para analisar impactos no desempenho de bombeamento em função do concreto ou de características do sistema de bombeamento.

Assim, foram realizadas três campanhas experimentais distintas com tipos de concretos variáveis no quesito índice de abatimento/classe de espalhamento, maneiras usuais de caracterizar e especificar concretos.

Visando poder comparar resultados e identificar impactos em função de alteração do sistema de bombeamento em duas destas campanhas são utilizadas duas redes de bombeamento e equipamentos iguais – bomba tipo lança com 32 m de mastro de distribuição.

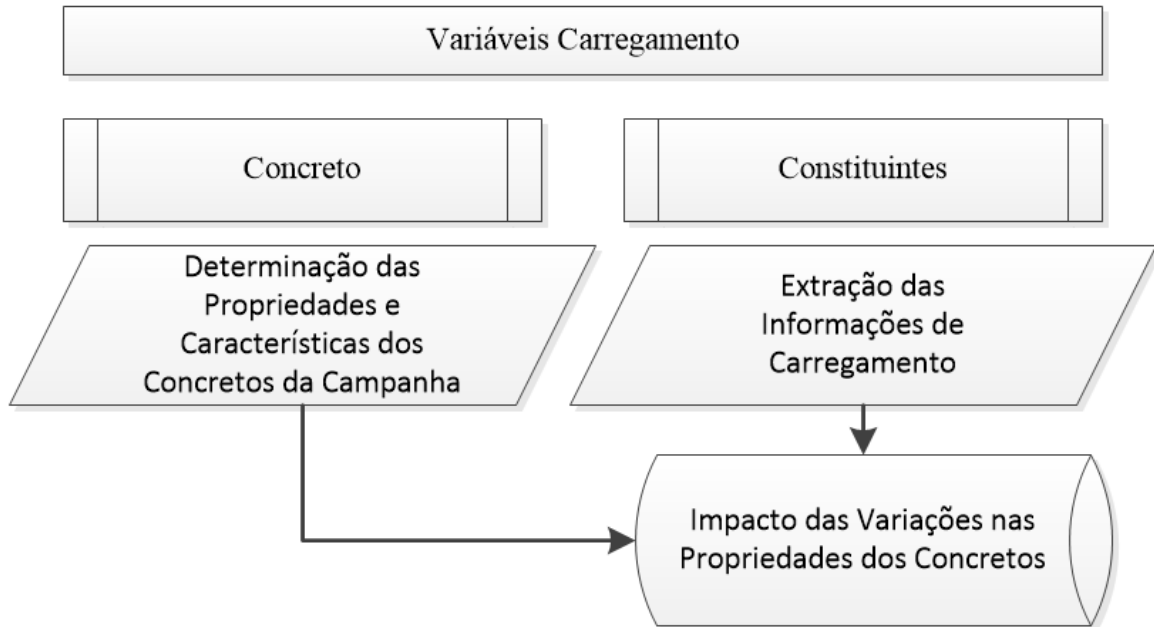
O programa experimental do presente trabalho foi adotado para atender o seguinte processo de análise apresentado na Figura 21 para determinar fatores de influência no processo de bombeamento.

Figura 21 – Processos de análise fatores de risco



Além da preocupação na identificação de fatores de influência, a Figura 22 aponta o processo adotado para a identificação de impactos de variações de carregamento nas características reológicas do concreto que influem na bombeabilidade do concreto.

Figura 22 – Processo de determinação de impacto de variações de carregamento



Conforme os processos apresentados, primeiramente serão apresentados individualmente os materiais utilizados em cada campanha experimental no item 3.1, em seguida no item 3.2 o processo de aquisição geral dos dados e a metodologia adotada para análise são destacados.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa se originaram e foram disponibilizados por concreteiras da região do Vale do Itajaí e da Grande Florianópolis e autorizados para serem estudados nas campanhas experimentais pelas construtoras durante as atividades de concretagem.

As campanhas executadas foram executadas no edifício Infinity Coast – item 3.1.1– no edifício Royal Tower – item 3.1.2– e na Ponte Hercílio Luz – item 3.1.3.

3.1.1 Campanha Experimental I – Infinity Coast

Atualmente o edifício Infinity Coast é a quarta maior edificação do Brasil, tendo um total de 66 pavimentos, com uma altura de 234 metros e na concretagem da laje número 53 do edifício Infinity Coast foi realizada a presente campanha experimental.

O sistema de bombeamento utilizado para a execução da presente campanha foi montado por meio de bomba estacionária e tubulações. Na configuração da rede de bombeamento foram utilizadas três curvas de raio longo, uma redução, e 63 trechos de 3 metros de canos de 5 polegadas.

O concreto utilizado na campanha experimental foi de classe de abatimento S220.

3.1.2 Campanha Experimental II – Royal Tower

Localizado na cidade de Balneário Camboriú, o edifício Royal Tower tem um total de 44 pavimentos e a campanha experimental foi realizada durante as operações de concretagem de seu bloco de coroamento das estacas.

O sistema de bombeamento utilizado para a execução da campanha foi através da utilização de uma bomba lança com mastro de distribuição de 32 metros. A bomba lança em questão tem uma redução e nove curvas de raio longo de 5 polegadas.

Foram utilizados dois tipos de concreto durante a concretagem do bloco de coroamento, sendo um dos tipos o concreto autoadensável de classe de espalhamento SF 2 e o outro concreto de classe de abatimento S160.

3.1.3 Campanha Experimental III – Ponte Hercílio Luz

A Ponte Hercílio Luz, localizado na cidade de Florianópolis, tem extensão de 821 metros e a campanha experimental foi realizada durante a concretagem do bloco de ancoragem continental.

Assim como na campanha experimental II, o sistema de bombeamento utilizado para a execução da campanha foi através da utilização de uma bomba lança com mastro de distribuição de 32 metros, novamente contando com uma redução e nove curvas de raio longo de 5 polegadas.

A semelhança com a campanha experimental II não é restrita apenas ao sistema e rede de bombeamento, pois também foram utilizados os mesmos dois tipos de concreto, autoadensável de classe de espalhamento SF 2 e concreto de classe de abatimento S160.

3.2 MÉTODOS

Conforme apresentado, no presente item são apontados os métodos adotados nas campanhas experimentais para viabilizar a análise de forma isolada com a metodologia de análise apresentada no item 3.2.1, global conforme item 3.2.2, normalizada conforme 3.2.3, e ainda são apresentados no item 3.2.4 os métodos utilizados para identificar possíveis riscos inerentes de variações de carregamento em concretos a serem bombeados em situações limite de bombeamento, apontando quais materiais devem ser mais controlados para a minimização de riscos.

As relações realizadas na presente dissertação terão sua significância avaliada por meio de análise de significância de *Student*, determinando quais fatores exercem maior ou menor influência em relação às correlações em análise.

3.2.1 Análise Individualizada

As três campanhas experimentais serão utilizadas como fundamento para originar os dados de análise da presente dissertação e sua aquisição terá origem na análise individualizada das campanhas experimentais.

A partir do processo apresentado na Figura 21 o concreto bombeado, a rede de bombeamento e o desempenho de bombeamento serão caracterizados com a metodologia descrita no presente item e seus resultados serão utilizados para determinar impactos de suas variações no desempenho final de bombeamento.

Identificados os principais pontos de impacto nas campanhas serão utilizados para balizar a análise global dos resultados, item 3.2.2, bem como a análise normalizada para equacionar as diferenças nas redes de bombeamento, item 3.2.3, e refinar o estudo do impacto das variações das características dos concretos no desempenho de bombeamento, item 3.2.4.

Assim em 3.2.1.1 são apresentados os métodos para a caracterização e aquisição dos parâmetros de análise relacionados aos concretos, em 3.2.1.2 a determinação dos parâmetros de rede utilizados, e no item 3.2.1.3 a extração do desempenho de bombeamento.

3.2.1.1 Concreto

O concreto entregue em obra foi submetido aos critérios dispostos na NBR 12655 (ABNT, 2015), onde os responsáveis pelo recebimento e aceitação do concreto verificavam a documentação do produto e a conformidade com o que fora solicitado.

Sendo aceito, os concretos aplicados nas campanhas experimentais foram caracterizados e tiveram suas propriedades determinadas quando o caminhão betoneira iniciava a descarga nas bombas.

O concreto era carregado em baldes metálicos e submetido às análises.

Quando o concreto empregado era especificado por classe de abatimento, era submetido ao ensaio de determinação de abatimento por meio do prescrito na ABNT NM 67(1998), equivalente a ASTM C143/C143M-15^a, quando especificado por classe de espalhamento pelo prescrito na ABNT NBR 15823-1 (2017).

Pós realização de análise de abatimento e ou espalhamento o concreto é submetido a análise de suas propriedades reológicas através da utilização de reometria rotacional com o reômetro Pheso, apresentado na Figura 23, com metodologia de ensaio “up-down” e subsequente tratamento conforme modelo de Bingham, obtendo propriedades de tensão de escoamento e viscosidade.

Figura 23 – Reômetro Pheso



Fonte: Hickel e Viera (2018)

O equipamento apresentado na Figura 23 converte a demanda de energia necessária a cisalhar o material contido em uma cuba metálica em torque para dada rotação, sendo assim possível obter a taxa de cisalhamento e tensão necessária a cisalhar o material a tal taxa.

O reômetro Pheso possui duas configurações de hastes e cubas para a realização do ensaio de reometria rotacional, a configuração menor para até 8 litros de material e a maior para até 17 litros, sendo a maior configuração a adotada no presente estudo.

3.2.1.2 Rede de Bombeamento

Conforme exemplificado e verificado por distintos autores como Kaplan (2001), Khatib (2013), De Schutter e Feys (2016) e Secrieru et al. (2017), a rede de bombeamento na qual o concreto será bombeado exerce influência na pressão total do sistema.

A rede de bombeamento foi caracterizada na análise individualizada das campanhas experimentais, mas só foi utilizada como parâmetro de análise a partir da análise global, item 3.2.2, e na análise normalizada, item 3.2.3.

Os parâmetros de rede registrados foram o comprimento de tubulação, o diâmetro destas e a quantidade e o tipo de conexões utilizados.

3.2.1.3 Desempenho de Bombeamento

O desempenho de bombeamento foi medido a partir do registro da pressão atuante no manômetro da bomba utilizado no sistema de bombeamento.

O manômetro das bombas utilizado foi gravado através do registro de vídeos em alta definição (1080p com 60 frames por segundo) durante 30 segundos e na estabilização dos ponteiros foi tomado como a pressão de bombeamento daquele concreto e conseqüentemente como a medida de seu desempenho de bombeamento.

Assim o desempenho de bombeamento foi correlacionado de maneira individualizada às propriedades reológicas dos concretos em suas respectivas campanhas experimentais bem como aos resultados dos ensaios tecnológicos executados, buscando determinar através de análises de significância quais fatores demonstraram maior relação com o aumento ou não da solicitação de pressão ao sistema de bombeamento em um dado sistema de bombeamento.

3.2.2 Análise Global

A análise global foi realizada a fim de demonstrar a influência da rede de bombeamento no impacto da demanda de pressão do sistema de bombeamento e comparar a relação entre as propriedades reológicas apontadas pela bibliografia como influentes no processo de bombeamento com ensaios tecnológicos usualmente utilizados como parâmetro de aceitação e qualidade de bombeamento.

3.2.3 Análise Normalizada

O modelo de Kaplan, De Larrard e Sedran (2005) e o modelo de Khatib (2013) serão utilizados como balizadores para a normalização da pressão de bombeamento, uma vez que nestes modelos se é constatada a clara influência do sistema e rede de bombeamento.

Assim, realizou-se uma análise normalizada da pressão, com base na premissa de que os parâmetros de rede de bombeamento exercem influência na demanda de pressão e desempenho de bombeamento.

Como todas as redes de bombeamento no estudo possuíam diâmetro de 5 polegadas, utilizou-se da técnica de determinação de comprimento equivalente de tubulação para a conversão de conexões em comprimento para o prosseguimento do estudo.

Assim o parâmetro de pressão normalizada representa o desempenho de bombeamento dos concretos obtidos em um metro linear equivalente do sistema de bombeamento.

Tal análise permitiu demonstrar a influência dos parâmetros reológicos na demanda de pressão bem como de índices tecnológicos utilizados como critérios de bombeabilidade de concretos.

Parâmetros menos influentes em uma análise geral foram também analisados para demonstrar que também geram em menor grau significância na demanda de pressão.

A tensão de escoamento que foi o parâmetro de maior influência na demanda de pressão foi dividida por faixas para determinar impactos do parâmetro de viscosidade na demanda de bombeamento.

Por limitações do estudo parâmetros de operação não foram abordados, uma vez que por se tratar de campanhas reais de bombeamento não puderam ser ajustados pelos envolvidos no estudo.

3.2.4 Variação de Carregamento

Constatado tanto a influência do sistema de bombeamento e das propriedades reológicas do concreto no desempenho de bombeamento, fez-se na campanha experimental do Infinity Coast, item 3.1.1, por ter sido a campanha que mais solicitou do equipamento de bombeamento uma análise do impacto gerado de variações de bombeamento nas propriedades reológicas do concreto.

O concreto, sua composição e romaneios de carregamento foram disponibilizados pela concreteira para o prosseguimento de análises de impacto de variações de carregamento.

O concreto tinha como projeto de carregamento a seguinte proporção de dosagem apresentada na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Proporcionamento Materiais Infinity Coast

Traço Utilizado Campanha Experimental (Kg)								
Cimento Portland	Sílica Ativa	Areia Artificial	Brita 1	Brita 0	Areia Natural	Super Plastificante	Plastificante	Água
312	14	295	204	815	524	1,01	1,47	210

As variações existentes nos carregamentos ocorrem em funções de limites impostos e métodos de correção adotados pela concreteira.

Além da variação de carregamento, determinou-se em campo a massa específica dos concretos através do disposto na ABNT NBR 9833(2009), equivalente a ASTM C138/C138M-17a, para poder determinar a volumetria real dos constituintes e determinar seu impacto nas propriedades reológicas.

Foram analisados os impactos tanto de forma absoluta por metro cúbico teórico carregado quanto do impacto volumétrico a partir da correção de metro cúbico real produzido.

Todas as propriedades reológicas foram analisadas e verificadas por meio de análise de significância para a determinação dos materiais que mais influenciaram alterações nas propriedades de tensão de escoamento e viscosidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da presente dissertação são divididos em dois itens principais, em 4.1 são apresentados e discutidos resultados que apontam para fatores que impactam o desempenho de bombeamento dos concretos, em 4.2 são apresentadas análises de risco de alterações na composição de concretos que possam vir a gerar problemas de bombeamento de um concreto outrora desenvolvido para ser bombeável a uma dada configuração de bombeamento.

4.1 FATORES DE IMPACTO NO DESEMPENHO DE BOMBEAMENTO

Finalizado todas as etapas do programa experimental descrito em 3, seus resultados são apresentados e discutidos de forma individualizada – contida no próprio universo de análise – no item 4.1.1, apresentando e discutindo fatores de influência mútua entre campanhas experimentais, ou não, no desempenho de bombeamento. Finalizada a apresentação e discussão dos resultados das campanhas experimentais de forma isolada o item 4.1.2 apresenta resultados extraídos de uma análise global das três campanhas experimentais e por fim o item 4.1.2.3 aprofunda a análise eliminando parte das diferenças dos sistemas de bombeamento normalizando a pressão de bombeamento.

4.1.1 Campanhas Experimentais

4.1.1.1 *Infinity Coast*

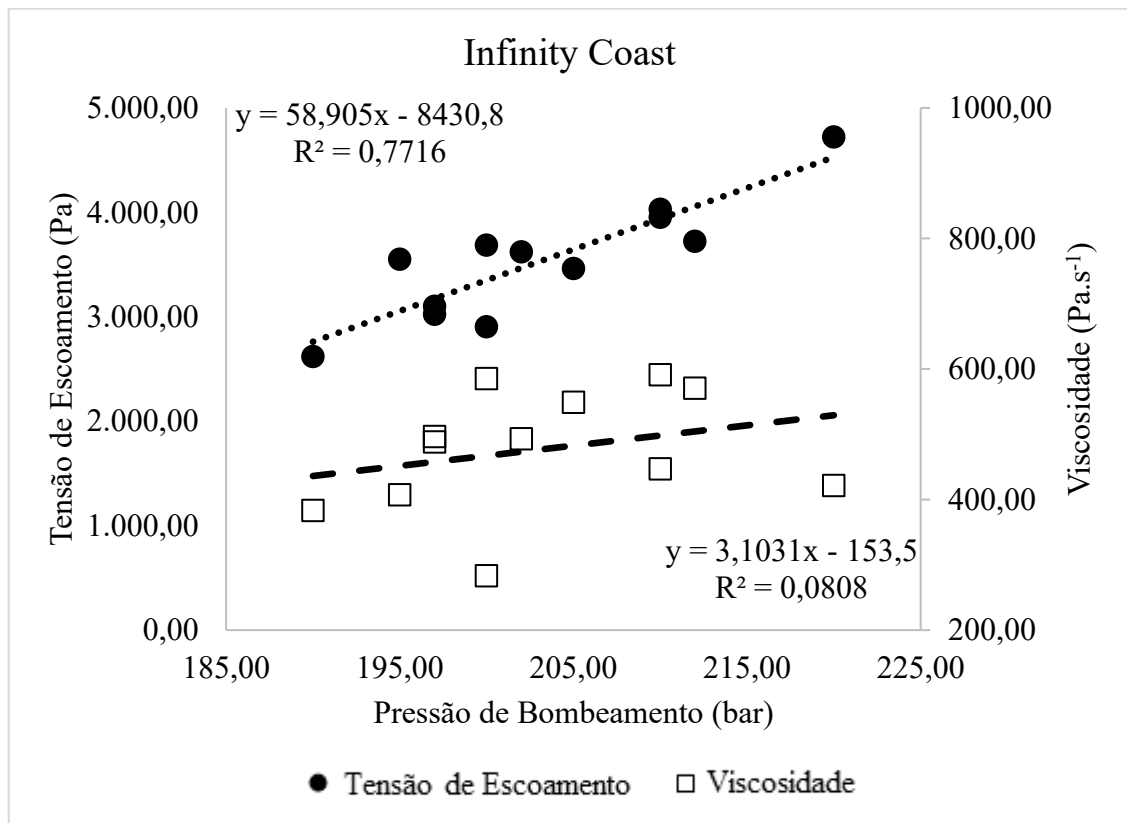
A Tabela 2 a seguir apresenta os resultados extraídos da campanha experimental executada durante a concretagem da laje do pavimento número 53 do edifício Infinity Coast, apresentada no item 3.1.1. São apresentados os valores obtidos de índice de abatimento (Slump), medida de espalhamento, tensão de escoamento, viscosidade e pressão de bombeamento dos concretos analisados.

Tabela 2 – Resultados Campanha Experimental Infinity Coast

Identificação Concreto	Slump (mm)	Espalhamento (mm)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s ⁻¹)	Pressão de Bombeamento (Bar)
I1	230	420	4724,40	422,28	220,00
I2	225	410	3690,30	586,07	200,00
I3	210	360	3957,00	447,37	210,00
I4	225	360	2908,40	283,60	200,00
I5	230	430	3554,30	407,69	195,00
I6	220	370	3466,80	549,63	205,00
I7	225	390	4031,60	591,90	210,00
I8	230	400	3105,20	488,74	197,00
I9	220	400	3625,00	493,56	202,00
I10	225	370	3028,10	497,17	197,00
I11	235	430	2623,60	384,05	190,00
I12	220	380	3726,20	571,36	212,00

A Figura 24 a seguir apresenta a relação obtida entre a tensão de escoamento e a viscosidade dos concretos com a pressão de bombeamento exigida ao sistema de bombeamento.

Figura 24 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast



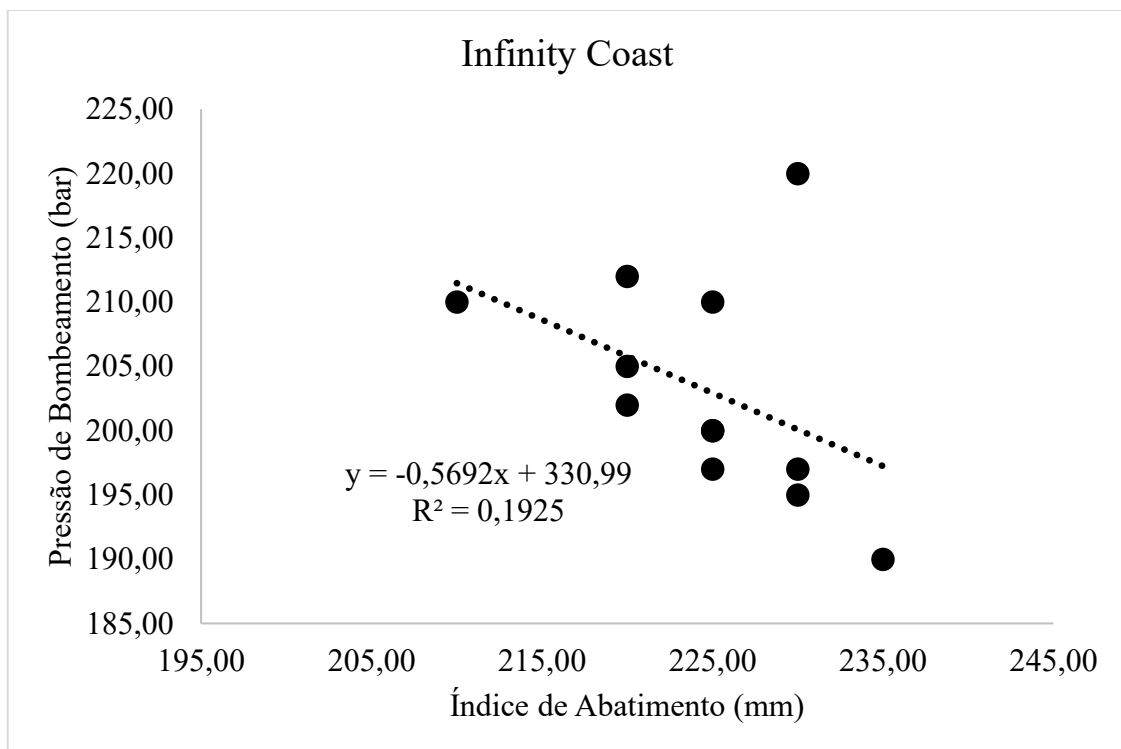
De posse dos valores individuais de tensão de escoamento e pressão de bombeamento é verificado que com uma significância de 99,98%, há uma forte relação entre a pressão de bombeamento e a tensão de escoamento do concreto bombeado ($t=5,81$).

Em relação à viscosidade, o grau de significância anteriormente observado não se repete, apresentando apenas índice de 62,95% ($t=0,94$), indicando que no caso em questão pode haver alguma relação entre a viscosidade e a pressão de bombeamento.

Na Figura 24 fica evidenciado que os concretos de menor tensão de escoamento e parâmetro de viscosidade acabaram por demandar menor pressão ao sistema de bombeamento, apesar de que em contrapartida o concreto de maior tensão de escoamento e nem tão alto nível de viscosidade (para a amostra em questão) demandou a maior pressão de bombeamento.

A Figura 25 a seguir apresenta a relação entre a pressão de bombeamento e índice de abatimento, ensaio comumente utilizado para a determinação da conformidade dos concretos no recebimento em obra.

Figura 25 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Infinity Coast

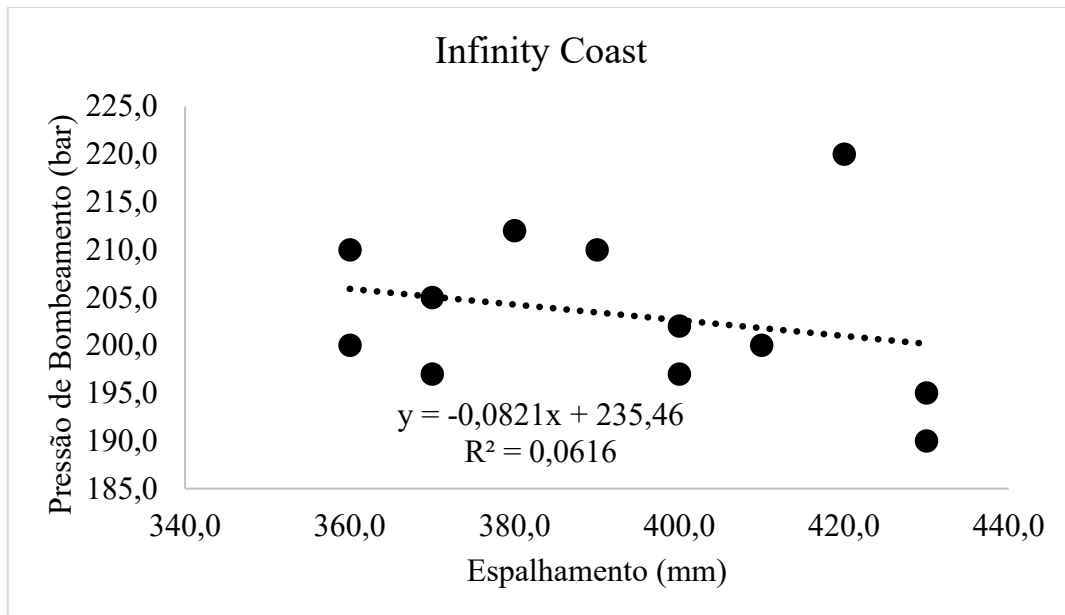


Apesar do baixo coeficiente de correlação, ao analisar a significância das relações podemos verificar que com 84,64% de confiabilidade há relação entre o índice de abatimento e a pressão de bombeamento do sistema ($t=1,54$).

Verificamos assim que há uma tendência de comportamento onde os concretos de maior índice de abatimento acabaram por demandar uma menor pressão de bombeamento ao sistema de maneira geral nessa campanha.

A Figura 26 a seguir apresenta a pressão de bombeamento ao ser relacionada ao espalhamento medido em obra.

Figura 26 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Infinity Coast



Em dissonância ao ensaio de abatimento o ensaio de espalhamento não apresentou relações tão significativas (56,32%) com a pressão de bombeamento do sistema ($t=0,81$) quanto as anteriormente obtidas.

A Tabela 3 a seguir sintetiza a significância encontrada para os parâmetros do estudo ao serem relacionados à pressão de bombeamento demandada ao sistema de bombeamento na campanha experimental em questão.

Tabela 3 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Infinity Coast

Relação	Graus de Liberdade	Significância	t	Erro	
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	10	99,9830%	5,81	4,26 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	10	62,9461%	0,94	8,55 (bar)
Slump	Pressão de Bombeamento	10	84,6428%	-1,54	8,02 (bar)
Espalhamento	Pressão de Bombeamento	10	56,3223%	-0,81	8,64 (bar)

Verifica-se assim que o parâmetro de tensão de escoamento na campanha em questão apresentou a maior significância em relação a pressão de bombeamento requerida ao sistema de bombeamento para a campanha experimental em questão.

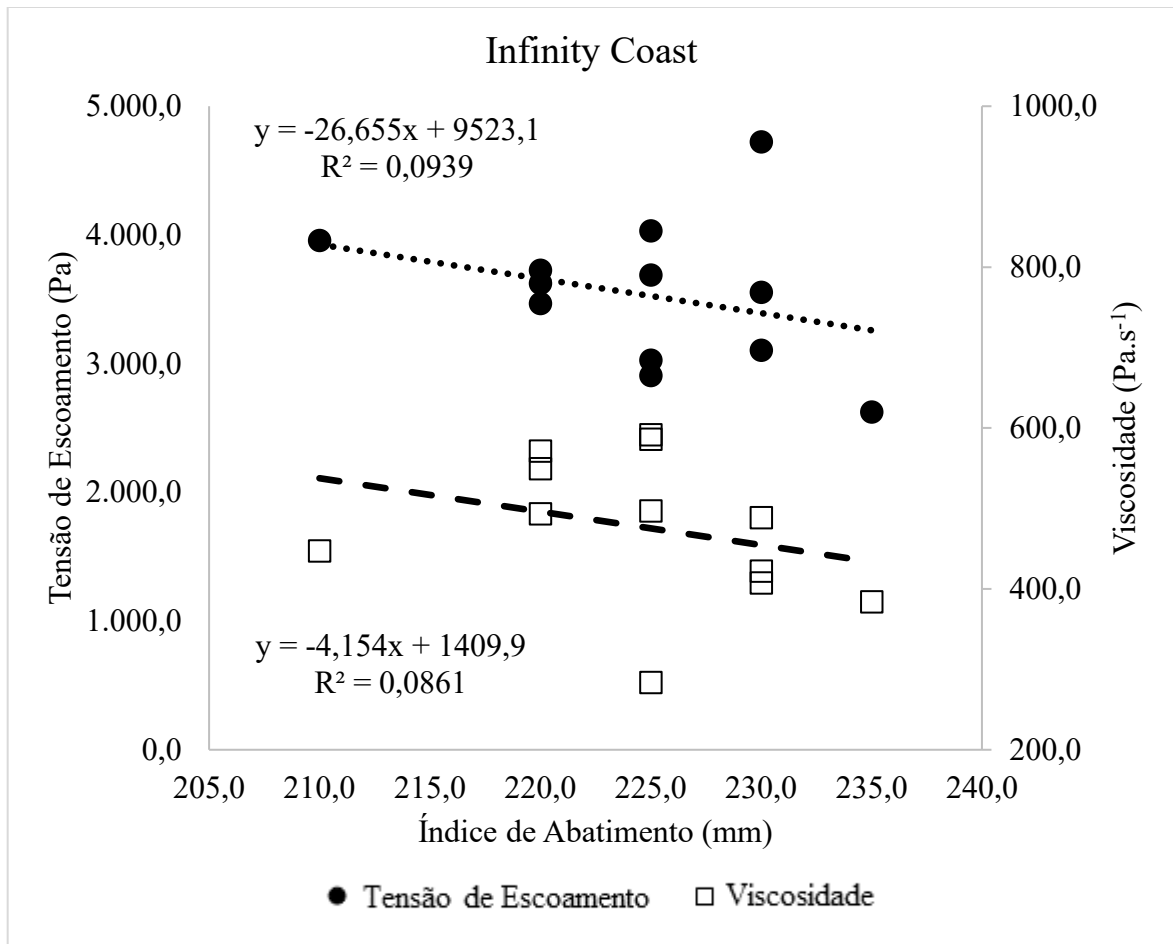
O parâmetro de viscosidade por sua vez, não apresentou um nível de significância tão elevado ao ser relacionado com a pressão de bombeamento no intervalo de variação do estudo.

Dentre os ensaios tecnológicos o índice de abatimento (slump) teve maior grau de significância em comparação ao índice de espalhamento na campanha em questão.

4.1.1.1.1 Ensaios Tecnológicos x Propriedades Reológicas – Infinity Coast

A Figura 27 a seguir busca correlacionar resultados do ensaio de abatimento com as propriedades reológicas dos concretos, visando obter uma forma de estimar em campo tais propriedades.

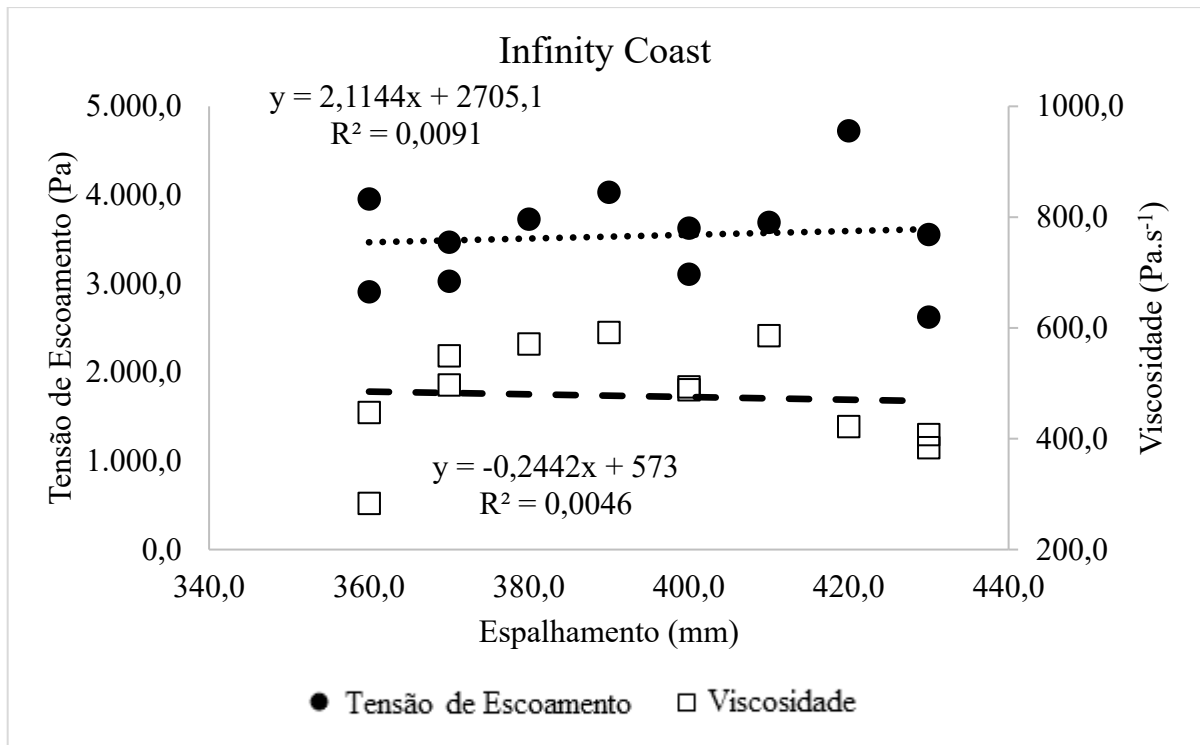
Figura 27 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast



Para a tensão de escoamento, obteve-se uma significância de 66,73% ($t=1,02$), já para a viscosidade o índice de significância foi de 64,53% ($t=0,97$), apresentando assim algum grau de relação com o resultado do ensaio de abatimento.

Semelhante ao executado acima, a Figura 28 a seguir correlaciona os resultados da medida de espalhamento com as propriedades reológicas dos concretos.

Figura 28 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Infinity Coast



Diferentemente dos resultados das relações realizadas com o índice de abatimento não houve significância suficiente para indicar qualquer grau de relação entre o resultado da medida de espalhamento com a tensão de escoamento ($t=0,30$) ou com a viscosidade dos concretos em estudo ($t=0,21$).

A Tabela 4 a seguir sintetiza as análises de significância realizadas na etapa de correlação de ensaios tecnológicos na busca de correlação com parâmetros reológicos.

Tabela 4 – Análise da Significância Ensaio Tecnológico – Infinity Coast

Relação	Graus de Liberdade	Significância	t	Erro	
Slump	Tensão de Escoamento	10	66,734%	-1,02	569,39 (Pa)
Slump	Viscosidade	10	64,528%	-0,97	93,09 (Pa.s ⁻¹)
Espalhamento	Tensão de Escoamento	10	23,167%	0,30	595,45 (Pa)

Espalhamento	Viscosidade	10	16,535%	-0,21	97,15 (Pa.s ⁻¹)
--------------	-------------	----	---------	-------	-----------------------------

Diante dos resultados verifica-se que na campanha experimental executada no edifício Infinity Coast o ensaio de abatimento apresentou maior significância em comparação à determinação do parâmetro de espalhamento em relação aos parâmetros reológicos.

4.1.1.2 Royal Tower

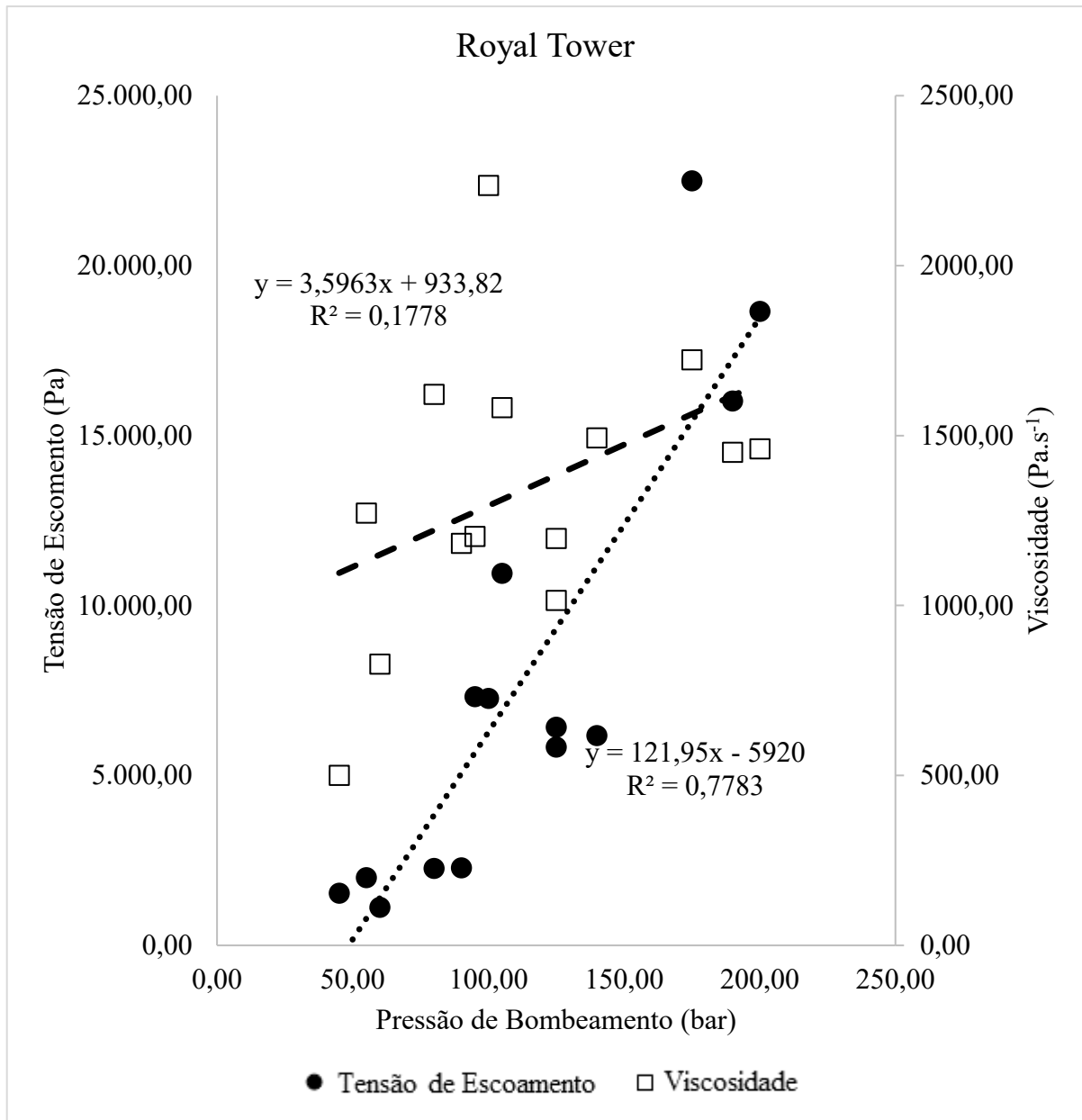
A Tabela 5 a seguir apresenta os resultados extraídos da campanha experimental executada durante a concretagem do bloco de fundação do edifício Royal Tower, item 3.1.2. São apresentados os valores obtidos de índice de abatimento, medida de espalhamento, tensão de escoamento, viscosidade e pressão de bombeamento dos concretos analisados. Em concretos autoadensáveis a medida de índice de abatimento (slump) não foi explorada por ser igual, ou muito próxima da altura do tronco de cone.

Tabela 5 – Resultados Campanha Experimental Royal Tower

Identificação Concreto	Slump (mm)	Espalhamento (mm)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s⁻¹)	Pressão de Bombeamento (Bar)
R1	-	650	1994,90	1272,30	55,00
R2	-	705	1123,30	828,28	60,00
R3	-	660	2269,40	1622,00	80,00
R4	-	630	2290,80	1183,50	90,00
R5	-	645	1544,40	501,29	45,00
R6	170	285	18657,00	1461,60	200,00
R7	235	430	7276,50	2236,90	100,00
R8	195	320	10955,00	1582,60	105,00
R9	220	400	7326,00	1204,00	95,00
R10	160	235	22501,00	1723,30	175,00
R11	195	300	16027,00	1451,30	190,00
R12	210	365	6426,50	1015,30	125,00
R13	240	465	5841,00	1197,80	125,00
R14	245	460	6181,00	1493,50	140,00

Com o enfoque na pressão de bombeamento, a Figura 29 a seguir apresenta relações destas com as propriedades reológicas de tensão de escoamento e viscosidade dos concretos analisados na campanha.

Figura 29 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Royal Tower

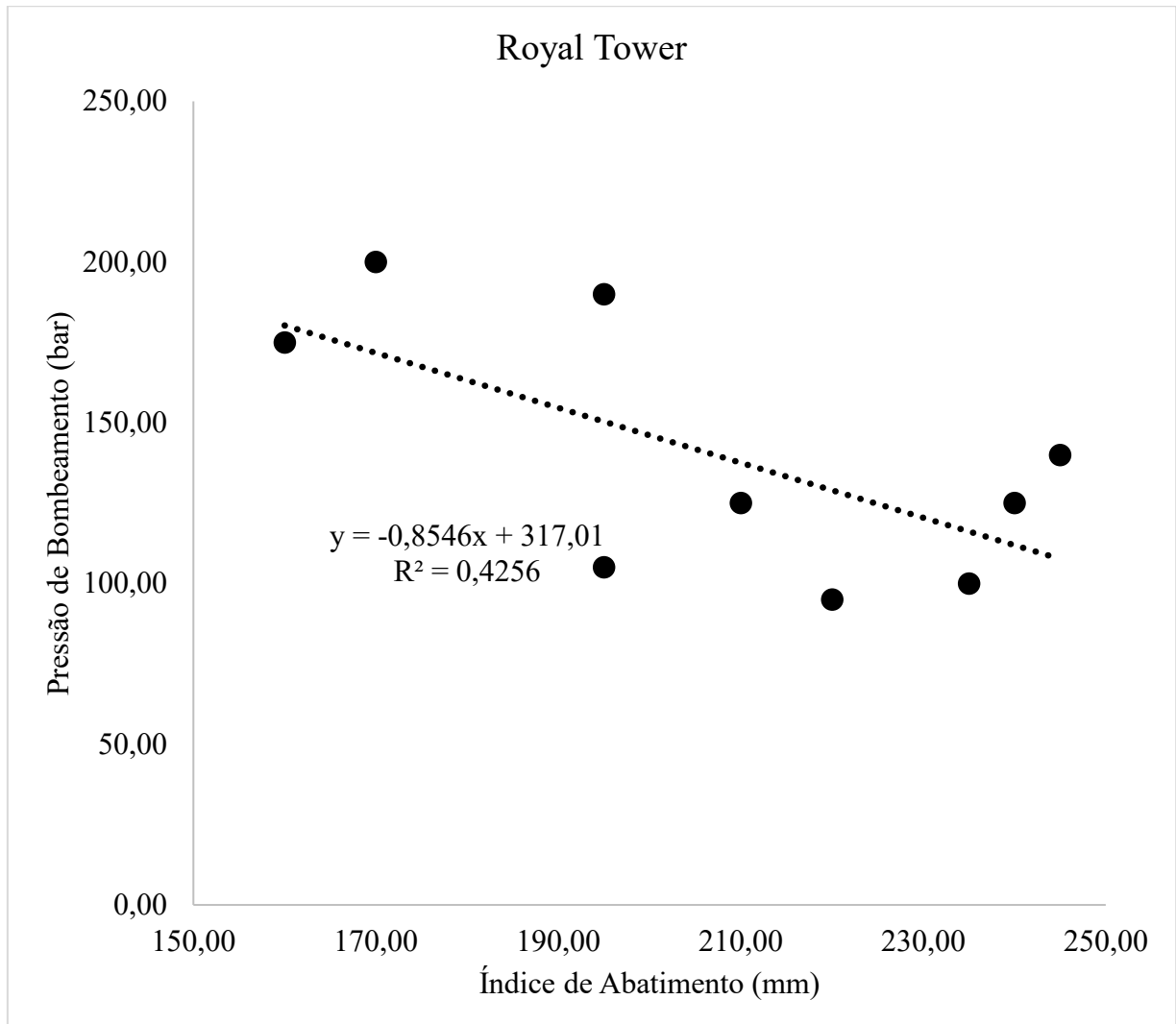


Com os valores individuais de tensão de escoamento e pressão de bombeamento determina-se que com uma significância de 99,997% há uma forte relação entre pressão de bombeamento e a tensão de escoamento do concreto bombeado, neste caso ainda mais acentuada do que a observada na campanha experimental do Infinity Coast ($t=6,49 > 5,81$).

Em relação à viscosidade, há um maior índice de significância com 86,68% de confiabilidade ($t=1,61$), também mais acentuada do que o observado na campanha anterior, indicando que há parcela de influência da viscosidade na pressão de bombeamento do sistema.

A Figura 30 a seguir apresenta a pressão de bombeamento ao ser relacionada ao índice de abatimento.

Figura 30 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Royal Tower

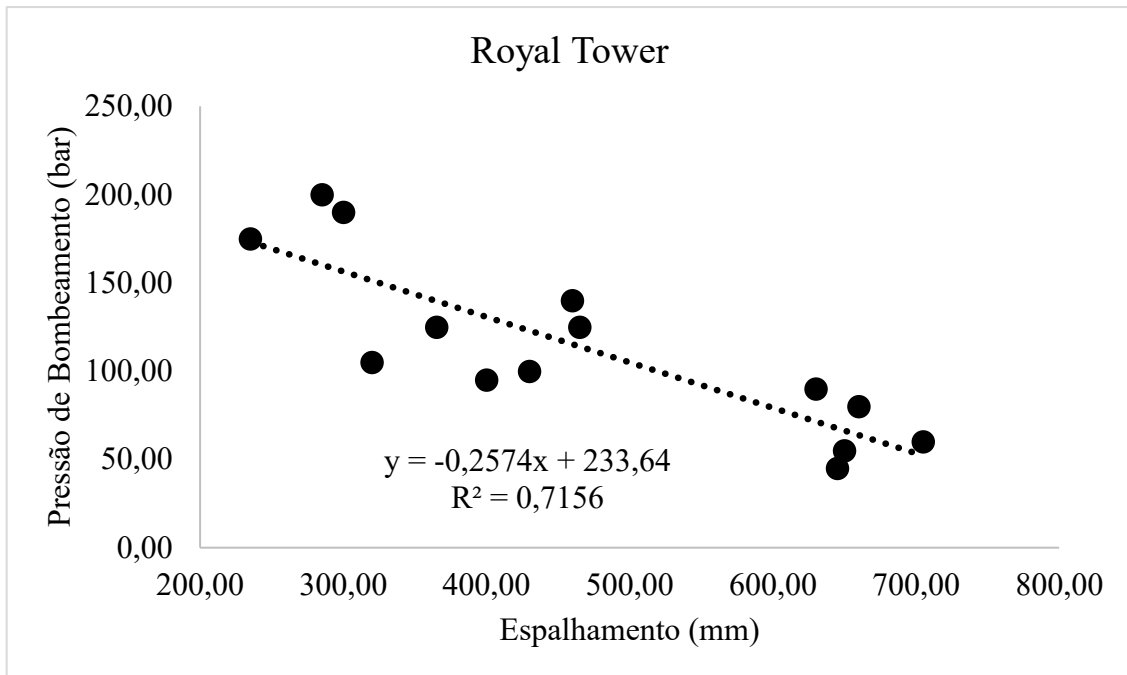


Com coeficiente de correlação superior ao observado na Figura 30, podemos também verificar que com significância de 94,32% há relação entre o índice de abatimento e a pressão de bombeamento do sistema ($t=2,28$) para a análise executada na presente campanha experimental. Havendo assim, uma relação mais intensa do que a outrora observada no estudo realizado no edifício Infinity Coast.

Podemos assim, novamente constatar que há uma tendência dos concretos de maior índice de abatimento virem a demandar um menor nível de pressão de bombeamento na campanha em questão.

A medida de espalhamento dos concretos também é correlacionada com a pressão de bombeamento demandada ao sistema de bombeamento na Figura 31 a seguir.

Figura 31 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Royal Tower



A relação outrora não identificada na análise baseada na Figura 28 do edifício Infinity Coast é observada no caso em questão, onde uma significância de 99,99% é encontrada entre o parâmetro de espalhamento e a pressão de bombeamento ($t=5,50$) exigida no bombeamento do concreto do bloco de fundação.

A Tabela 6 a seguir sintetiza as análises de significância realizadas na campanha experimental em relação à pressão de bombeamento.

Tabela 6 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Royal Tower

Relação	Graus de Liberdade	Significância	t	Erro	
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	12	99,9970%	6,49	24,06 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	12	86,6829%	1,61	46,33 (bar)
Slump	Pressão de Bombeamento	7	94,3152%	-2,28	32,18 (bar)
Espalhamento	Pressão de Bombeamento	12	99,9863%	-5,50	27,25 (bar)

Uma maior significância é encontrada na campanha experimental em questão para a análise de todos os parâmetros expostos.

Além do maior nível de significância – outrora já elevado na campanha experimental realizada no edifício Infinity – o mesmo sentido de inclinação do parâmetro de significância t

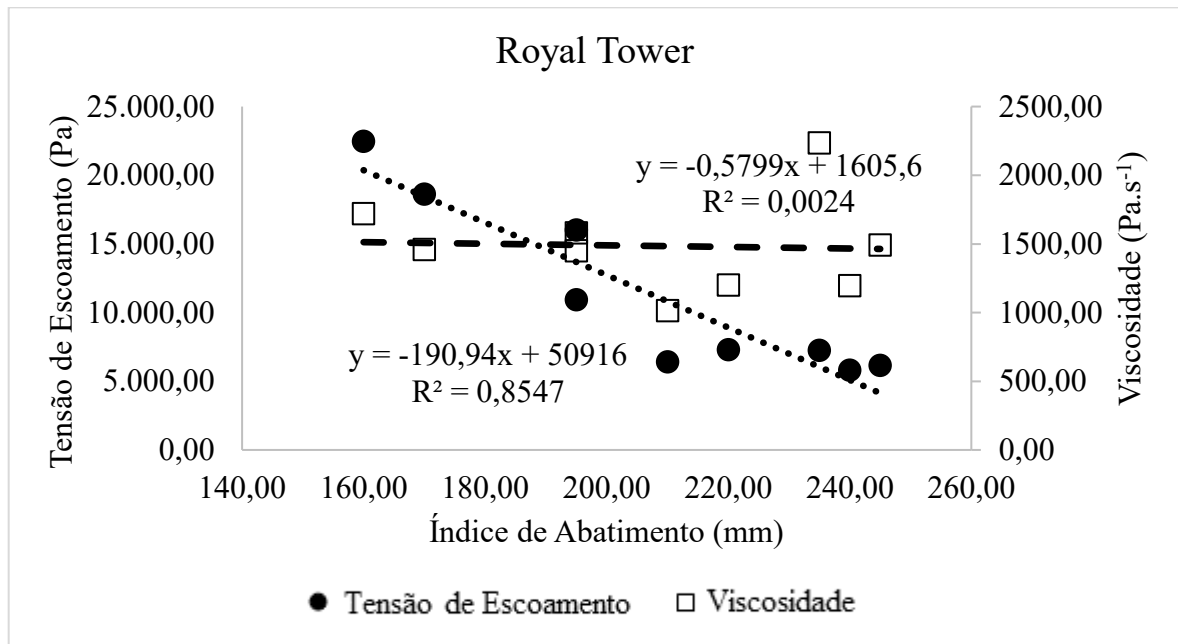
de Student foi observado, retificando a tendencia onde concretos de maior tensão de escoamento e viscosidade tendem a gerar uma maior pressão de bombeamento.

4.1.1.2.1 Ensaios Tecnológicos x Propriedades Reológicas – Royal Tower

Assim como o executado no edifício Infinity Coast, as medidas de ensaios usualmente executados para o recebimento de concretos em obra foram correlacionadas às propriedades reológicas dos concretos.

A Figura 32 a seguir apresenta as relações entre o índice de abatimento com as propriedades reológicas de tensão de escoamento e viscosidade.

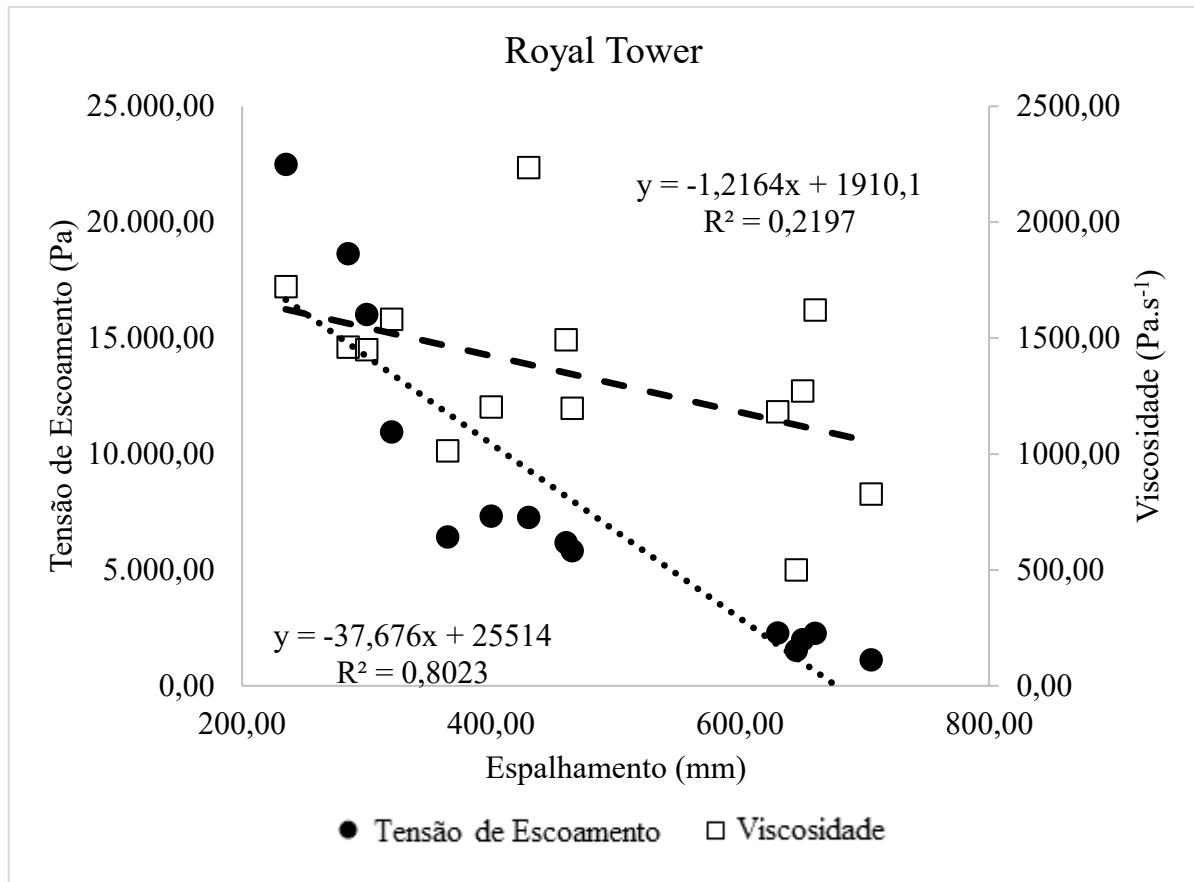
Figura 32 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Royal Tower



Diferentemente do baixo nível de significância encontrado para o parâmetro de tensão de escoamento na análise realizada na campanha do Infinity Coast, os ensaios realizados nas concretagens do Royal Tower apresentaram nível de significância na ordem de 99,99% para a relação de índice de abatimento e tensão de escoamento ($t=6,42$), mas não apresentaram níveis satisfatórios para a relação da viscosidade ($t=0,13$).

A Figura 33 a seguir relaciona a medida de espalhamento com as propriedades reológicas dos concretos da campanha realizada na concretagem do bloco de fundação do edifício Royal Tower.

Figura 33 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Royal Tower



Assim como o observado para o índice de abatimento a medida de espalhamento também apresentou significância de 99,999% ($t=6,98$) ao ser analisada em relação à tensão de escoamento.

Em relação a viscosidade, em dissonância ao observado na análise anteriormente realizada em função do índice de abatimento, apresentou significância de 90,91% ($t=1,84$) ao ser relacionada à medida de espalhamento.

A Tabela 7 a seguir sintetiza as análises de significância realizadas da relação de ensaios tecnológicos com parâmetros reológicos.

Tabela 7 – Análise da Significância Ensaios Tecnológicos – Royal Tower

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Slump	Tensão de Escoamento	7	99,9638%	-6,42	2552,21 (Pa)
Slump	Viscosidade	7	10,0343%	-0,13	380,42 (Pa.s ⁻¹)
Espalhamento	Tensão de Escoamento	12	99,9985%	-6,98	3140,82 (Pa)
Espalhamento	Viscosidade	12	90,909%	-1,84	384,95 (Pa.s ⁻¹)

Os resultados dos ensaios tecnológicos executados na campanha em questão apresentaram elevada significância para a relação com o parâmetro de tensão de escoamento, indicando que concretos com índice de abatimento elevado ou medida de espalhamento tende a ser um concreto de menor valor de tensão de escoamento.

4.1.1.3 Ponte Hercílio Luz

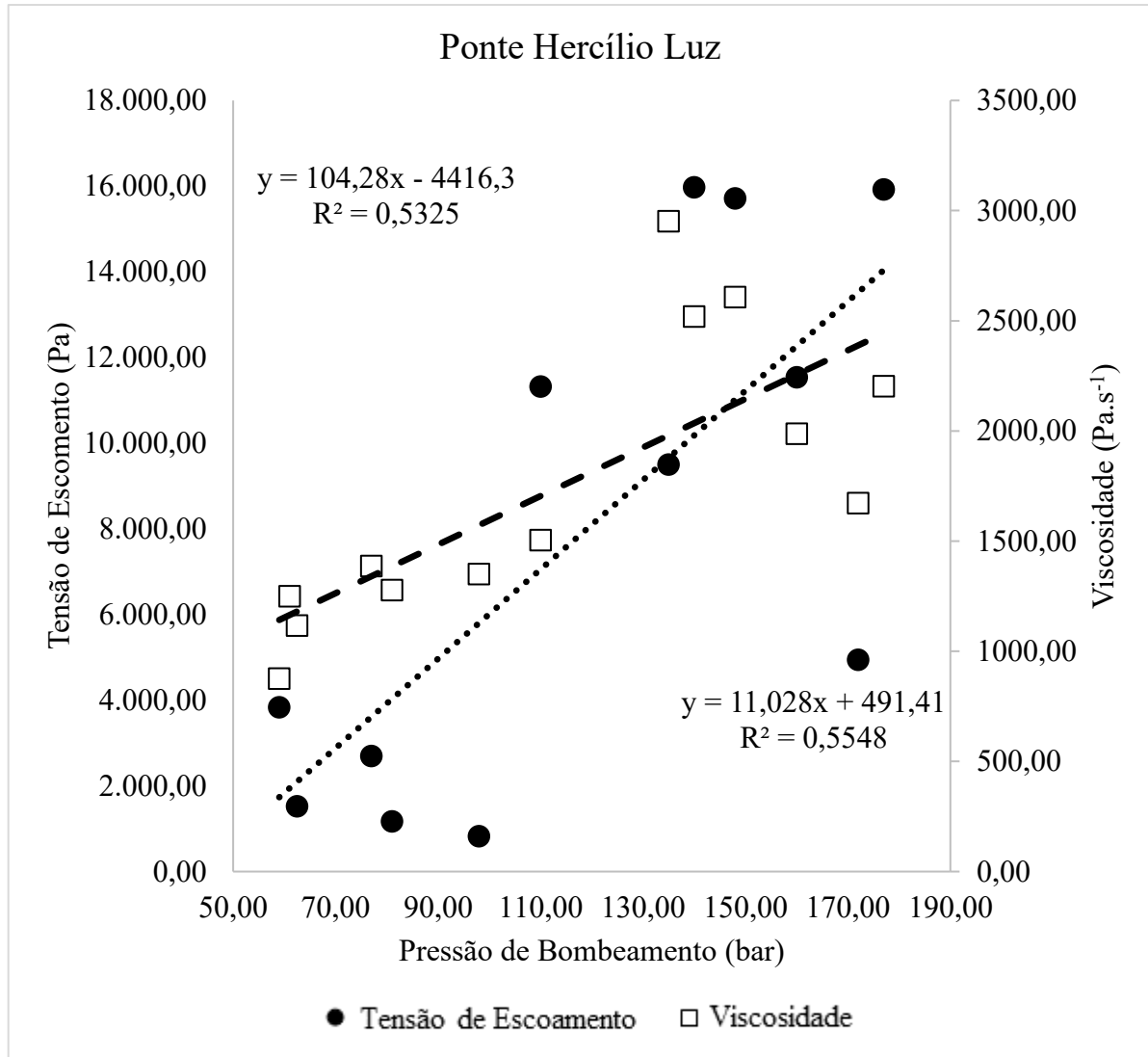
A Tabela 8 a seguir apresenta os resultados extraídos da campanha experimental executada durante a concretagem do bloco de ancoragem de cabos da parte continental da Ponte Hercílio Luz. São apresentados os valores obtidos de índice de abatimento, medida de espalhamento, tensão de escoamento, viscosidade e pressão de bombeamento dos concretos analisados, onde em pontos sem informação o ensaio especificado não foi realizado em função do tipo de concreto.

Tabela 8 – Resultados Campanha Experimental Ponte Hercílio Luz

Identificação Concreto	Slump (mm)	Espalhamento (mm)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s⁻¹)	Pressão de Bombeamento (Bar)
P1	-	700	3842,90	1250,80	61,00
P2	-	770	1174,30	876,72	59,00
P3	-	630	2701,70	1279,20	81,00
P4	-	715	1526,50	1387,40	77,00
P5	-	720	830,48	1117,50	62,50
P6	170	-	9502,80	1351,70	98,00
P7	200	-	15930,00	2952,30	135,00
P8	195	-	11326,00	2203,40	177,00
P9	220	-	4947,10	1504,80	110,00
P10	185	-	15979,00	1673,90	172,00
P11	200	-	11546,00	2521,00	140,00
P12	225	-	15718,00	1988,60	160,00
P13	195	-	11172,00	2608,30	148,00

Assim como realizado nas campanhas experimentais anteriores, a Figura 34 relaciona a pressão de bombeamento com as propriedades reológicas dos concretos utilizados na campanha experimental realizada na Ponte Hercílio Luz.

Figura 34 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz

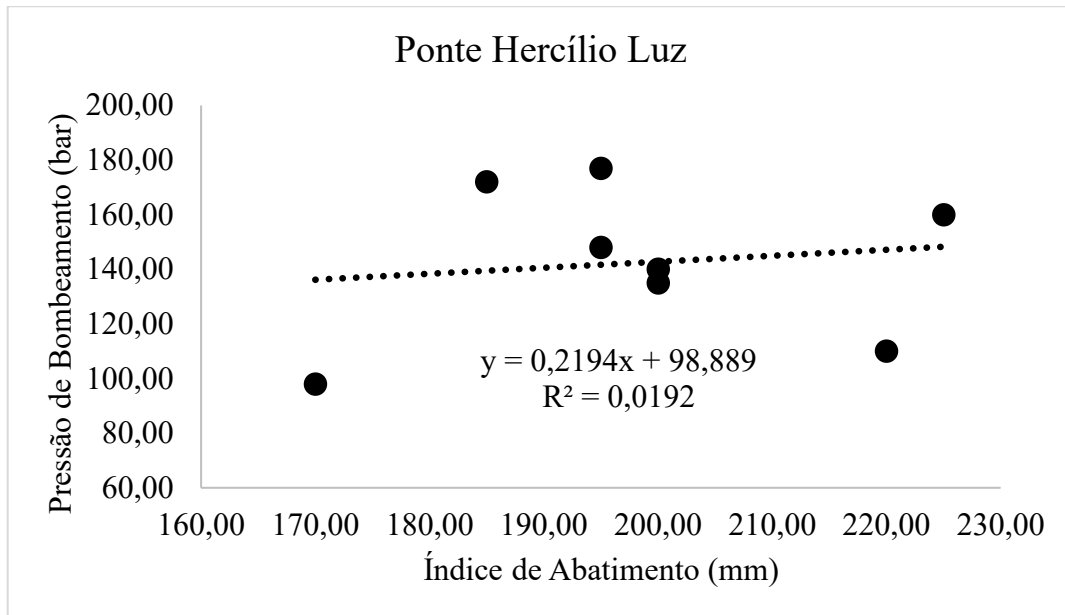


Com os valores individuais de tensão de escoamento e pressão de bombeamento há uma significância na ordem de 99,996% indicando uma forte relação entre a pressão de bombeamento e a tensão de escoamento do concreto bombeado, sendo o valor mais significativo observado nas três campanhas experimentais ($t=6,61$).

Assim como na análise da tensão de escoamento, a relação da pressão de bombeamento com a viscosidade apresentou uma forte maior significância com confiabilidade de 99,65% ($t=3,70$), indicando novamente que há parcela de influência da viscosidade na pressão de bombeamento, aqui mais acentuada que o observado na campanha experimental do Royal Tower.

A Figura 35 a seguir apresenta a pressão de bombeamento ao ser relacionada ao índice de abatimento.

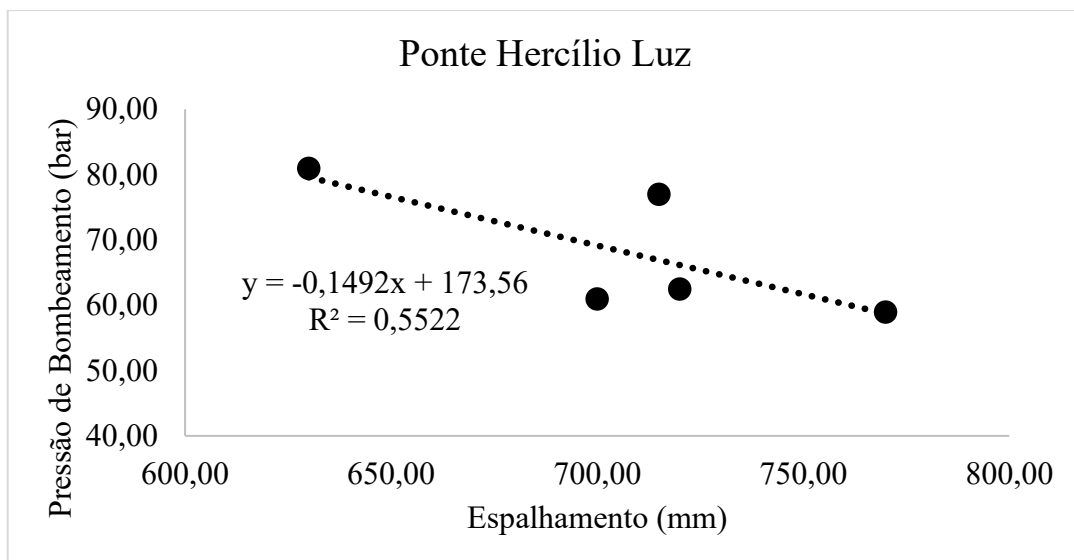
Figura 35 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento – Ponte Hercílio Luz



Diferentemente das demais campanhas experimentais realizadas, não houve relação significativa entre o índice de abatimento e a pressão de bombeamento demandada ao sistema de bombeamento ($t=0,34$).

A medida de espalhamento é correlacionada na Figura 36 a seguir com a pressão de bombeamento para os concretos da campanha em questão.

Figura 36 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento – Ponte Hercílio Luz



Assim como o observado na campanha experimental realizada no bloco de fundação do edifício Royal Tower, a medida de espalhamento apresentou maior significância ao ser relacionada a pressão de bombeamento com confiabilidade de 84,99% ($t=1,92$), em detrimento ao ensaio de abatimento.

Como realizado nas etapas anteriores, a Tabela 9 a seguir sintetiza as relações anteriormente apresentadas.

Tabela 9 – Análise da Significância de Student – Pressão de Bombeamento – Hercílio Luz

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	11	99,9962%	6,61	20,49 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	11	99,6512%	3,70	30,47 (bar)
Slump	Pressão de Bombeamento	6	25,6267%	0,34	29,97 (bar)
Espalhamento	Pressão de Bombeamento	3	84,9855%	-1,92	7,83 (bar)

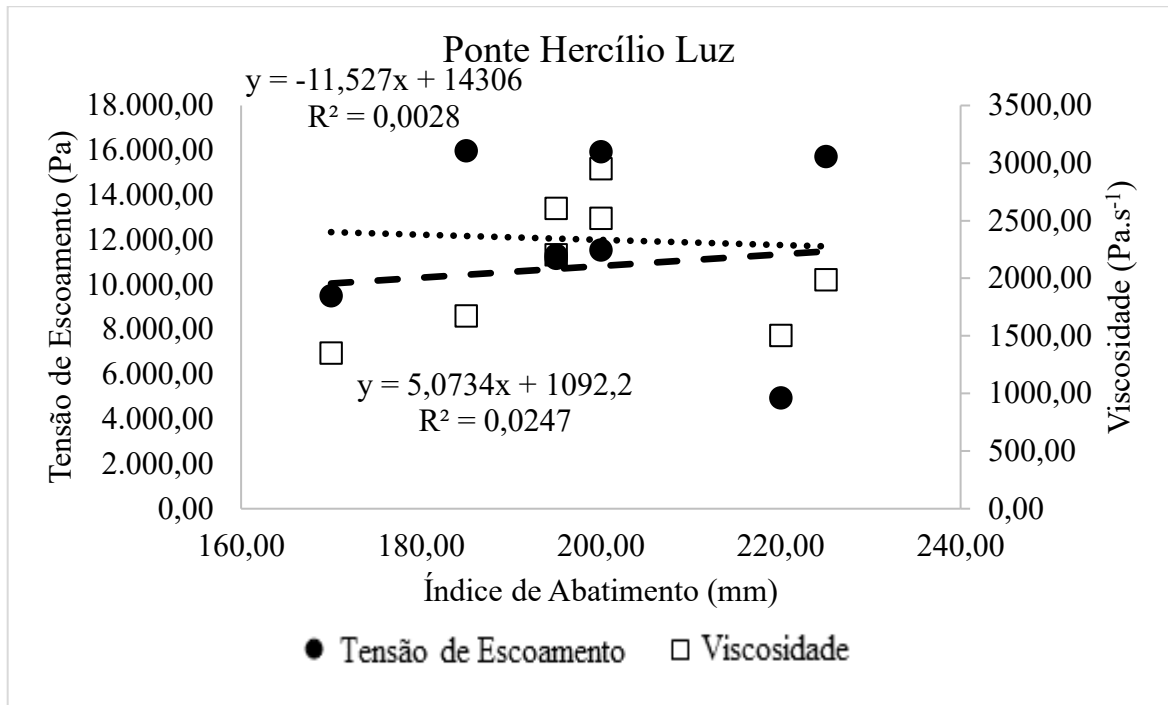
Nas campanhas anteriores houve resultados experimentais de ensaios tecnológicos onde a significância do ensaio de abatimento foi mais elevada e onde o de espalhamento foi mais significativo, na campanha em questão é apresentado uma relação em que o índice de abatimento não apresenta uma significância elevada e o espalhamento passa a apresentar uma maior significância para a pressão demandada no sistema.

Tem-se ao final das três campanhas experimentais realizadas que na análise do impacto da pressão de bombeamento há influência da tensão de escoamento e da viscosidade nesta.

4.1.1.3.1 Ensaios Tecnológicos x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz

Assim como realizado nas campanhas anteriores, a Figura 37 a seguir apresenta as relações entre o índice de abatimento com as propriedades reológicas de tensão de escoamento e viscosidade na campanha experimental realizada no bloco de coroamento continental da Ponte Hercílio Luz, item 3.1.3.

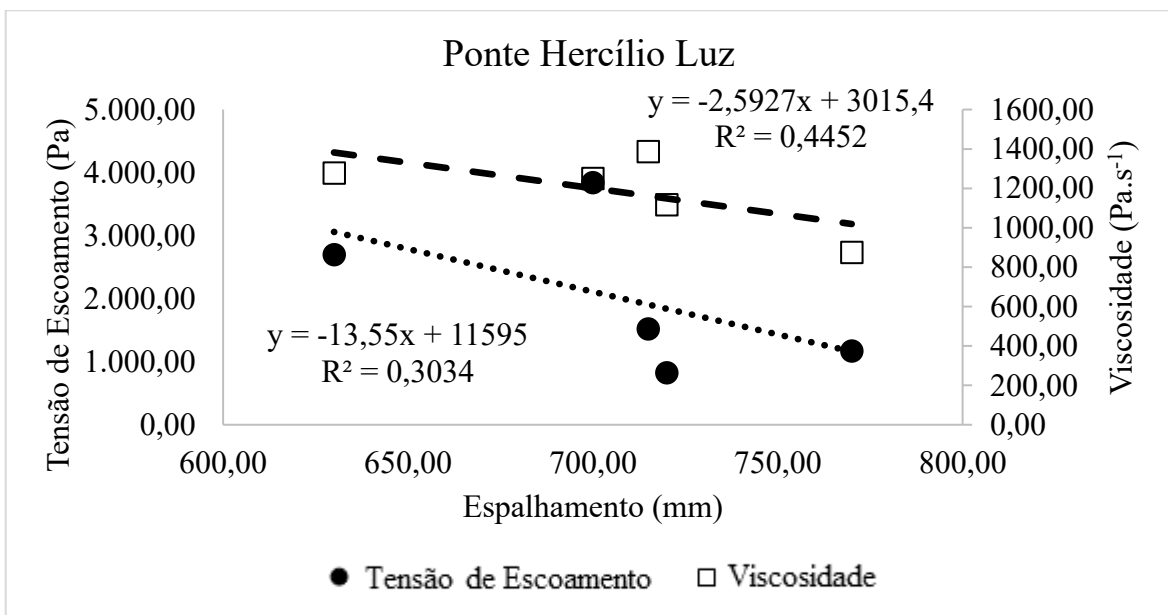
Figura 37 – Índice de Abatimento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz



Ao contrário do observado nas outras campanhas experimentais, o índice de abatimento não apresentou relação significativa com a tensão de escoamento ($t=0,13$) nem com a viscosidade ($t=0,39$) dos concretos analisados na campanha em questão.

Assim como realizado para o índice de abatimento, a Figura 38 a seguir apresenta a relação da medida de espalhamento com as propriedades reológicas dos concretos da campanha em questão.

Figura 38 – Medida de Espalhamento x Propriedades Reológicas – Ponte Hercílio Luz



Diferentemente do observado para o índice de abatimento a medida de espalhamento também apresentou alguma significância ao ser comparada com os parâmetros reológicos de tensão de escoamento ($t=1,14$) e viscosidade ($t=1,55$), apresentando significância de 66,40% para a tensão de escoamento e 78,14% para a viscosidade.

A Tabela 10 a seguir sintetiza as análises de significância das relações de ensaios tecnológicos com parâmetros reológicos.

Tabela 10 – Análise da Significância Ensaios Tecnológicos – Ponte Hercílio Luz

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Slump	Tensão de Escoamento	6	9,9696%	-0,13	4125,81 (Pa)
Slump	Viscosidade	6	28,9778%	0,39	608,91 (Pa.s ⁻¹)
Espalhamento	Tensão de Escoamento	3	66,4012%	-1,14	1196,12 (Pa)
Espalhamento	Viscosidade	3	78,140%	-1,55	168,62 (Pa.s ⁻¹)

4.1.2 Análise Global

Concluídas as análises individuais de cada campanha experimental tem-se que, as propriedades reológicas do concreto têm influência na demanda de pressão do sistema de bombeamento, e ora são relacionáveis a resultados de ensaios tecnológicos e outrora não obtiveram significância nas relações.

Assim, o presente item do trabalho tem como objetivo ampliar as relações anteriormente analisadas individualmente buscando potencializar as relações anteriormente executadas de forma individual de forma global, conforme metodologia apresentada em 3.2.2.

A Tabela C, apresentada no Apêndice B da presente dissertação exemplifica todos os resultados utilizados nas representações gráficas e análises de significância de Student no presente item.

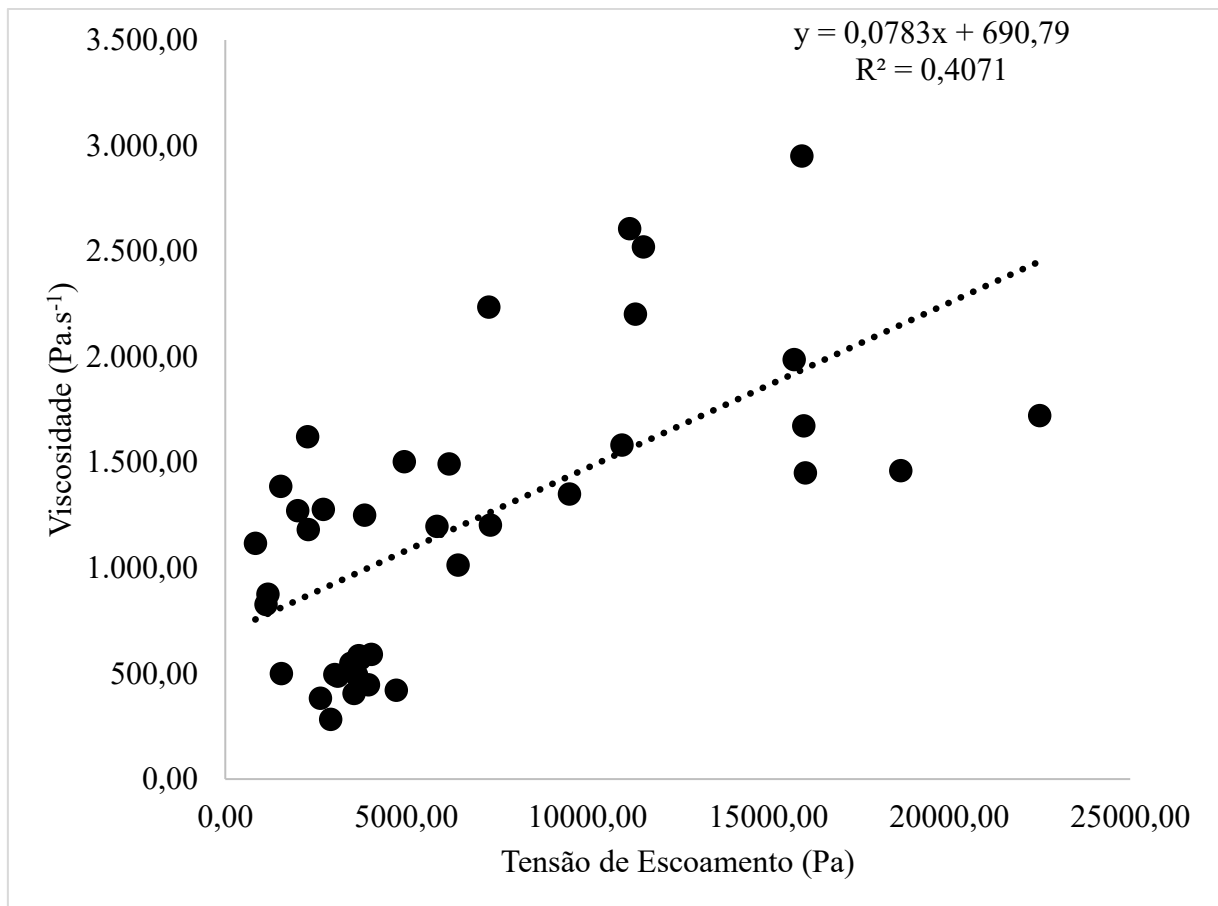
Em 4.1.2.1, são apresentados e discutidos resultados relacionados as características reológicas do concreto, em 4.1.2.2 a influência do sistema de bombeamento na demanda de pressão e em 4.1.2.3 o impacto das propriedades reológicas em um sistema de bombeamento normalizado.

4.1.2.1 Propriedades Reológicas

Conforme apresentado anteriormente, todas as considerações aqui realizadas são executadas em função do programa experimental adotado e tem seu resultado expresso de forma global no Apêndice B da presente dissertação.

A Figura 39 a seguir inicia as relações globais tratando da relação existente entre tensão de escoamento e viscosidade dos concretos no estudo.

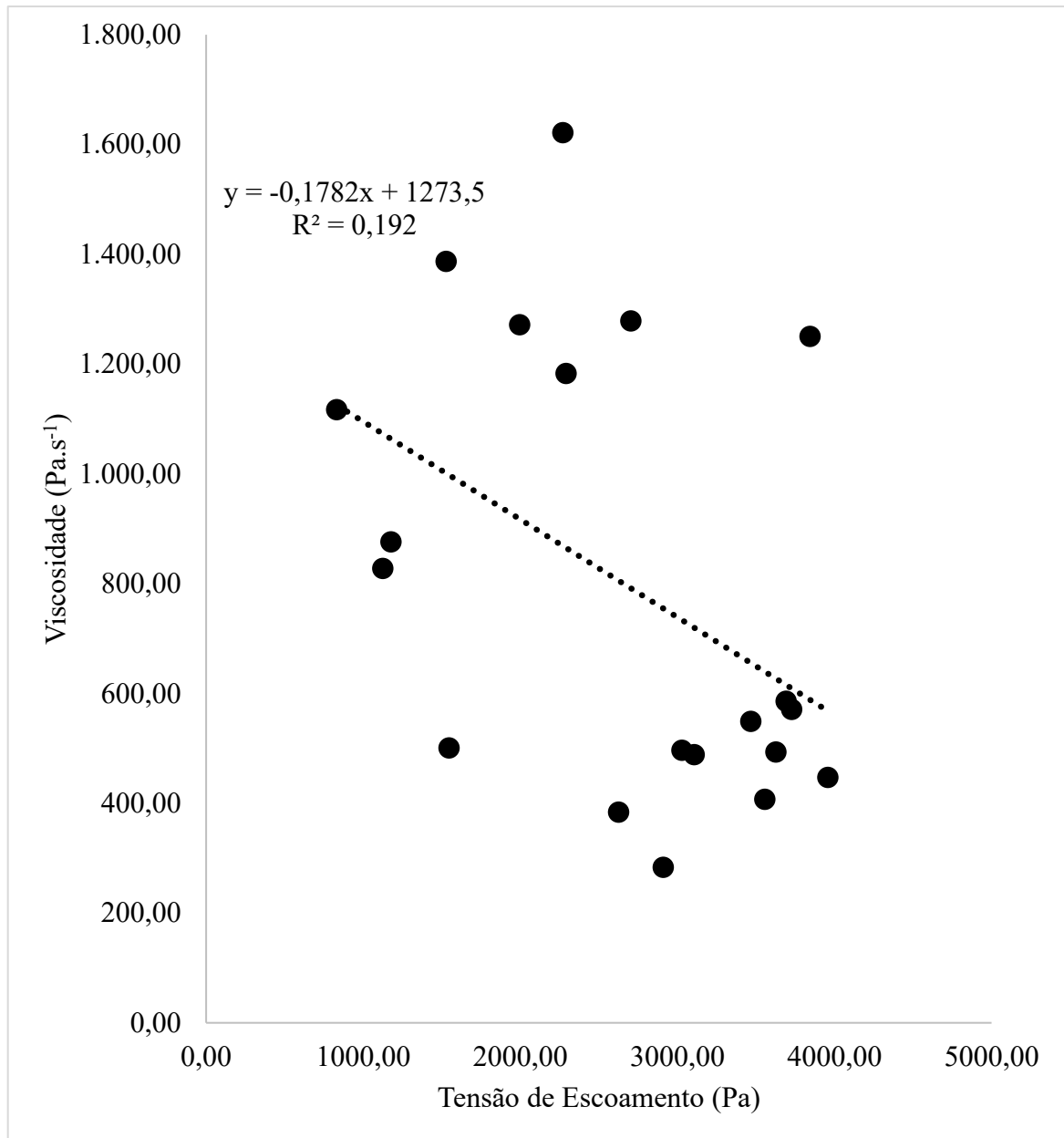
Figura 39 – Tensão de Escoamento x Viscosidade – Análise Global



De forma geral, concretos de maior valor de tensão de escoamento acabaram por apresentar um maior valor de parâmetro de viscosidade.

Tal relação, entretanto, é realizada com toda a amostra experimental do trabalho e é realizada em concretos comerciais, na Figura 40 a seguir se é reduzida a análise a uma mesma faixa de tensão de escoamento verificando a não manutenção e interdependência destes valores de forma absoluta.

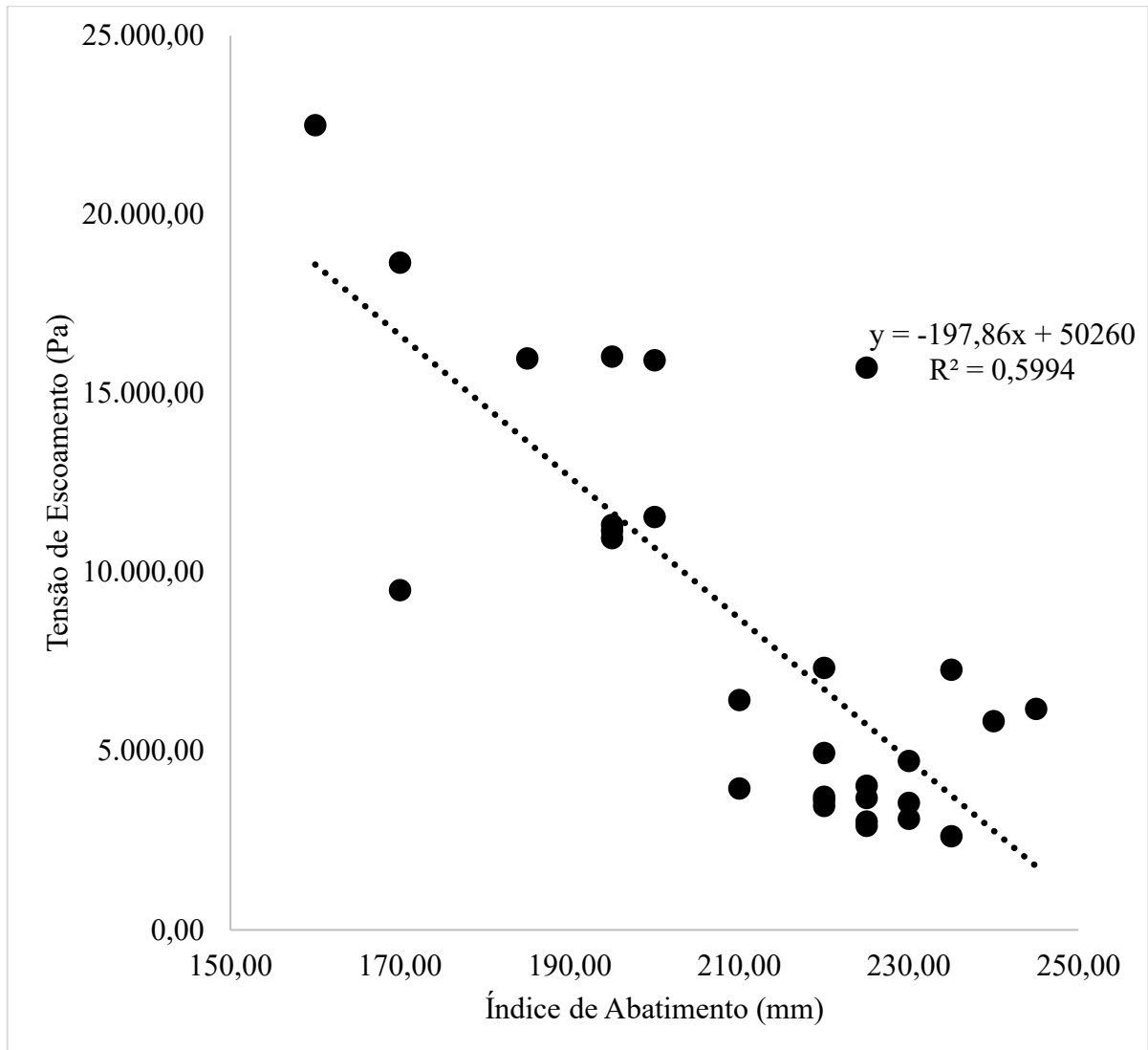
Figura 40 – Tensão de Escoamento x Viscosidade – Menores Valores Tensão de Escoamento



Ao delimitar os resultados do estudo a metade inferior de tensão de escoamento – intervalo de 830 Pa à 3957 Pa – podemos verificar que a relação se inverte, e apesar da forte significância nas relações, a mudança na inclinação do parâmetro t de Student – $t = 5,04$ para $t = -2,07$ – vem a demonstrar que tal interdependência fixa não é verdadeira.

Constatada a interdependência da pressão de bombeamento aos parâmetros reológicos em um mesmo sistema de bombeamento, a Figura 41 a seguir busca relacionar todos os resultados de ensaio de determinação de índice de abatimento com o parâmetro de tensão de escoamento.

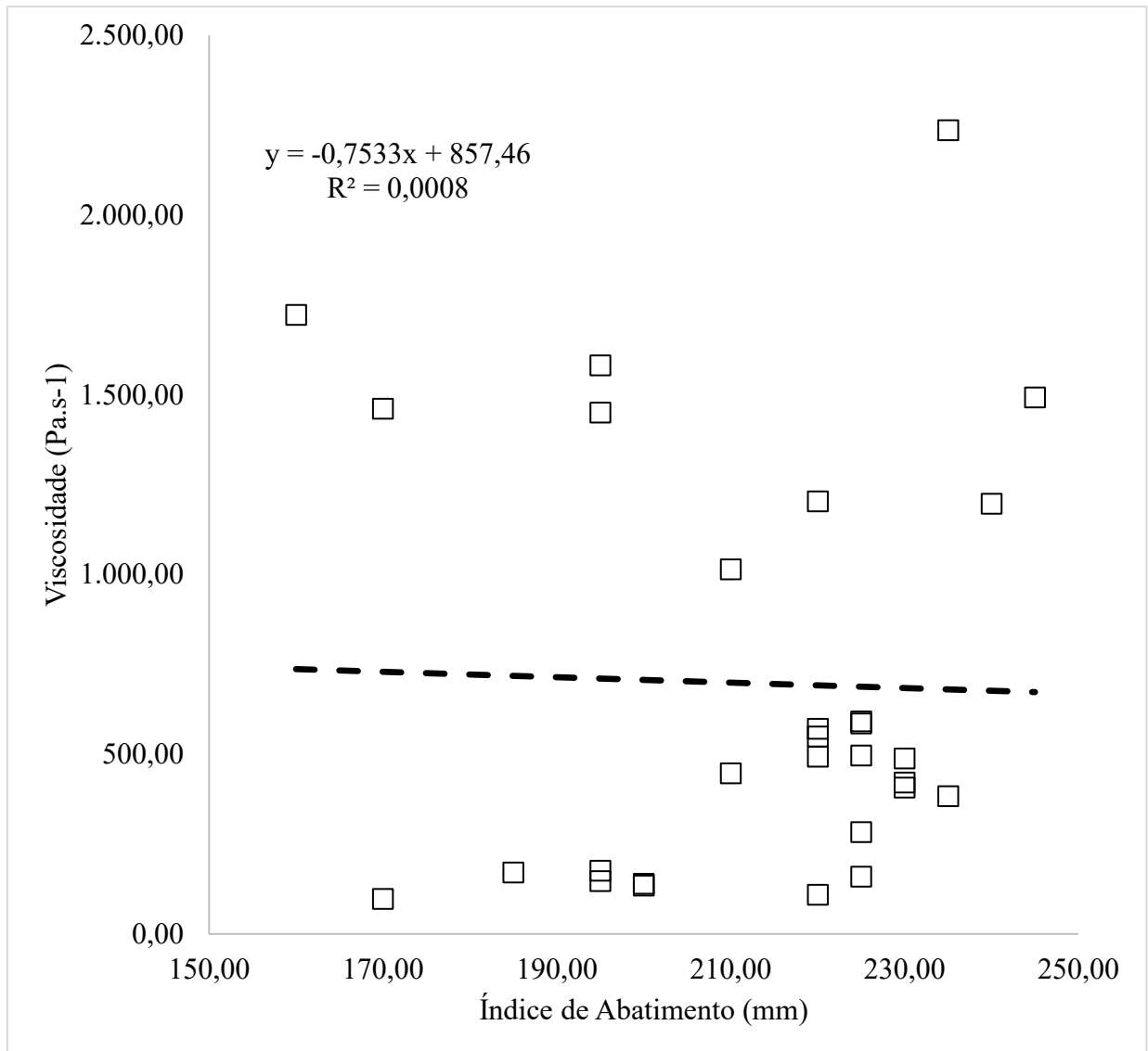
Figura 41 – Índice de Abatimento x Tensão de Escoamento



Com uma significância na ordem de 99,9999% é possível afirmar estatisticamente de forma global que há relação entre o índice de abatimento do concreto com a tensão de escoamento onde concretos de maior índice de abatimento tendem a ter um menor valor de tensão de escoamento.

Na Figura 42 a seguir, a mesma relação anteriormente executada para avaliar a influência do índice de abatimento na tensão de escoamento é realizada com o enfoque na viscosidade do concreto.

Figura 42 – Índice de Abatimento x Viscosidade



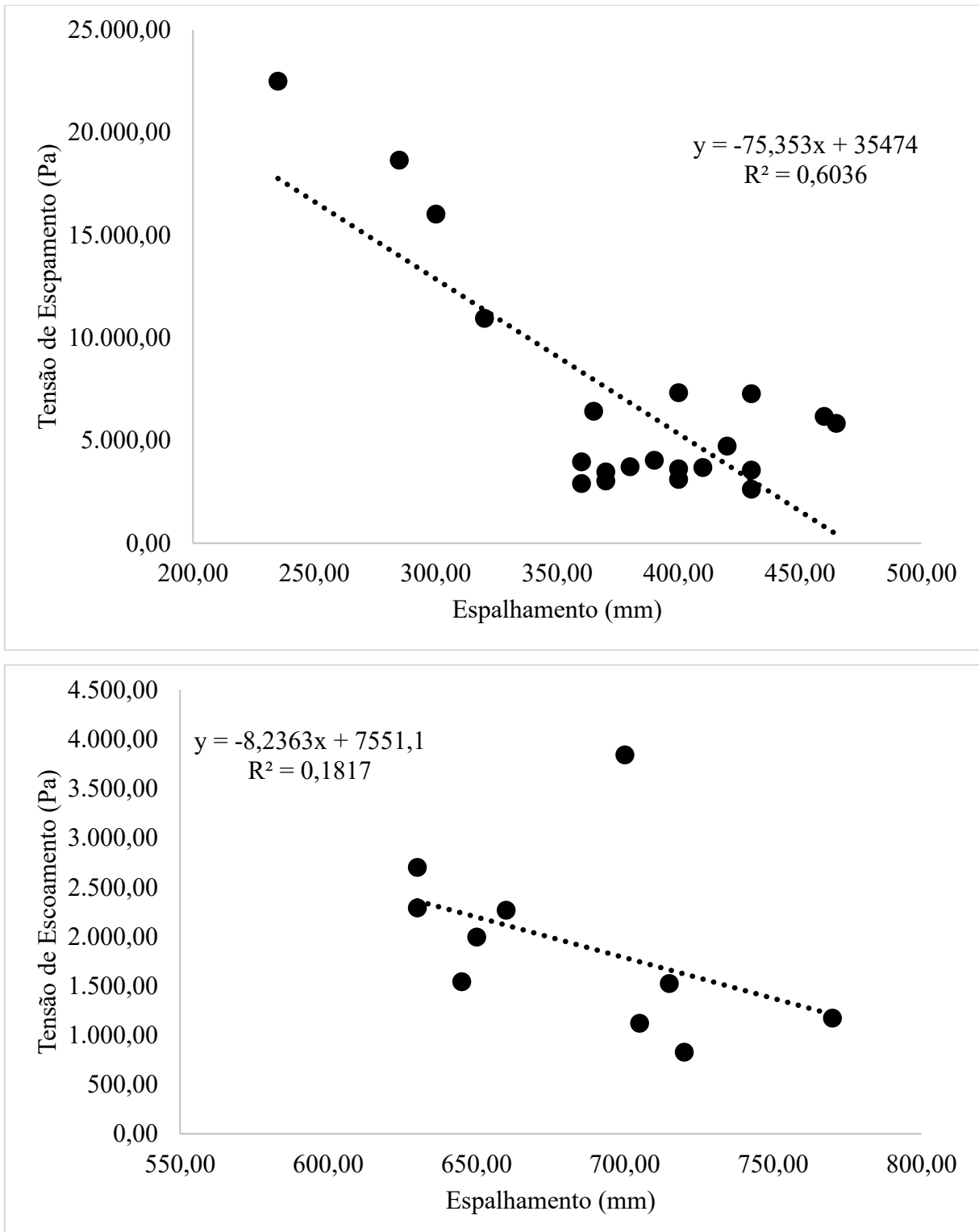
Diferentemente do resultado obtido para a tensão de escoamento a relação entre índice de abatimento e viscosidade acaba gerando uma menor significância nas relações, indicando que, o índice de abatimento se correlacionado a alguma propriedade reológica, tem uma maior significância ao ser comparado com a tensão de escoamento.

Tais resultados supracitados corroboram para a análise de que, concretos de índice de abatimento menor, tendem a demandar uma menor pressão de bombeamento por acabarem sendo concretos de maneira geral de menor tensão de escoamento.

A mesma relação executada usando a medida de abatimento é explorada a seguir com a medida de espalhamento nas figuras a seguir.

A Figura 43 explora a relação da medida de espalhamento com a tensão de escoamento, sendo a Figura 43 “a” em concretos com espalhamento menor que 500mm e a Figura 43 “b” apenas com concretos de índice superior a 500mm.

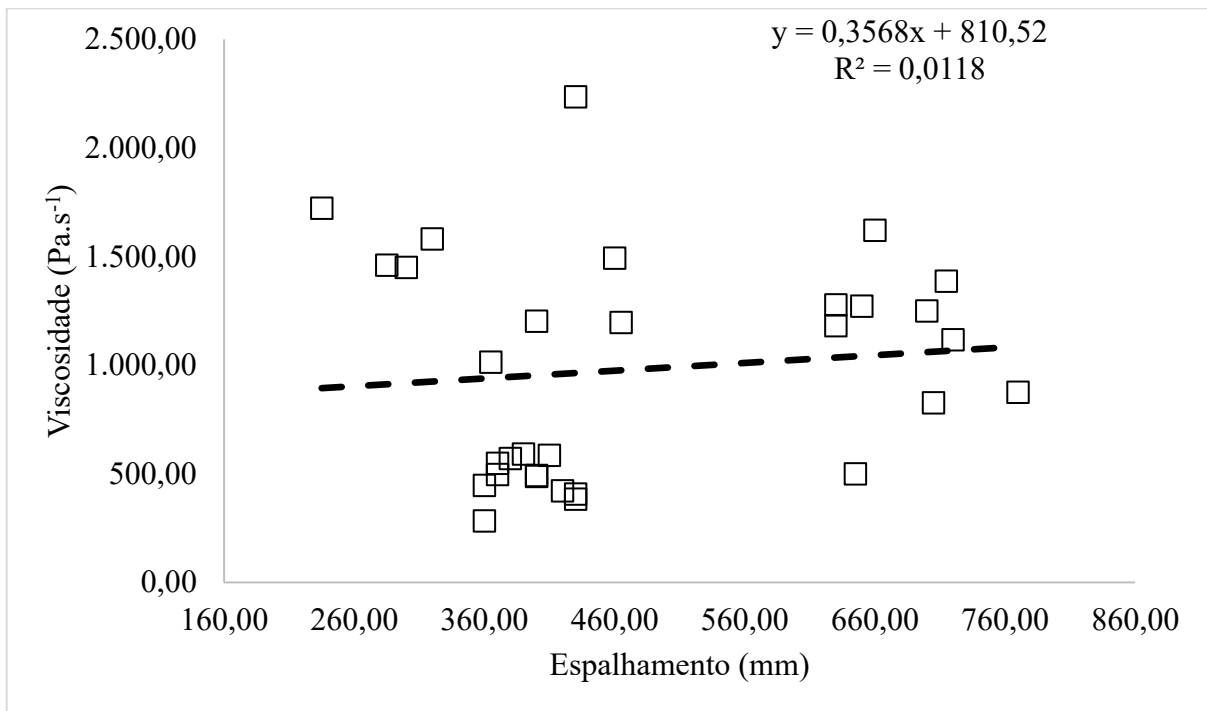
Figura 43 – Medida de Espalhamento x Tensão de Escoamento – a) Concretos de até 500 mm de espalhamento; b) Concretos com mais de 500mm de abatimento



Assim como na análise realizada em relação ao índice de abatimento, a medida de espalhamento também apresentou uma relação muito forte com o parâmetro de tensão de escoamento, motivo este em que nas campanhas experimentais do Royal Tower e da Ponte Hercílio Luz também acabou apresentando uma boa relação com a pressão de bombeamento.

A Figura 44 a seguir expande a análise da medida de espalhamento relacionando-a ao parâmetro de viscosidade.

Figura 44 – Medida de Espalhamento x Viscosidade



Com o enfoque na significância na relação da medida de espalhamento com o parâmetro de viscosidade dos concretos, na análise realizada não houve uma forte tendência de influência do espalhamento na viscosidade dos concretos, ao contrário do observado no ensaio de abatimento e na análise voltada ao parâmetro de tensão de escoamento.

A Tabela 11 a seguir traz a síntese das análises realizadas trazendo o grau de significância de Student das relações exploradas no presente item.

Tabela 11 – Análise de Significância Ensaio Tecnológico – Análise Global

Relação	Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Tensão de Escoamento	37	99,9988%	5,04	534,75 (Pa.s ⁻¹)

*Tensão de Escoamento	Viscosidade	18	94,6668%	-2,07	377,92 (Pa.s ⁻¹)
Slump	Tensão de Escoamento	27	99,9999%	-6,36	3614,35 (Pa)
Slump	Viscosidade	27	98,3784%	-2,56	708,25 (Pa.s ⁻¹)
Espalhamento	Tensão de Escoamento	29	99,9904%	-4,52	4006,22 (Pa)
Espalhamento	Viscosidade	29	43,9708%	0,59	508,66 (Pa.s ⁻¹)

* 20 Menores resultados de tensão de escoamento.

Conforme discutido anteriormente, os parâmetros retirados de ensaios tecnológicos acabam por ter uma boa relação principalmente com o parâmetro de tensão de escoamento, indicando que de maneira geral concretos de maior valor de ensaio indicam concretos com menor parâmetro de tensão de escoamento.

É uma prática comum a adoção de concretos com maior índice de abatimento e espalhamento em situações mais complexas de bombeamento, sendo até encorajada e impostas por algumas concreteiras no mercado a definição de parâmetros mínimos de índice de abatimento a partir de determinado comprimento de tubulação.

Apesar de não ser uma relação absoluta, a prática descrita diante da análise apresentada mostra-se relativamente assertiva na busca de minimizar problemas de bombeamento em campo sem maiores informações relacionadas às propriedades reológicas dos concretos.

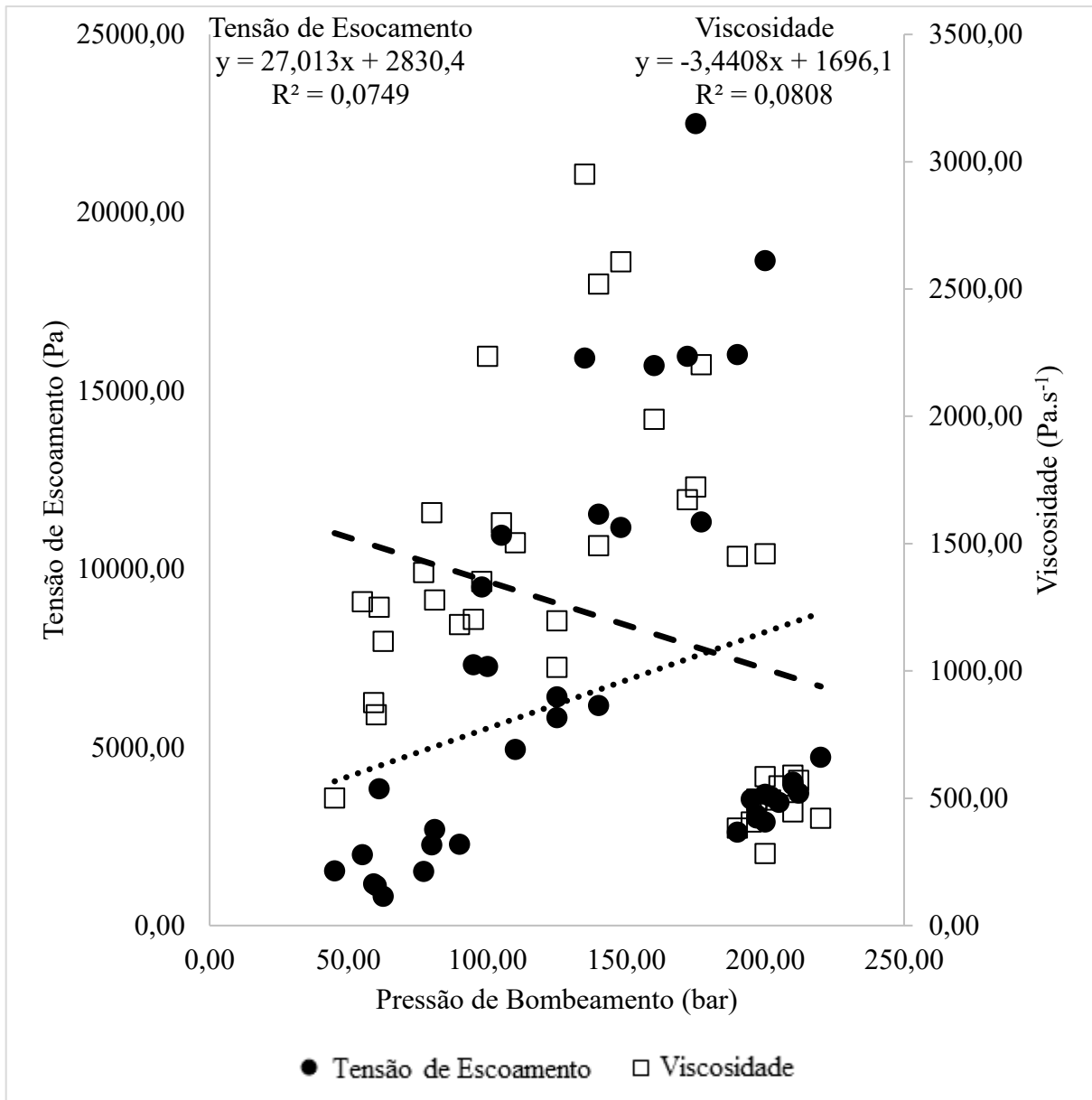
4.1.2.2 Sistema de Bombeamento

Visando apontar a influência do sistema de bombeamento na demanda de pressão o presente item da discussão dos resultados toma como base a premissa obtida nas campanhas experimentais, onde a pressão de bombeamento sofre influência das propriedades reológicas dos concretos.

Assim, serão feitas análises combinando todas as campanhas experimentais, limitando características do concreto em análise e selecionando par a par as distintas configurações, uma vez que a configuração adotada no Royal Tower e na Ponte Hercílio Luz foi a mesma (bomba tipo lança com 32 metros de braço – e no edifício Infinity Coast utilizou-se bomba estacionária para bombear a uma altura de aproximadamente 160 metros de altura, conforme apresentado no programa experimental.

A Figura 45 apresenta a compilação global dos resultados de pressão de bombeamento relacionada aos parâmetros reológicos dos concretos.

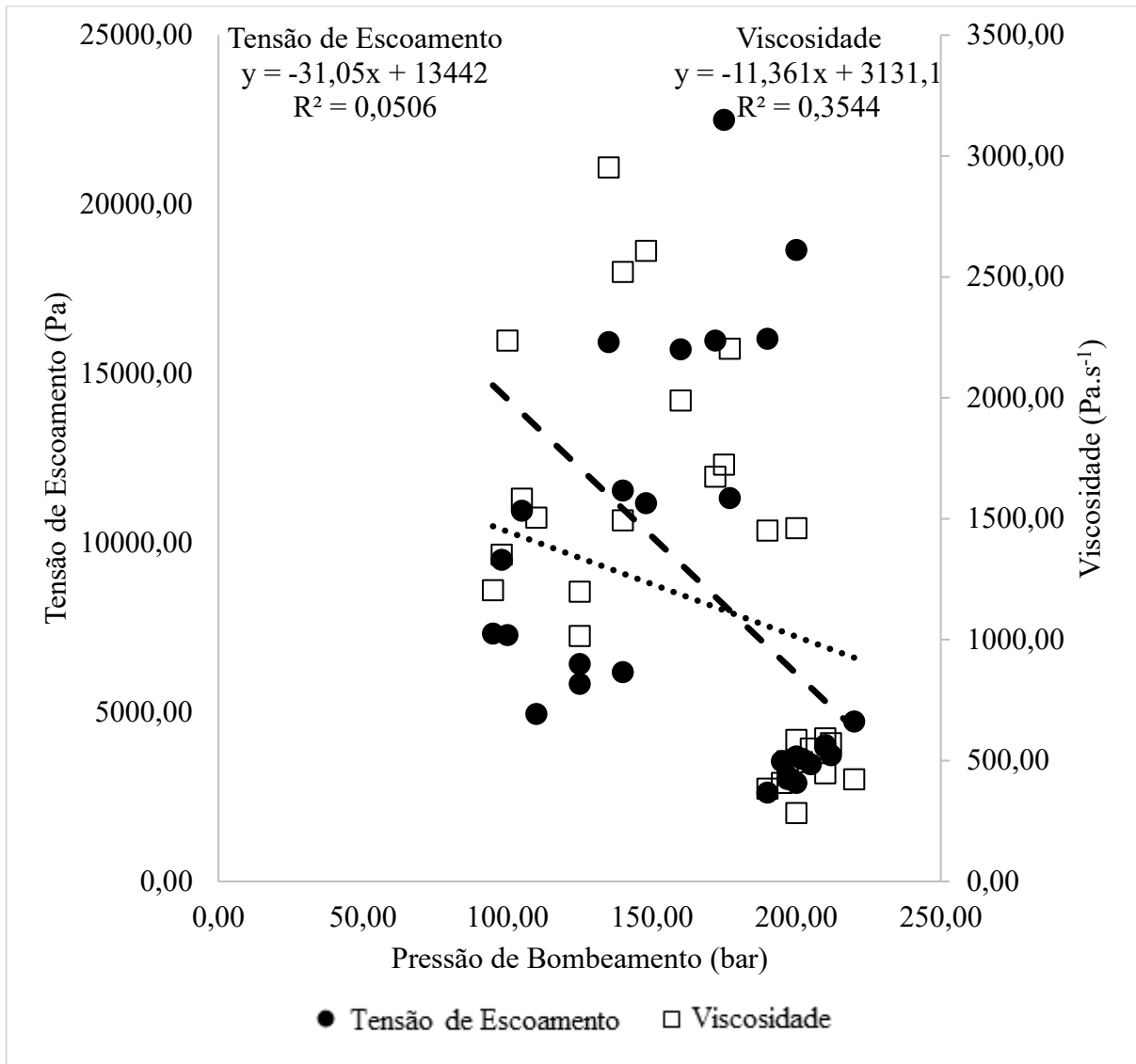
Figura 45 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Análise Global



Observa-se no gráfico que a inclinação das linhas de tendência se altera, chegando a gerar uma inclinação negativa na relação da pressão de bombeamento com o parâmetro de viscosidade. Há também a ocorrência de uma redução na significância da relação com a pressão de bombeamento outrora observado em cada campanha experimental ao ser analisada em seu próprio universo de estudo.

Como na campanha experimental do Infinity Coast não foram utilizados concretos autoadensáveis, estes são desconsiderados das campanhas do Royal Tower e da Ponte Hercílio Luz nas relações entre pressão de bombeamento e propriedades reológicas expostas na Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas – Sem CAA



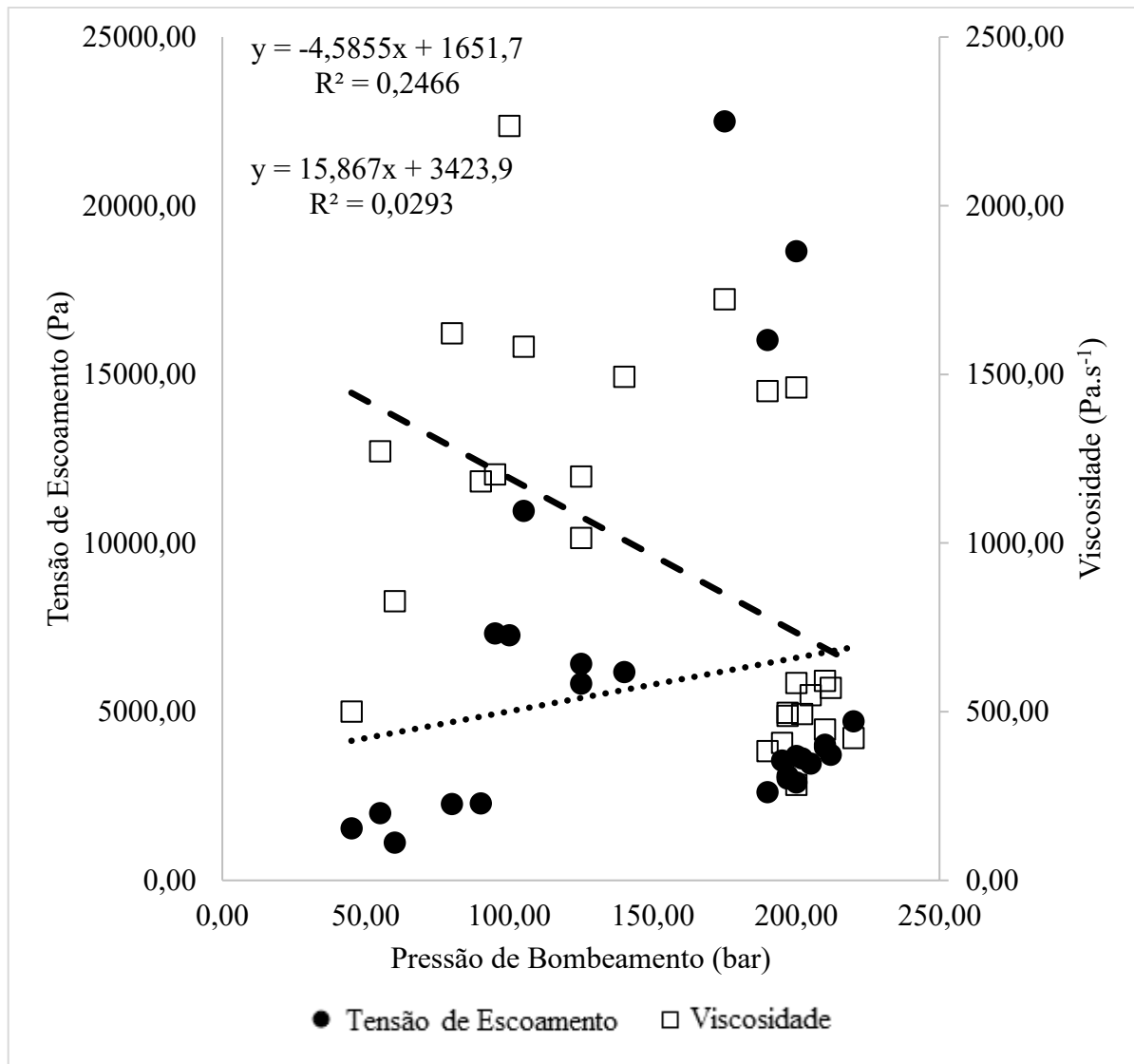
Com base nas relações entre pressão de bombeamento e os parâmetros reológicos apresentados constata-se que as distintas campanhas experimentais não podem ser analisadas de forma conjunta, mesmo tendo concretos de mesmo patamar de características reológicas.

Tal afirmação pode ser embasada ao analisar as inclinações das retas de tendencia, bem como avaliação do parâmetro t da análise de significância de Student que demonstra que toda a relação crescente anteriormente encontrada nas campanhas, ou seja, em um mesmo sistema de bombeamento, inverte-se, onde concretos mais viscosos e de maior tensão de escoamento demandariam menos pressão no sistema.

A seguir serão retratadas composições realizadas entre distintas as campanhas tomadas par a par realizando a mesma análise de significância e verificação de manutenção ou não das inclinações das regressões lineares realizadas.

A Figura 47 a seguir apresenta as relações de pressão de bombeamento e propriedades reológicas dos concretos utilizando os resultados obtidos nas campanhas experimentais do edifício Infinity Coast e do edifício Royal Tower.

Figura 47 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas
Infinity Coast e Royal Tower



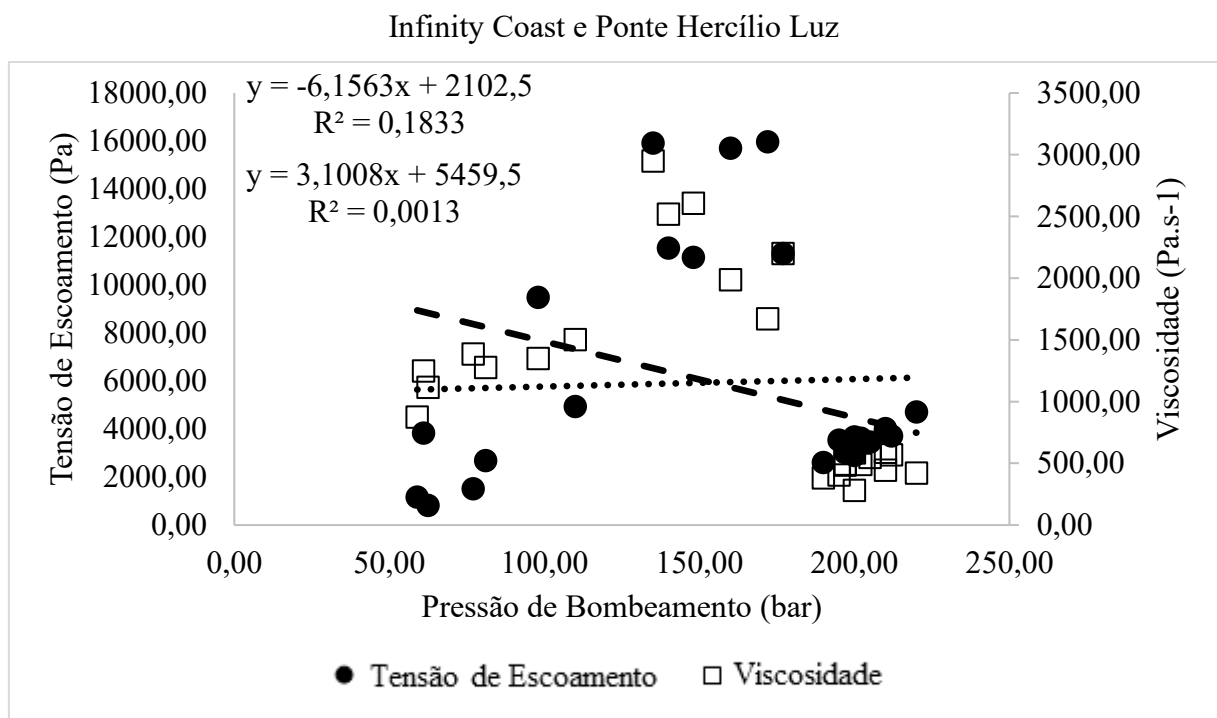
Assim como o verificado na análise global, a significância das relações encontradas entre pressão de bombeamento e propriedades reológicas é afetada quando se correlacionam estes dados obtidos de condições de bombeamento não compatíveis, comparando uma rede de bombeamento de mais de 150 m de comprimento com uma bomba lança.

Entretanto é importante ressaltar que concretos com nível de tensão de escoamento e viscosidade tão diferentes acabaram por demandar o mesmo nível de pressão em configurações de bombeamento tão distintas.

Ao analisarmos nas campanhas destacadas concretos de uma mesma faixa de tensão de escoamento, ou mesmo viscosidade, é possível verificar que ao alterar a configuração de bombeamento, uma demanda quase que 3 vezes menor de pressão ao equipamento de bombeamento é gerada.

A Figura 48 a seguir apresenta as relações de pressão de bombeamento e propriedades reológicas dos concretos utilizando os resultados obtidos nas campanhas experimentais do edifício Infinity Coast e do bloco de coroamento da Ponte Hercílio Luz.

Figura 48 - Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas

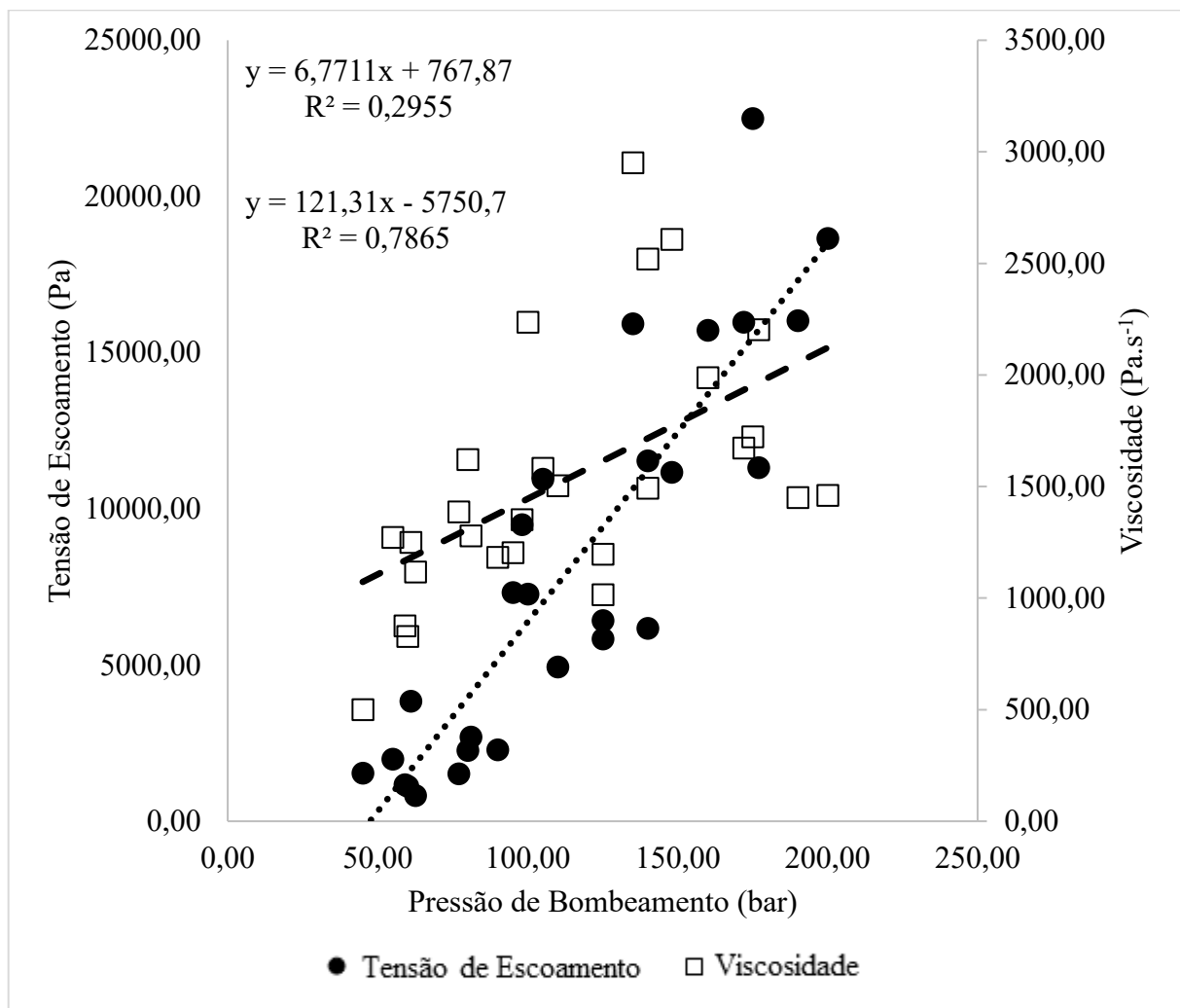


A mesma análise realizada entre os dados extraídos da campanha experimental do Infinity Coast com os dados extraídos da campanha realizada no Royal Tower praticamente se repete aqui, onde novamente há impactos nas significâncias das análises realizadas e inversão na inclinação da reta da regressão linear envolvendo pressão de bombeamento e viscosidade.

A dissonância anteriormente encontrada na relação entre a campanha experimental executada no edifício Infinity Coast e a campanha experimental do Royal Tower também pode ser observada na presente relação. Novamente são apresentados concretos de um mesmo intervalo de tensão de escoamento que acabaram por demandar aproximadamente 4 vezes menos pressão ao sistema de bombeamento utilizado na concretagem do bloco de coroamento da Ponte Hercílio.

Diferentemente das outras relações anteriormente executadas, na Figura 49 a seguir são apresentadas relações encontradas ao analisar de forma conjunta os resultados das campanhas experimentais que utilizaram de um mesmo tipo de bomba e configuração de bombeamento, Royal Tower e Ponte Hercílio Luz com uma bomba lança com 32 metros de braço.

Figura 49 – Pressão de Bombeamento x Propriedades Reológicas
Royal Tower e Ponte Hercílio Luz



Ao analisar os resultados das campanhas experimentais do Royal Tower com a do bloco de coroamento da Ponte Hercílio Luz, verifica-se que o que fora observado anteriormente na redução da significância das relações e alteração das inclinações para o que já fora determinado em cada campanha experimental não aconteceu.

A relação entre pressão de bombeamento e propriedades reológicas acabou sendo mais acentuada do que o outrora observado ao tratar de forma isolada cada campanha experimental.

Apesar de tratar-se de campanhas distintas fica verificado que em relação as análises que combinaram os resultados das campanhas aqui combinadas com a campanha do edifício Infinity Coast não foram observadas discrepâncias ao anteriormente observado nas relações de pressão de bombeamento com as propriedades reológicas dos concretos.

Após a análise destes resultados em questão e compará-los com tais combinações conclui-se que, o sistema de bombeamento tem influência na demanda de pressão do sistema.

A Tabela 12 a seguir apresenta relações de significância de Student realizadas com base nas relações efetuadas no presente item corroborando com a influência do sistema de bombeamento na demanda de pressão.

Tabela 12 – Análise de Significância Combinação de Campanhas x Pressão de Bombeamento

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Compilação Total					
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	37	90,8237%	1,73	55,19 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	37	92,0560%	-1,80	55,01 (bar)
Compilação Excluindo CAA					
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	27	75,9476%	-1,20	40,32 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	27	99,9342%	-3,85	33,25 (bar)
Infinity Coast - Royal Tower					
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	24	59,7137%	0,85	58,43 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	24	99,0132%	-2,80	51,48 (bar)
Infinity Coast - Ponte Hercílio Luz					
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	23	13,4597%	0,17	56,48 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	23	96,7233%	-2,27	51,08 (bar)
Royal Tower - Ponte Hercílio Luz					
Tensão de Escoamento	Pressão de Bombeamento	25	100,0000%	9,60	21,53 (bar)
Viscosidade	Pressão de Bombeamento	25	99,6616%	3,24	39,11 (bar)

Com base no exposto verifica-se que em todos os casos em que houve a incidência dos dados do edifício Infinity Coast nas relações em estudo o nível de significância anteriormente observado entre pressão de bombeamento e tensão de escoamento do concreto foi impactado.

O impacto do nível de significância foi ainda maior onde o mesmo padrão de concretos foi analisado (excluindo os concretos autoadensáveis) e onde apenas duas campanhas eram analisadas.

Vale destacar que, apesar da significância do parâmetro de significância em relação a viscosidade e a pressão de bombeamento ter sido alto nas relações em que a campanha experimental do edifício Infinity Coast se fez presente, o parâmetro T de significância da inclinação das relações acaba por apresentar sentido de inclinação inverso ao observado na maioria das campanhas experimentais, sendo uma antítese ao comportamento de um concreto mais viscoso em todas as campanhas experimentais.

Ao excluir o edifício Infinity Coast das relações verifica-se que a tendência de crescimento dos níveis de pressão de bombeamento quando as propriedades reológicas são incrementadas permanece.

O nível de significância das relações de tensão de escoamento e pressão de bombeamento tendem a 100%, sendo ainda mais alto do que anteriormente observado na análise individual das campanhas experimentais.

Além do parâmetro de tensão de escoamento influir sobre a pressão de bombeamento tem-se a confirmação de que a viscosidade também gera influência na pressão de bombeamento, com nível de significância na ordem de 99,66%.

Destas análises de significância retira-se o principal ponto do presente item da dissertação, o sistema a qual o concreto é submetido aumenta, ou diminuí, a demanda de pressão.

4.1.2.3 Análise com Pressão Normalizada

Tendo comprovada a influência do sistema de bombeamento no impacto da demanda de pressão do sistema, o presente item trata da normalização dos sistemas a qual o concreto fora submetido em suas respectivas campanhas experimentais.

A partir da relação exposta por Kaplan (2001) onde a pressão de bombeamento é diretamente proporcional ao comprimento de tubulação da rede de bombeamento, realiza-se a

normalização das pressões obtidas em cada campanha ao dividir o valor total de pressão pelo comprimento linear equivalente das redes de bombeamento em cada campanha experimental.

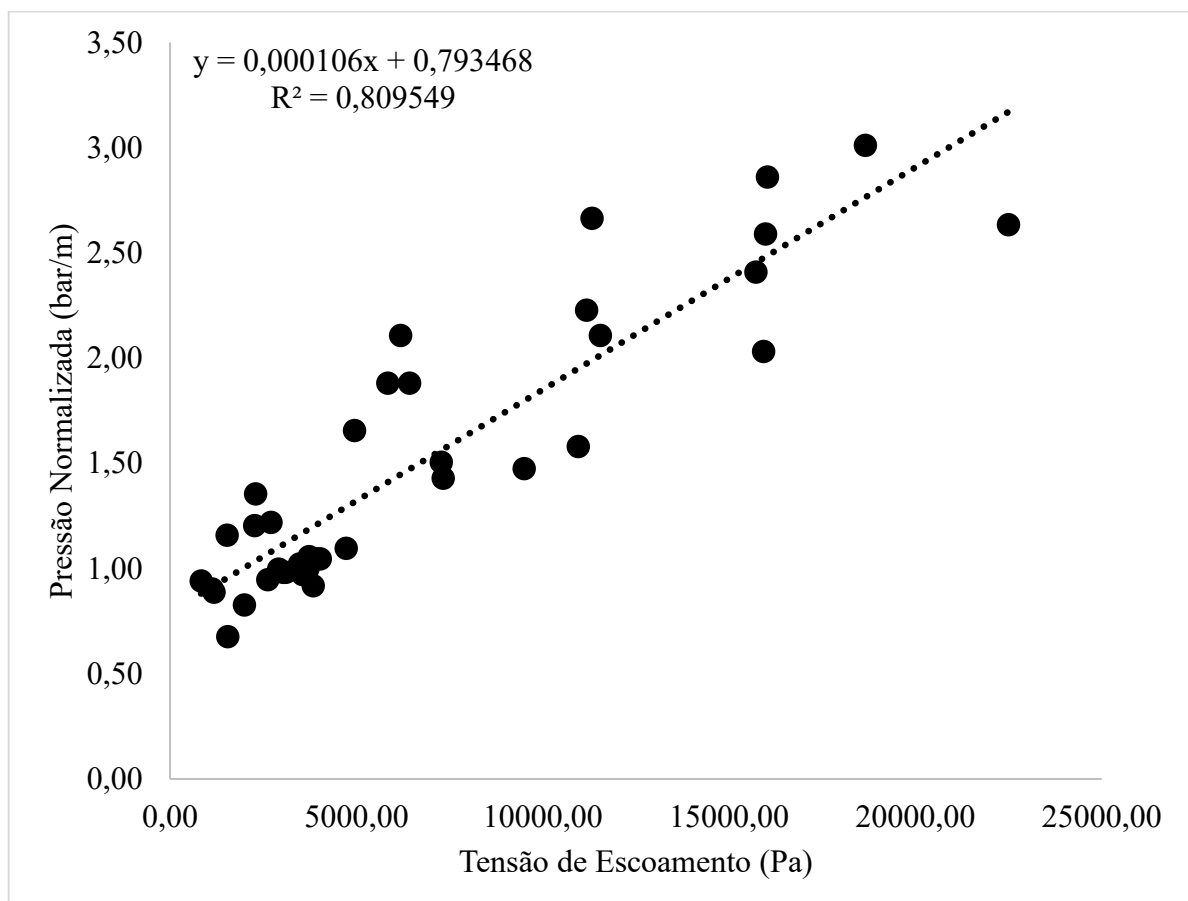
Na campanha experimental realizada no Infinity Coast os valores de pressão são normalizados a partir da divisão da pressão ponto a ponto pelo comprimento equivalente da rede de bombeamento – 200,56 metros –, conforme exemplificado no item 3.1.1 do programa experimental.

O mesmo procedimento descrito acima é adotado nas campanhas experimentais executadas tanto na Ponte Hercílio Luz quanto no edifício Royal Tower, o comprimento equivalente da rede de bombeamento utilizado foi de 66,42 metros, conforme exemplificado nos itens 3.1.2 e 3.1.3 do programa experimental.

Os resultados de pressão normalizada para cada concreto das campanhas experimentais, bem como suas características reológicas e resultados de ensaios reológicos são apresentados na tabela C do Apêndice B da presente dissertação.

A Figura 50 a seguir apresenta a relação entre tensão de escoamento de a pressão de bombeamento normalizada.

Figura 50 – Tensão de Escoamento x Pressão de Bombeamento Normalizada



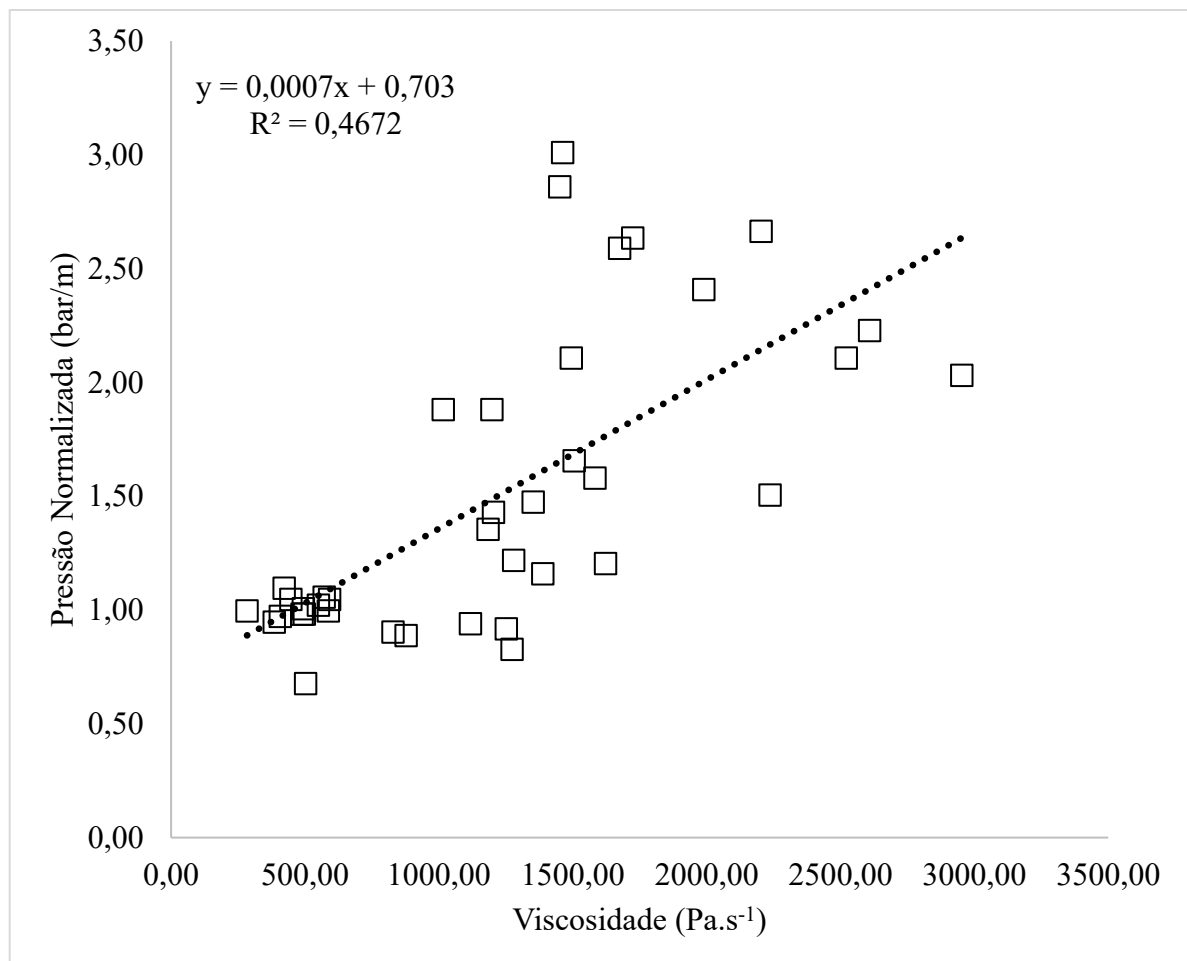
Ao comparar o resultado da presente relação apresentada com a relação anteriormente utilizada para a demonstração da não compatibilidade de valores globais de pressão de bombeamento apresentados na Figura 45 e na Figura 46 do item 4.1.2.2, podemos verificar que o mesmo sentido de inclinação obtido em cada campanha experimental é mantido.

Assim como se é observado individualmente em cada campanha experimental, concretos de maior tensão de escoamento acabam por demandar ao sistema um maior nível de pressão de bombeamento normalizada.

Ao relacionarmos de forma normalizada a pressão de bombeamento com a propriedade reológica de tensão de escoamento a significância acaba por ser potencializada, apresentando valor superior ao ser comparado com qualquer valor obtido em qualquer campanha experimental.

Assim como realizado para a tensão de escoamento a relação entre a propriedade reológica de viscosidade e a pressão de bombeamento normalizada é explorada na Figura 51 a seguir.

Figura 51 – Viscosidade x Pressão de Bombeamento Normalizada



Assim como o observado na análise voltada a tensão de escoamento, a relação anteriormente analisada de forma global que apresentava inclinação negativa, contrariando as análises das campanhas experimentais, volta a ser crescente.

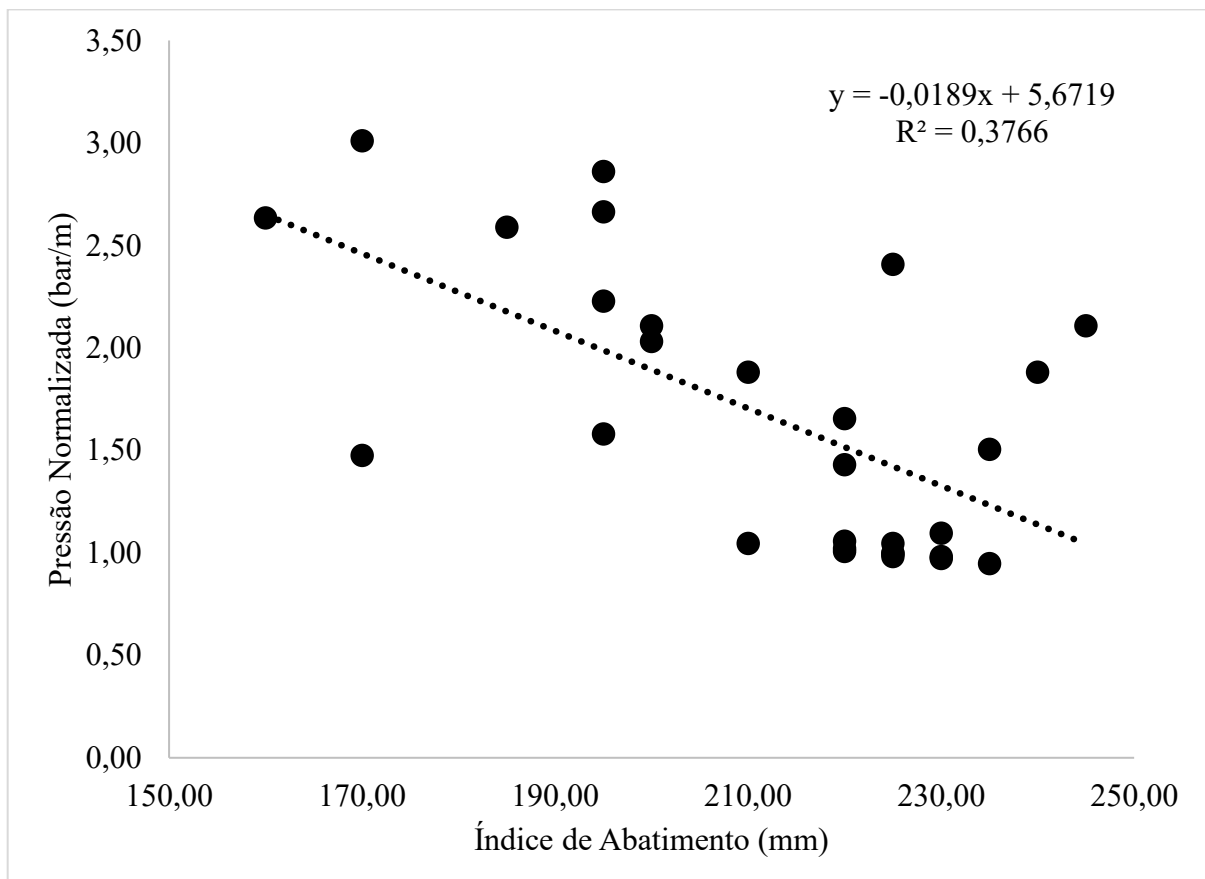
O nível de significância das análises realizadas nas campanhas experimentais também é intensificado na análise normalizada, indicando que o parâmetro de viscosidade também é relevante na análise da demanda de pressão.

Assim tem-se que não somente o parâmetro de tensão de escoamento é determinante na pressão de bombeamento necessária, mas a propriedade reológica de viscosidade também exerce parcela de influência nesta.

Tendo que a tensão de escoamento se faz relevante na demanda de pressão normalizada, e que os ensaios tecnológicos têm relativa significância em sua relação com tal parâmetro, sua relação com a pressão normalizada também é explorada nas análises a seguir.

A Figura 52 a seguir apresenta a relação do índice de abatimento dos concretos estudados na presente dissertação com seu respectivo valor de pressão de bombeamento normalizada.

Figura 52 – Índice de Abatimento x Pressão de Bombeamento Normalizada

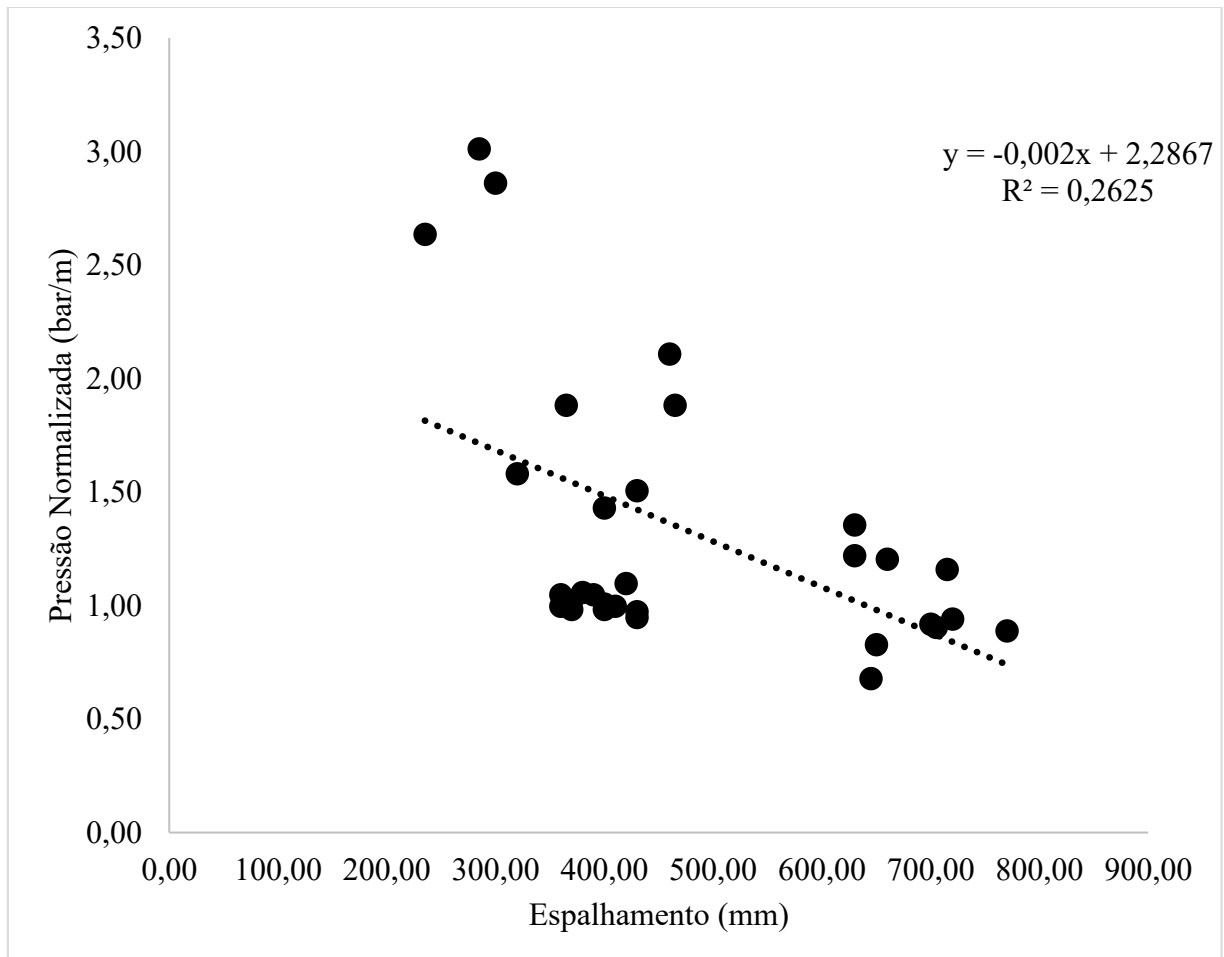


De maneira geral, conforme apresentado na análise global com o enfoque na propriedade de tensão de escoamento, concretos de índice de abatimento maiores tenderam a demandar um menor nível de pressão de bombeamento.

Como discutido anteriormente, concretos de maior índice acabaram por apresentar menores valores de pressão normalizada, e apesar de não ser um parâmetro absoluto na determinação da pressão de bombeamento, pode ser utilizado como uma diretriz inicial para a especificação de um concreto a uma dada configuração necessária de bombeamento.

Assim como realizado para o índice de abatimento, a Figura 53 apresenta a relação da medida de espalhamento com a pressão de bombeamento normalizada.

Figura 53 – Medida de Espalhamento x Pressão de Bombeamento Normalizada



Como verificado para o ensaio de abatimento, ao analisar concretos de menor medida de espalhamento, tem-se que de maneira geral a uma menor demanda de pressão normalizada ao sistema de bombeamento.

Assim como discutido na análise voltada para a tensão de escoamento, a medida de espalhamento pode ser adotada como um parâmetro inicial para a estimativa de demanda de

pressão, onde concretos de maior índice tenderiam a gerar um menor parâmetro de pressão normalizada.

A Tabela 13 a seguir apresenta as relações de significância supracitadas no presente item com o enfoque na demanda de pressão normalizada.

Tabela 13 – Análise de Significância Pressão Normalizada

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	37	100,0000%	12,54	0,290 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	37	99,9998%	5,70	0,485 (bar/m)
Slump	Pressão Normalizada	27	99,9600%	-4,04	0,543 (bar/m)
Espalhamento	Pressão Normalizada	29	99,6785%	-3,21	0,525 (bar/m)

Diante do exposto verifica-se que o parâmetro que exerce maior influência na demanda de pressão em um sistema de bombeamento na ótica do concreto a ser bombeado é o parâmetro reológico de tensão de escoamento.

Entretanto, o nível de significância encontrado para o parâmetro reológico de viscosidade também é bem significativo, indicando que também exerce parcela de influência na demanda de bombeamento.

Assim, tem-se que tanto a tensão de escoamento e o parâmetro de viscosidade devem ser estudados para a concepção de concretos mais facilmente bombeáveis e que venham a demandar uma menor pressão de bombeamento ao equipamento a ser utilizado.

Parâmetros tecnológicos como o índice de abatimento e a medida de espalhamento podem ser utilizados como diretrizes gerais para a concepção de concretos bombeáveis em determinadas condições de bombeamento, entretanto não podem ser utilizados como valores absolutos uma vez que sua significância em comparação aos demais parâmetros analisados não apresenta a mesma magnitude.

Apesar de não serem diretrizes gerais, tais ensaios tecnológicos podem ser utilizados como forma de controlar em campo a conformidade de uma dada composição de concreto visando a manutenção da possibilidade de bombeamento em campo.

Constatada a influência das propriedades reológicas o item 4.1.2.3.1 a seguir expande a análise das relações de pressão normalizada com tais parâmetros separados por faixas de

tensão de escoamento, parâmetro mais significativo na concepção de um concreto bombeável relacionado a demanda de pressão de bombeamento.

4.1.2.3.1 Significância de parâmetros reológicos por faixa de tensão de escoamento

Na Tabela 14 e na Tabela 15 a seguir são divididos e organizados em grupos baseado em seus valores de tensão de escoamento, formando um grupo com os 20 menores valores de tensão de escoamento e seus parâmetros e outro com os 19 maiores valores.

Tabela 14 – Menores tensões de escoamento – Pressão Normalizada

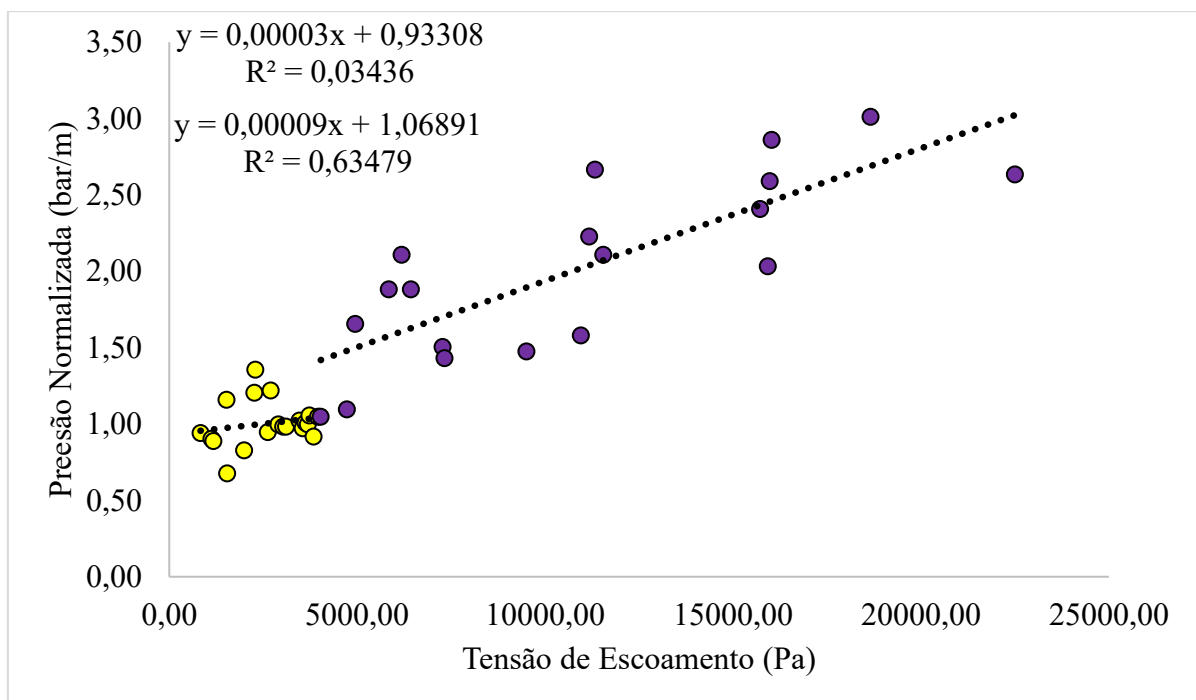
Identificação Concreto	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s⁻¹)	Pressão Normalizada (bar/m)
P5	830,48	1117,50	0,94
R2	1123,30	828,28	0,90
P2	1174,30	876,72	0,89
P4	1526,50	1387,40	1,16
R5	1544,40	501,29	0,68
R1	1994,90	1272,30	0,83
R3	2269,40	1622,0	1,20
R4	2290,80	1183,50	1,36
I11	2623,60	384,05	0,95
P3	2701,70	1279,20	1,22
I4	2908,40	283,60	1,00
I10	3028,10	497,17	0,98
I8	3105,20	488,74	0,98
I6	3466,80	549,63	1,02
I5	3554,30	407,69	0,97
I9	3625,00	493,56	1,01
I2	3690,30	586,07	1,00
I12	3726,20	571,36	1,06
P1	3842,90	1250,80	0,92
I3	3957,00	447,37	1,05

Tabela 15 – Maiores tensões de escoamento – Pressão Normalizada

Identificação Concreto	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s ⁻¹)	Pressão Normalizada (bar/m)
I7	4031,6	591,90	1,05
I1	4724,4	422,28	1,10
P9	4947,1	1504,80	1,66
R13	5841,0	1197,80	1,88
R14	6181,0	1493,50	2,11
R12	6426,5	1015,30	1,88
R7	7276,5	2236,90	1,51
R9	7326,0	1204,00	1,43
P6	9502,8	1351,70	1,48
R8	10955,0	1582,60	1,58
P13	11172,0	2608,30	2,23
P8	11326,0	2203,40	2,66
P11	11546,0	2521,00	2,11
P12	15718,0	1988,60	2,41
P7	15930,0	2952,30	2,03
P10	15979,0	1673,90	2,59
R11	16027,0	1451,30	2,86
R6	18657,0	1461,60	3,01
R10	22501,0	1723,30	2,63

Diante da confecção destes dois grupos a Figura 54 a seguir apresenta a relação destes valores com a pressão normalizada.

Figura 54 – Tensão de Escoamento x Pressão Normalizada – Análise em dois grupos

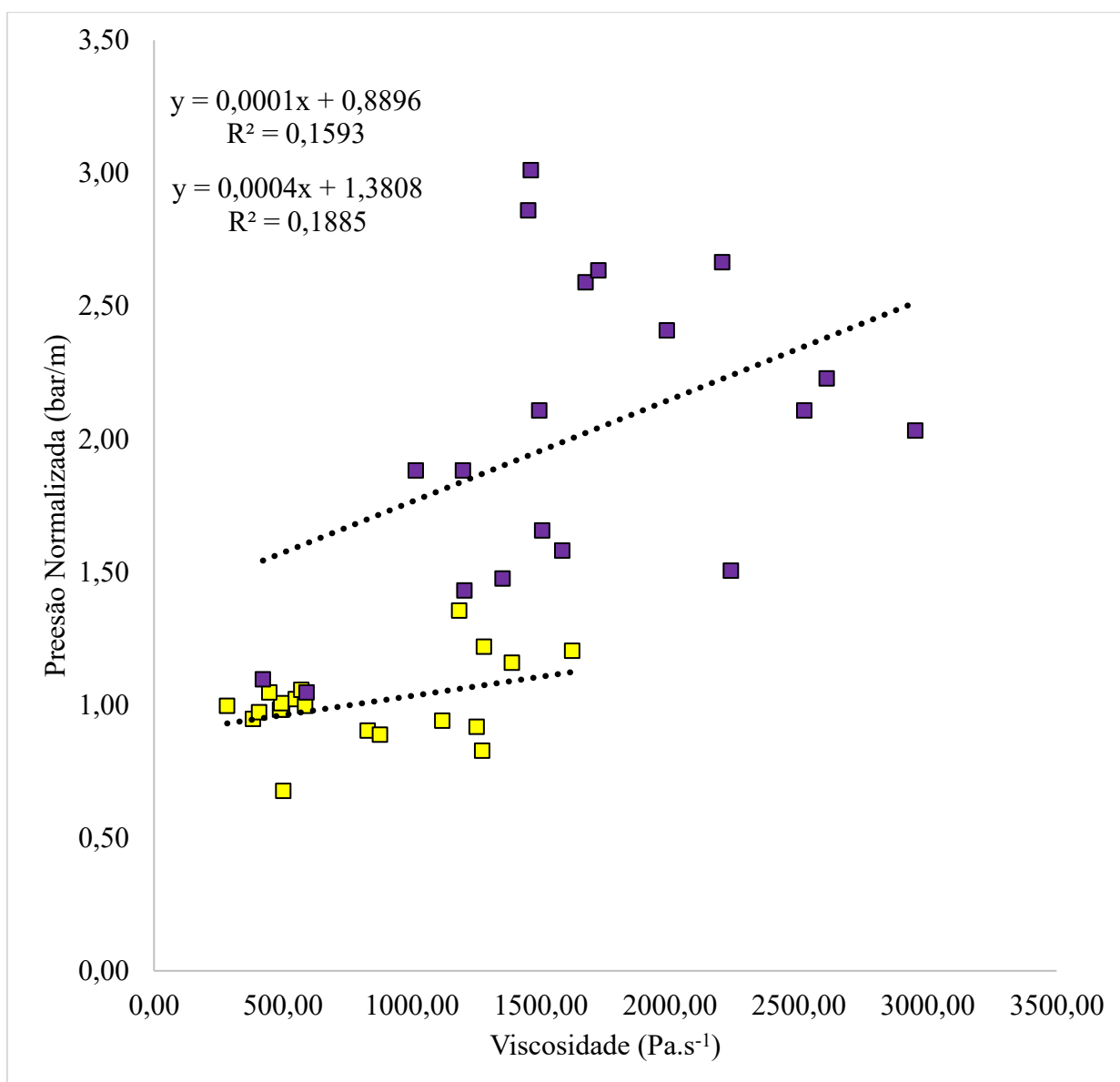


Com o agrupamento realizado pode ser verificado que as inclinações das linhas de tendência dos grupos apresentam diferentes coeficientes angulares do que o que fora anteriormente observado na análise realizada a partir da Figura 50 quando considerado um único agrupamento de concretos.

A constatação anteriormente apontada indica que diferentes níveis de tensão acabam por gerar um maior ou menor impacto na pressão de bombeamento, influenciando, mais ou menos na pressão de bombeamento.

Diante da redução da influência da tensão de escoamento em determinada faixa de concretos no bombeamento a Figura 55 a seguir identifica o impacto que a viscosidade destes concretos exerce sobre a pressão de bombeamento normalizada.

Figura 55 – Viscosidade x Pressão Normalizada – Análise em dois grupos



Ao separar os concretos em dois grupos, verifica-se que a inclinação da reta anteriormente obtida em um único grupo, conforme apresentado na Figura 51 altera-se.

Os dois distintos grupos formados pela metade superior de resultados de tensão de escoamento e a metade inferior acabam por apresentar distinta influência da viscosidade na pressão normalizada.

A significância das relações entre parâmetros reológicos e pressão de bombeamento é alterada, assim a Tabela 16 a seguir expande a discussão a partir de parâmetros de significância de Student apontando a influência dos parâmetros reológicos sobre a pressão de bombeamento normalizada.

Tabela 16 – Análise de Significância Pressão Normalizada – Dois Grupos

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Maiores Valores Tensão de Escoamento					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	17	99,9956%	5,44	0,36 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	17	93,6705%	1,99	0,54 (bar/m)
Menores Valores Tensão de Escoamento					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	18	56,6022%	0,80	0,15 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	18	91,8700%	1,85	0,14 (bar/m)

Conforme discutido anteriormente, ao analisarmos a metade superior dos resultados de tensão de escoamento, a mesma tendência observada na análise da significância utilizando um único agrupamento é observada, onde o parâmetro de maior significância é o de tensão de escoamento ao ser relacionado à pressão normalizada.

Assim como a constatação envolvendo o parâmetro de tensão de escoamento, a significância do parâmetro de viscosidade em relação a tensão de escoamento também permanece, indicando que a mesma, em menor escala, acaba também por influenciar a pressão de bombeamento no agrupamento dos maiores valores de tensão de escoamento.

Entretanto ao analisar o agrupamento realizado com a metade inferior de valores de tensão de escoamento verifica-se uma redução significativa na influência do parâmetro de tensão de escoamento na pressão de bombeamento normalizada.

Se o parâmetro de tensão escoamento acabou por apresentar uma redução do grau de significância por mais de 6 vezes – 5,44 para 0,80 – o parâmetro de viscosidade por sua vez

mostrou-se mais significativa na relação com a demanda de pressão normalizada dentro do agrupamento da metade inferior de valores de tensão de escoamento.

Verifica-se também que ao reduzir o nível de análise para recortes de valores de tensão de escoamento o tamanho do erro estatístico da relação com a pressão de bombeamento normalizada, pode ser reduzido, onde anteriormente na análise normalizada obteve-se erro de 0,29 bar/m de tubulação diante da utilização do parâmetro de tensão de escoamento., na presente relação com menores valores de tensão de escoamento obteve-se erros de 0,14 bar/m ao utilizar-se o parâmetro de viscosidade.

Na busca do refinamento da análise da influência das características dos concretos em diferentes faixas de tensão de escoamento os resultados são divididos em quatro grupos novamente ordenados em função de seus valores de tensão de escoamento, expostos na Tabela 17 e na Tabela 18 a seguir.

Tabela 17 – Grupo 1 e 2 – Pressão Normalizada

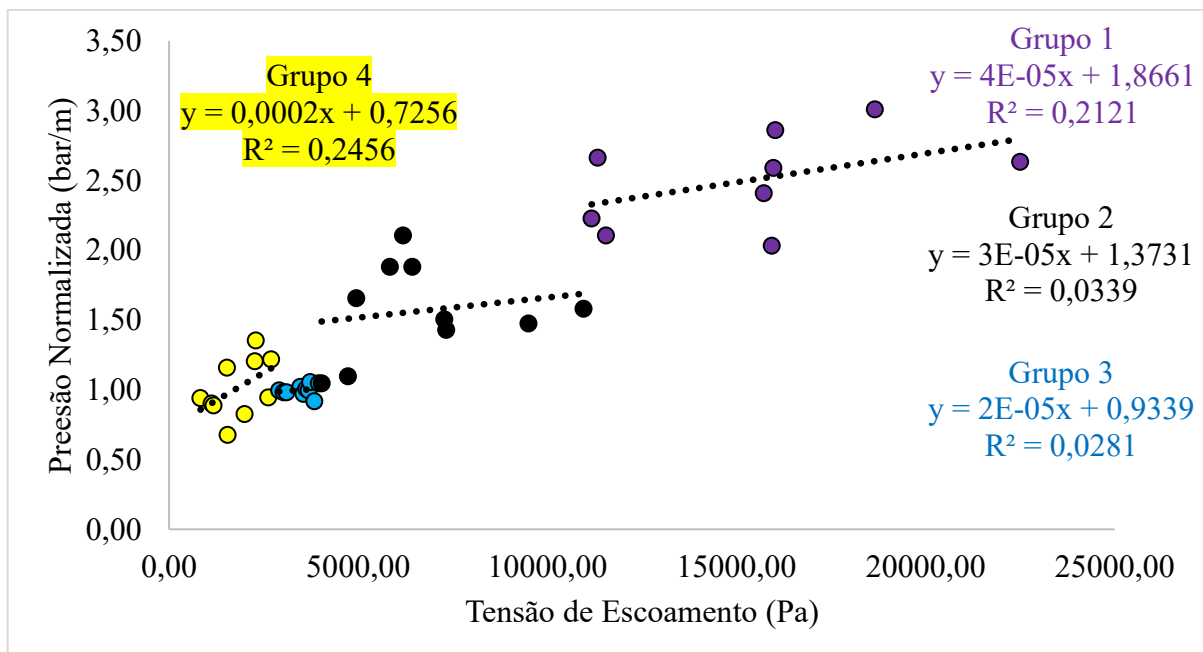
Identificação Concreto	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s⁻¹)	Pressão Normalizada (bar/m)
Grupo 1			
P5	830,48	1117,50	0,94
R2	1123,30	828,28	0,90
P2	1174,30	876,72	0,89
P4	1526,50	1387,40	1,16
R5	1544,40	501,29	0,68
R1	1994,90	1272,30	0,83
R3	2269,40	1622,0	1,20
R4	2290,80	1183,50	1,36
I11	2623,60	384,05	0,95
P3	2701,70	1279,20	1,22
Grupo 2			
I4	2908,40	283,60	1,00
I10	3028,10	497,17	0,98
I8	3105,20	488,74	0,98
I6	3466,80	549,63	1,02
I5	3554,30	407,69	0,97
I9	3625,00	493,56	1,01
I2	3690,30	586,07	1,00
I12	3726,20	571,36	1,06
P1	3842,90	1250,80	0,92
I3	3957,00	447,37	1,05

Tabela 18 – Grupo 3 e 4 – Pressão Normalizada

Identificação Concreto	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s ⁻¹)	Pressão Normalizada (bar/m)
Grupo 3			
I7	4031,6	591,90	1,05
I1	4724,4	422,28	1,10
P9	4947,1	1504,80	1,66
R13	5841,0	1197,80	1,88
R14	6181,0	1493,50	2,11
R12	6426,5	1015,30	1,88
R7	7276,5	2236,90	1,51
R9	7326,0	1204,00	1,43
P6	9502,8	1351,70	1,48
R8	10955,0	1582,60	1,58
Grupo 4			
P13	11172,0	2608,30	2,23
P8	11326,0	2203,40	2,66
P11	11546,0	2521,00	2,11
P12	15718,0	1988,60	2,41
P7	15930,0	2952,30	2,03
P10	15979,0	1673,90	2,59
R11	16027,0	1451,30	2,86
R6	18657,0	1461,60	3,01
R10	22501,0	1723,30	2,63

Os resultados da demanda de pressão normalizada em função da tensão de escoamento destes grupos são apresentados na Figura 56.

Figura 56 – Tensão de Escoamento x Pressão Normalizada – Análise em quatro grupos

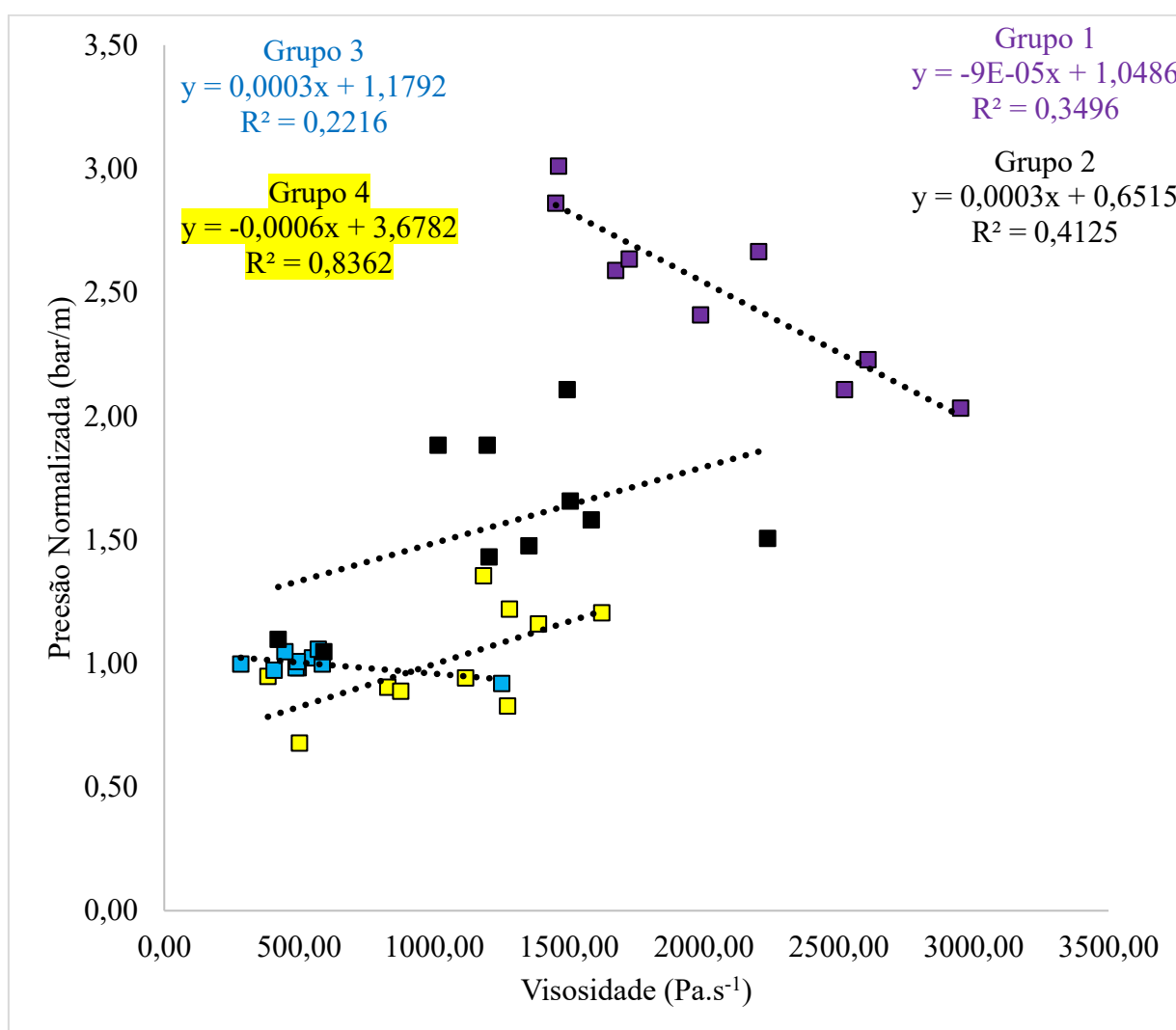


Como verificado na análise da relação entre tensão de escoamento e pressão normalizada em dois grupos, apresentada na Figura 54, há alteração da inclinação das regressões lineares dos concretos em estudo.

Todas as relações de significância entre tensão de escoamento e viscosidade são afetadas, e valores anteriormente próximos 99% em análise global passam a ter grau de significância menor do que 90%.

Assim como realizado para a tensão de escoamento, a Figura 57 apresenta a relação da pressão normalizada em função da viscosidade destes concretos agrupados.

Figura 57 – Viscosidade x Pressão Normalizada – Análise em quatro grupos



Com a análise agrupada se faz possível verificar que, o parâmetro de viscosidade exerce influência principalmente nos concretos de menor valor de tensão de escoamento, ou seja, nos concretos do grupo 1 (destacados em amarelo).

Assim como verificado nos concretos do grupo 1, pode ser verificado que no grupo 3 (concretos destacados em preto) a mesma tendência de que concretos de maior viscosidade acabaram por exigir uma maior pressão de bombeamento.

Tanto no grupo 2, quanto no grupo 4 a tendência observada nos demais grupos não foi encontrada, e apesar da significância encontrada a inclinação da tendência analisada não é compatível com os demais resultados do presente estudo.

A Tabela 19 a seguir expande a discussão a partir da apresentação do estudo de significância das relações realizadas em cada grupo.

Tabela 19 – Análise de Significância Pressão Normalizada – Quatro Grupos

Relação		Graus de Liberdade	Significância	T	Erro
Grupo 4					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	7	78,7862%	1,37	0,32 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	7	99,9446%	-5,98	0,15 (bar/m)
Grupo 3					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	8	38,9445%	0,53	0,35 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	8	83,0258%	1,51	0,32 (bar/m)
Grupo 2					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	8	35,6815%	0,48	0,04 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	8	92,8194%	-2,07	0,03 (bar/m)
Grupo 1					
Tensão de Escoamento	Pressão Normalizada	8	85,4764%	1,61	0,19 (bar/m)
Viscosidade	Pressão Normalizada	8	95,4745%	2,37	0,17 (bar/m)

Com base na confecção dos grupos a significância do parâmetro de tensão de escoamento de forma geral fora reduzida.

Em todos os grupos em estudo o parâmetro de viscosidade teve maior significância em relação ao parâmetro de tensão de escoamento.

A relação encontrada entre viscosidade e pressão normalizada nos grupos 1 e 3 indica que não somente a tensão de escoamento é importante na concepção de concretos bombeáveis, mas o parâmetro de viscosidade também se faz relevante na obtenção de concretos bombeáveis em situações complexas de bombeamento.

A inclinação obtida no grupo 4 e no grupo 2 para o parâmetro de viscosidade, pode estar relacionada a parâmetros de operação, uma vez que conforme apresentada no programa experimental, o parâmetro de viscosidade correlaciona-se a variáveis de operação, fator não explorado no presente estudo, ou, no caso do grupo 4, uma redução em sua influência em concretos de maior valor de tensão de escoamento.

4.2 IMPACTO DE VARIAÇÕES NO CONCRETO NA PERFORMANCE DE BOMBEAMENTO

Diante do que fora explorado anteriormente no item 4.1, além da rede e configuração de bombeamento, os parâmetros reológicos de tensão de escoamento e viscosidade do concreto exercem influência no desempenho de bombeamento dos concretos.

Assim, na campanha de bombeamento mais complexa no presente estudo, executada na laje número 53 do edifício Infinity Coast, obtiveram-se os romaneios de carregamento oferecidos gentilmente pela concreteira com a intenção de identificar a influência de variações de carregamento nas propriedades reológicas dos concretos.

No item 4.2.1 são apresentadas variações em função da quantidade absoluta de materiais adicionadas ao concreto, em 4.2.2 são analisados em função da volumetria destes em relação a um volume fixo de concreto e em 4.2.3 são apontadas a influência em função de características volumétricas do concreto como o teor de argamassa.

4.2.1 Variações Materiais Constituintes

Conforme apresentado no item 3.2.4 apresentado no programa experimental o projeto de traço padrão apresentado para a realização da execução do concreto a ser aplicado sofre variações inerentes ao processo de confecção e carregamento do concreto.

Essas variações ocorrem dentre outros por tolerância de intervalos de pesagem de materiais, tempo de voo entre abertura e estabilização de peso das balanças e características de limites e determinações operacionais para correções.

O resultado de tais variações são apresentadas na Tabela 20 a seguir, apresentando o resultado final do concreto que fora carregado para a concretagem da laje número 53 do edifício Infinity por unidade de metro cúbico calculada com base nas massas específicas dos materiais constituintes.

Tabela 20 – Variações de Carregamento Laje 53 Infinity Coast

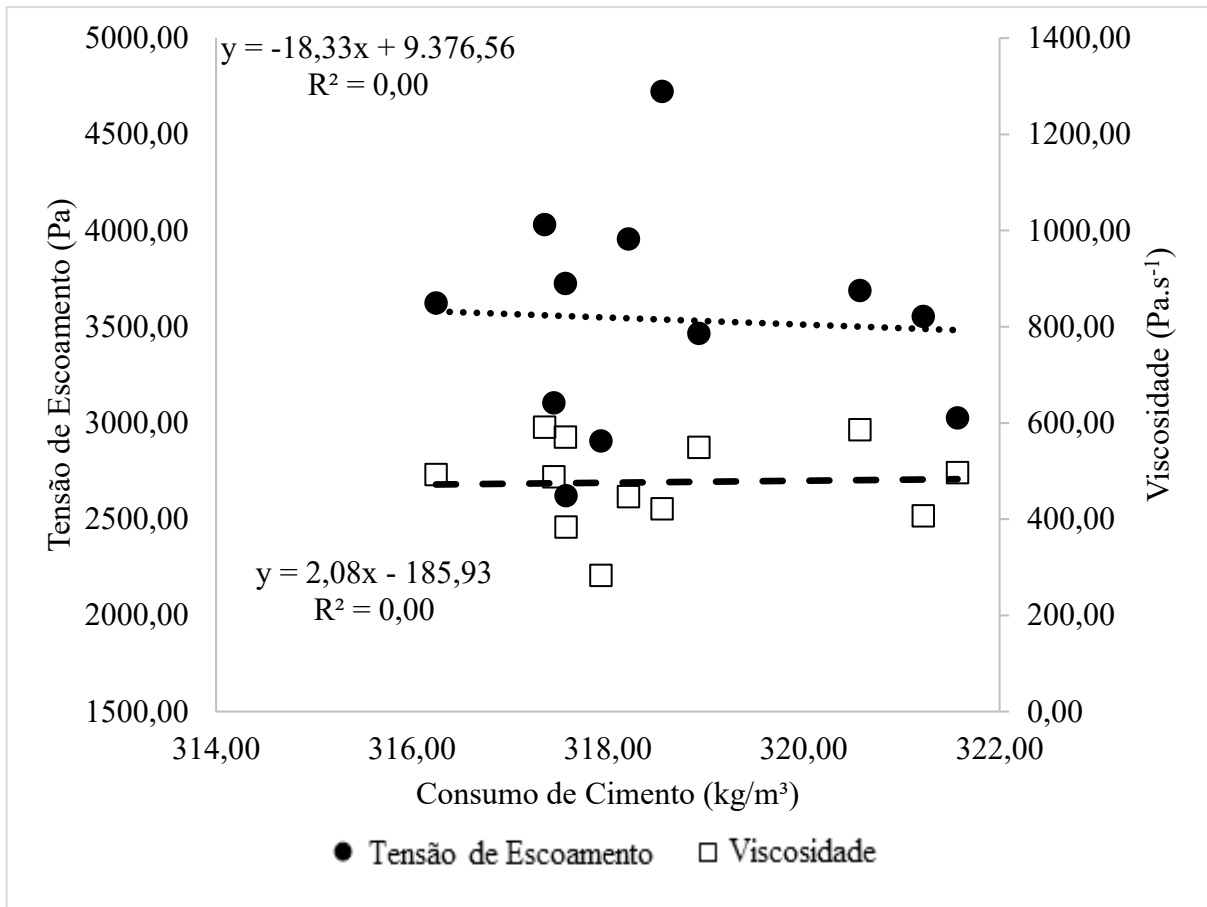
Identificação Concreto	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Britagem	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Água	Super Plastificante	Plastificante
I1	318,55	14,37	300,88	533,24	839,14	209,21	215,71	1,03	1,51
I2	320,57	14,37	300,73	532,58	835,94	211,55	215,66	1,04	1,51
I3	318,21	14,37	303,95	532,74	834,30	211,57	215,79	1,03	1,50
I4	317,93	14,35	305,51	533,90	834,40	209,03	215,75	1,04	1,50
I5	321,22	14,36	302,87	532,33	835,54	209,74	215,55	1,04	1,50
I6	318,93	14,39	302,02	533,80	837,88	208,47	215,67	1,03	1,51
I7	317,35	14,37	303,33	533,56	836,43	210,39	215,64	1,04	1,51
I8	317,45	14,27	300,67	534,33	835,57	212,89	215,74	1,04	1,51
I9	316,24	14,32	303,85	536,66	834,95	209,16	215,64	1,04	1,50
I10	321,57	14,39	300,10	534,31	834,76	210,12	215,83	1,04	1,50
I11	317,57	14,39	303,98	534,31	836,47	207,83	215,94	1,03	1,51
I12	317,57	14,35	302,53	534,90	834,92	211,86	215,39	1,03	1,50

Com base na Tabela 20, é possível verificar que, a variação de pesagem de cada material não excedeu mais de 5,5 kg entre cada carregamento analisado.

Os resultados da Tabela 20 são utilizados nas análises subsequentes correlacionando estes valores com os respectivos valores de tensão de escoamento e viscosidade dos concretos constituídos por eles, verificando assim sua influência.

A Figura 58 inicia tais relações a partir da análise da influência do consumo de cimento nas propriedades reológicas do concreto com base nas variações observadas na Tabela 20.

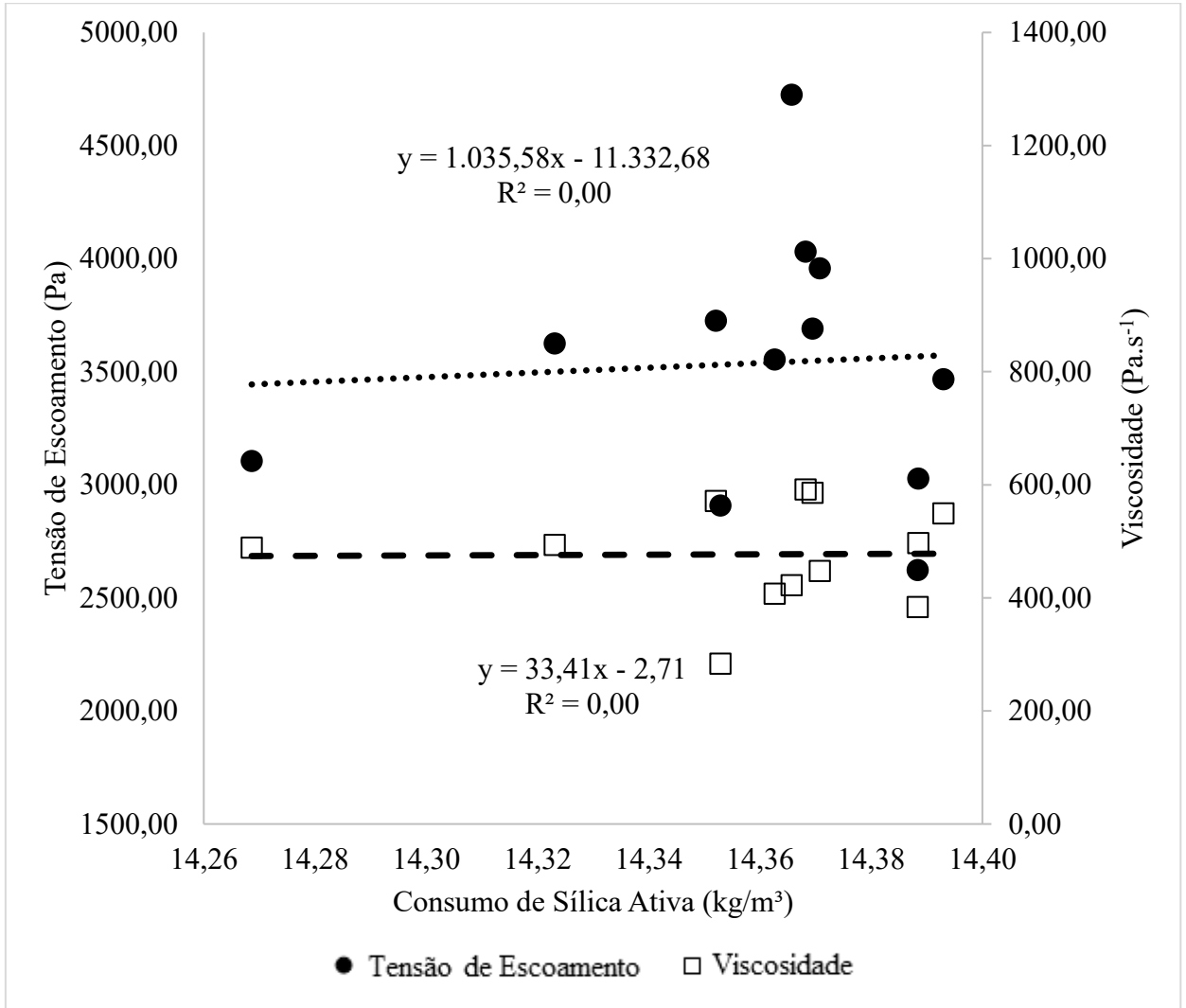
Figura 58 – Consumo de Cimento x Propriedades Reológicas



Com base nos resultados apresentados não há como afirmar que há uma influência da variação do consumo de cimento na propriedade de tensão de escoamento ou na propriedade de viscosidade, para tal nível de variação encontrado no estudo.

A Figura 59 expande a análise tratando do consumo de sílica ativa e novamente correlacionando-a às propriedades reológicas.

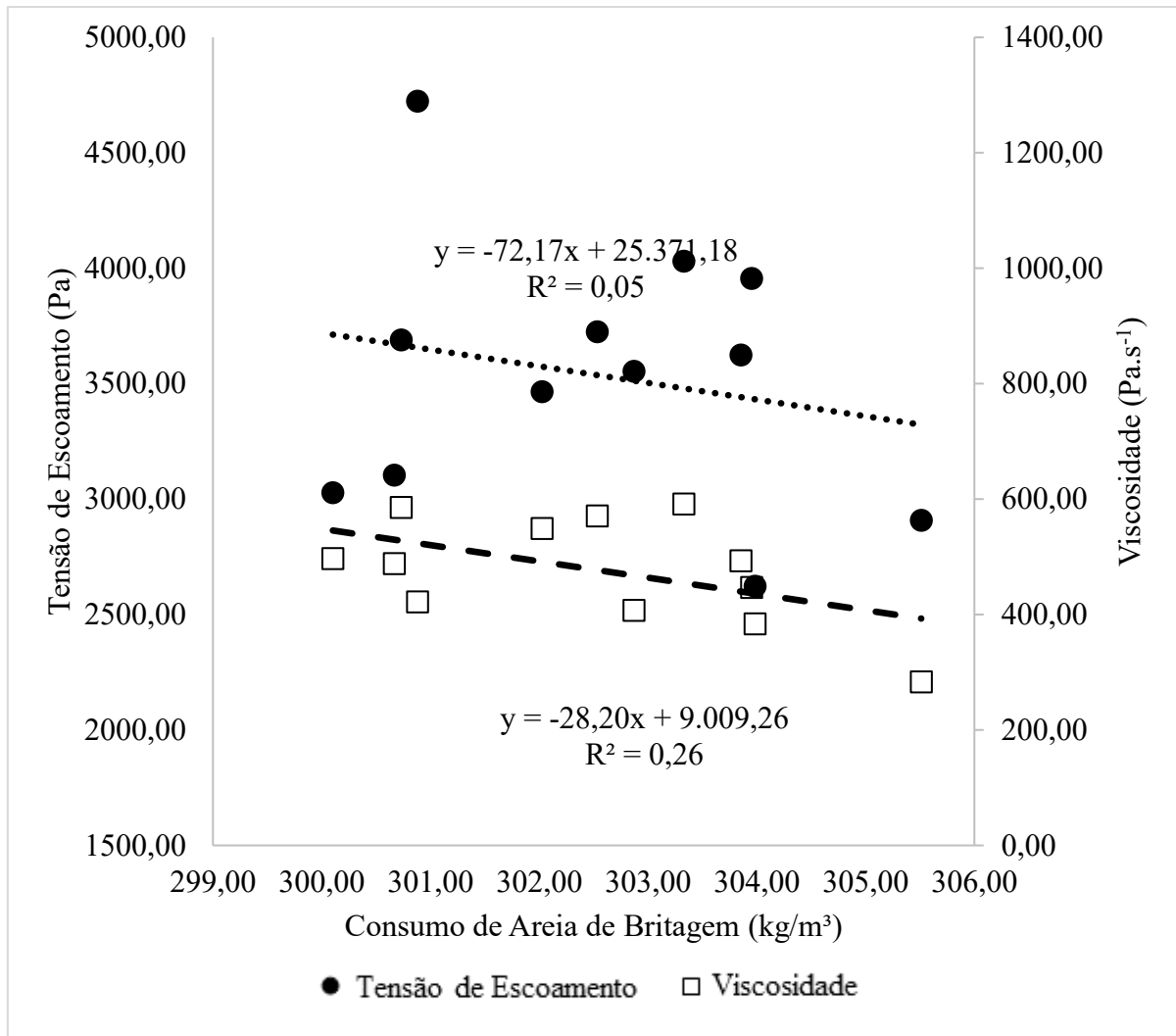
Figura 59 – Consumo de Sílica Ativa x Propriedades Reológicas



Verifica-se que, assim como o cimento não há evidências que a variação do consumo de sílica ativa gerou impacto nas propriedades reológicas dos concretos para o nível de variação observado.

Finalizada a análise inicial relacionada aos aglomerantes, o foco do estudo passa a ser o impacto gerado pelos agregados, assim a Figura 60 a seguir, estuda o impacto do agregado miúdo de britagem.

Figura 60 – Consumo de Areia de Britagem x Propriedades Reológicas



Diferentemente do observado na análise voltada aos aglomerantes, a variação do consumo de areia de britagem impactou em algum grau a reologia dos concretos.

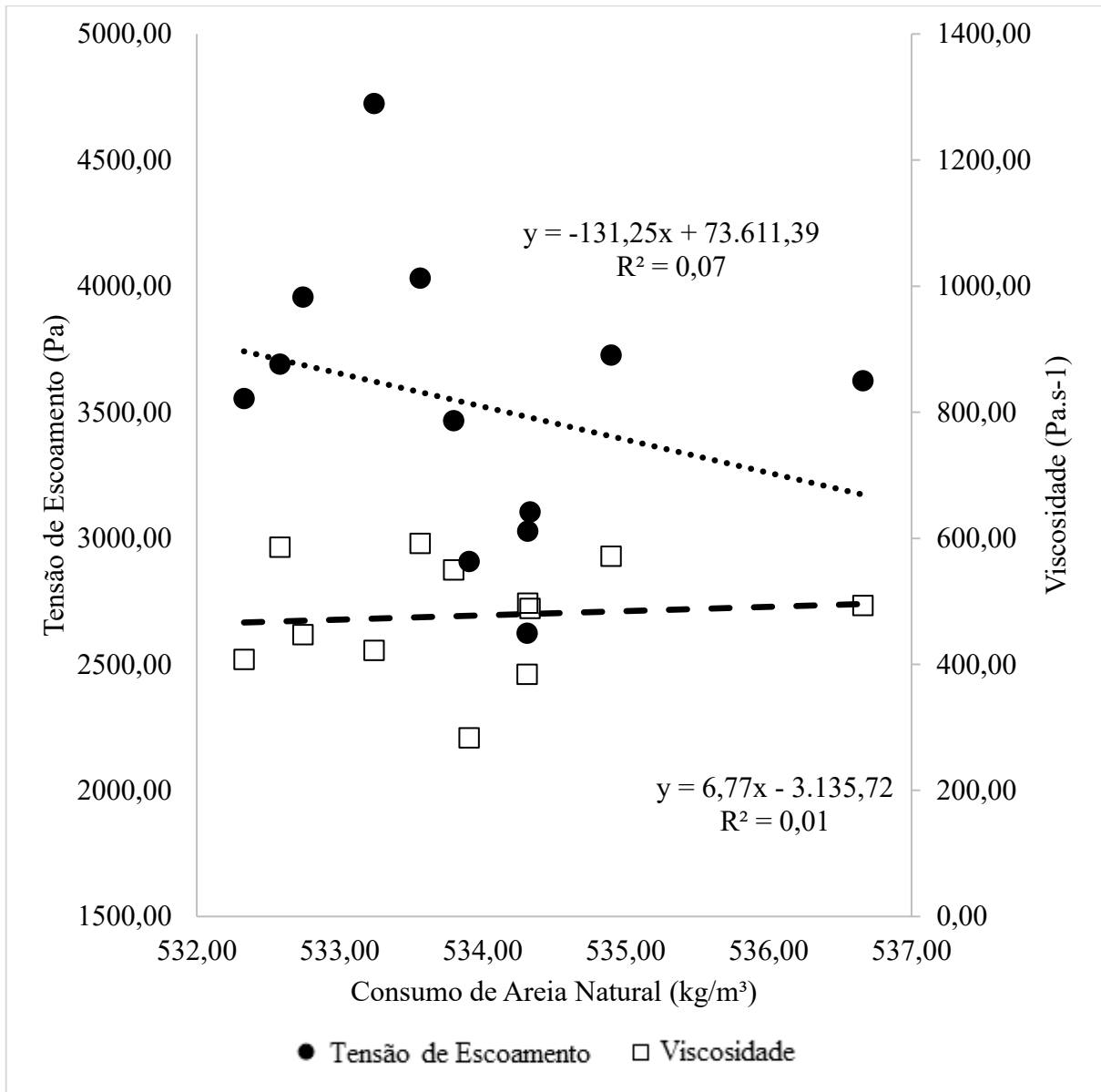
No que tange a propriedade de tensão de escoamento a influência da variação do consumo de areia de britagem apresentou significância superior ao anteriormente observado tanto no consumo de cimento quanto na sílica ativa, entretanto não é elevada.

Já no aspecto do impacto da propriedade reológica de viscosidade, exerceu com 91,03% de significância influência sob tal propriedade.

Concretos com uma maior quantidade de areia de britagem acabaram por apresentar menor valor de viscosidade.

O outro agregado miúdo da mistura, a areia natural, é o foco da relação apresentada na Figura 61.

Figura 61 – Consumo de Areia Natural x Propriedades Reológicas

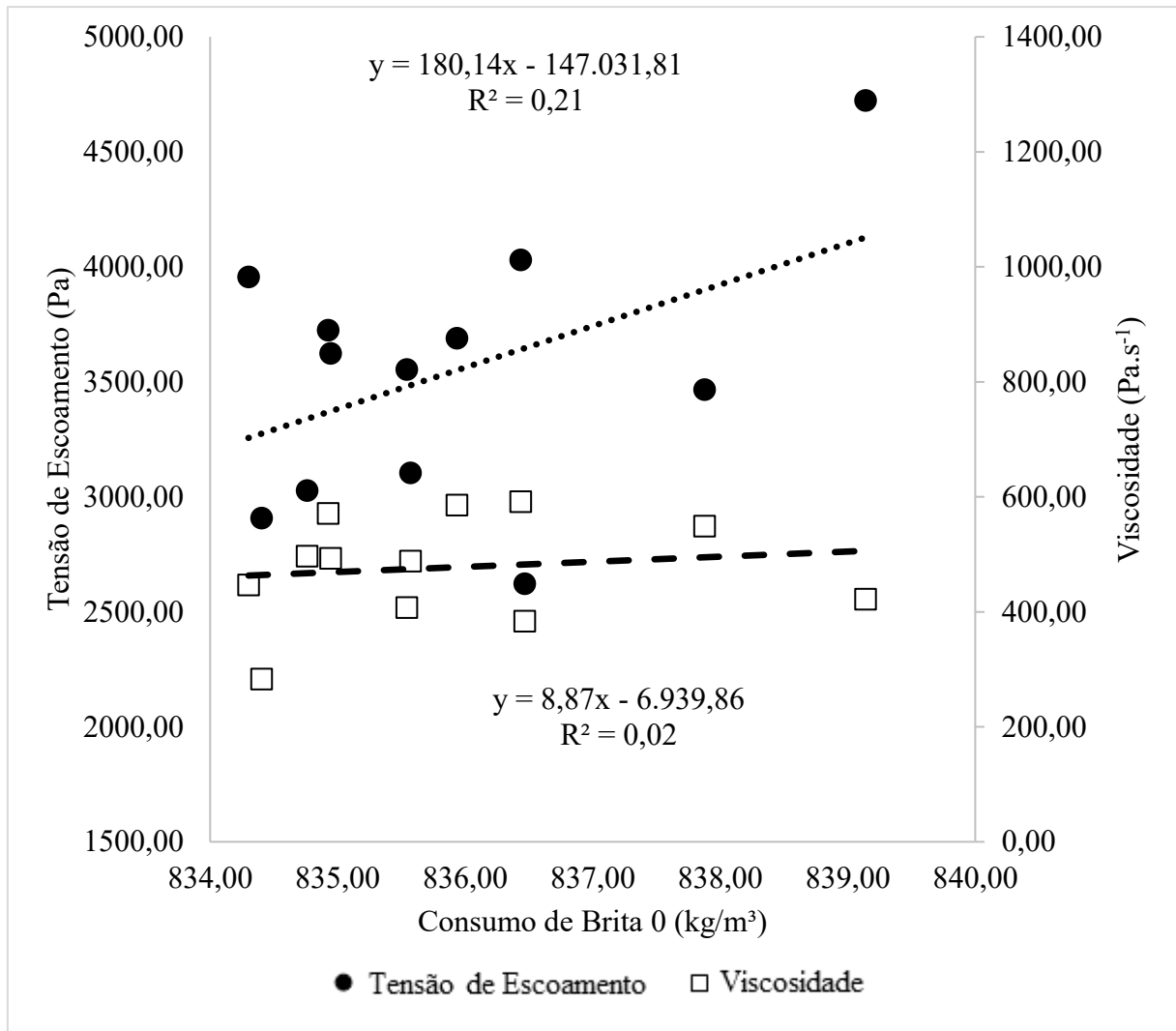


O impacto do consumo de areia natural na propriedade de tensão de escoamento, entretanto, foi mais significante ao ser comparado com o observado na areia de britagem.

Já ao analisar o impacto da variação de carregamento da areia natural na viscosidade do concreto, não foram constatadas para o intervalo analisado uma forte significância na relação analisada.

Iniciando a análise dos agregados graúdos, a Figura 62 análise o impacto observado diante da variação do consumo de brita 0 no carregamento.

Figura 62 – Consumo de Brita 0 x Propriedades Reológicas



A variação de carregamento observada no estudo com o enfoque na quantidade de brita 0 gerou impacto nas propriedades reológicas dos concretos do estudo.

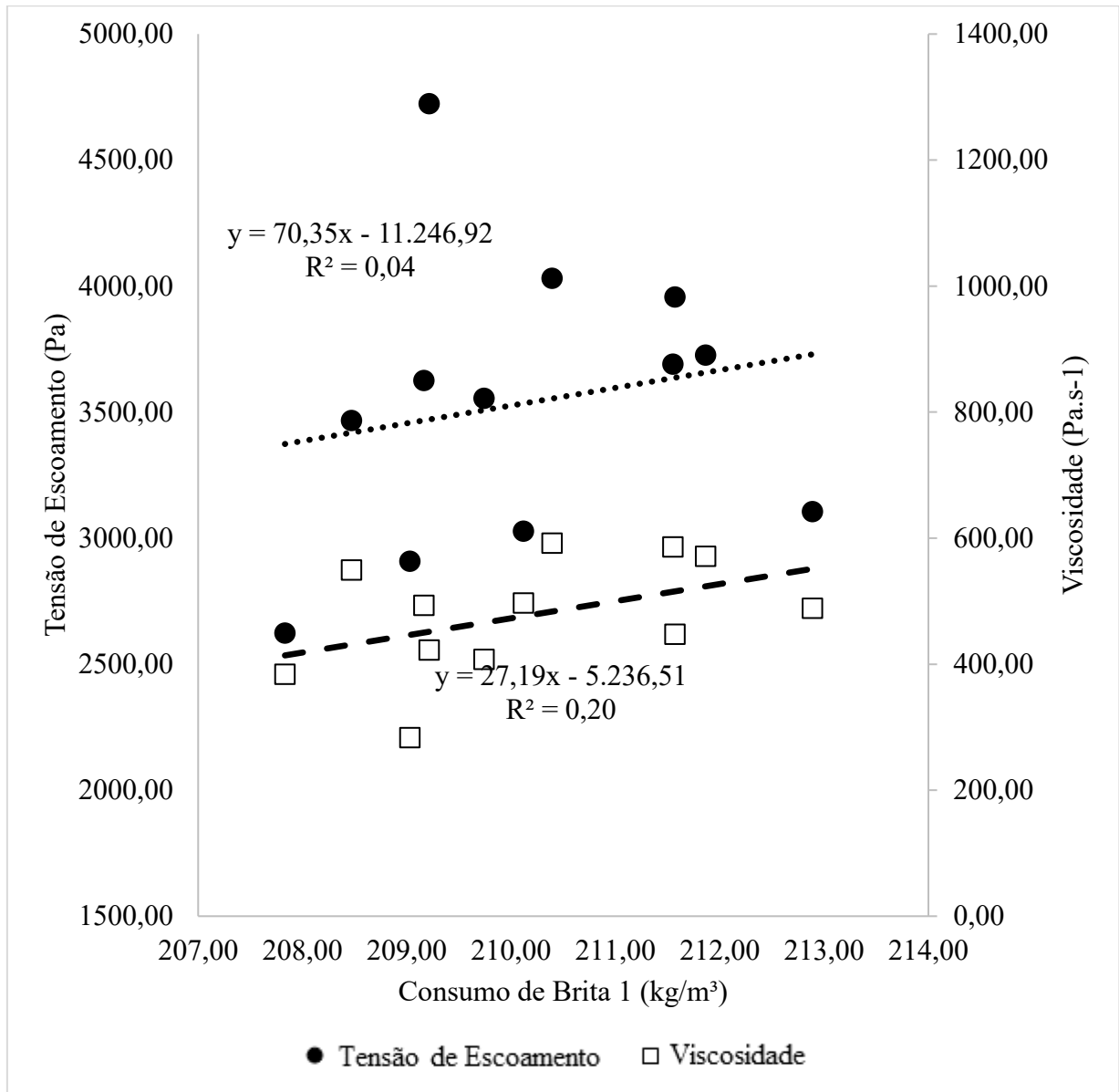
O impacto da quantidade carregada de brita 0 nos concretos gerou maior impacto na propriedade de tensão de escoamento do que na propriedade de viscosidade.

Enquanto na análise dos agregados miúdos o impacto observado na tensão de escoamento era inversamente proporcional a quantidade carregada destes agregados, na análise da quantidade de brita 0, o efeito observado foi o contrário.

Quão maior foi a quantidade de brita 0 na composição do concreto, maior foi sua tensão de escoamento de maneira geral.

A Figura 63 expande a análise da influência dos agregados nas propriedades reológicas dos concretos a partir da análise do último agregado da composição, a brita 1.

Figura 63 – Consumo de Brita 1 x Propriedades Reológicas



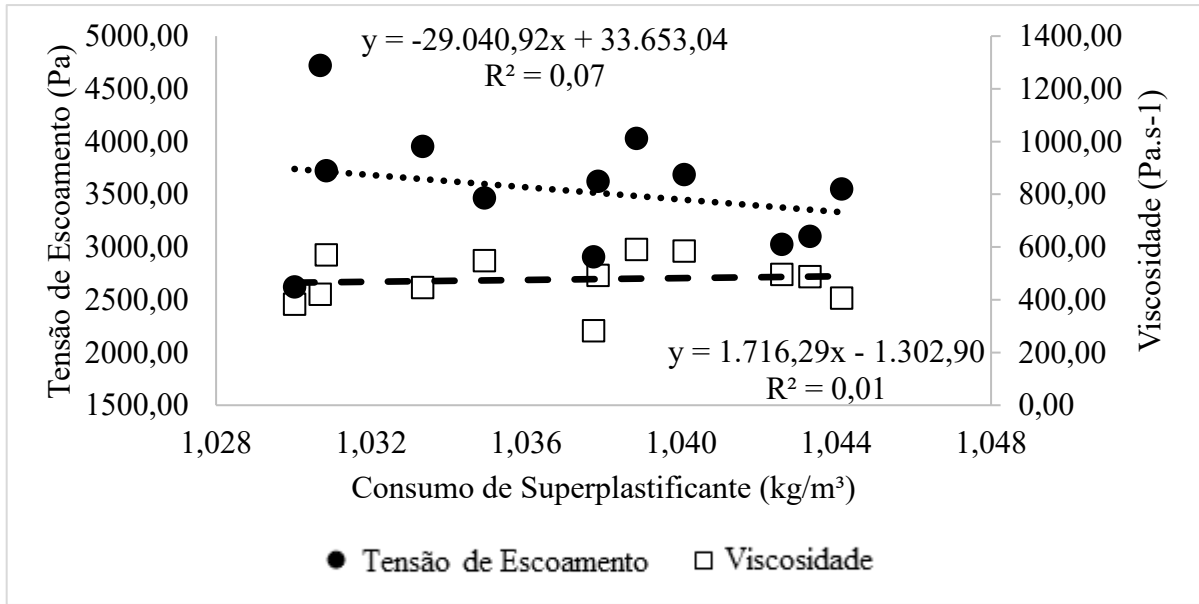
Assim como o observado na análise da brita 0, a variação de carregamento da quantidade de brita 1 na composição dos concretos do estudo impactou as propriedades reológicas destes concretos.

Assim como a brita 0, a variação da quantidade de brita 1 nos concretos gerou um impacto diretamente proporcional na propriedade de tensão de escoamento.

Ao contrário da brita 0, o impacto da quantidade de brita 1 nos concretos do estudo teve maior significância na propriedade de viscosidade.

Cessada a análise da influência dos agregados, na Figura 64 apresentada na sequência se inicia a análise das variações observadas na quantidade carregada de aditivo superplastificante nos concretos do estudo com suas propriedades reológicas.

Figura 64 – Consumo de Aditivo Superplastificante x Propriedades Reológicas

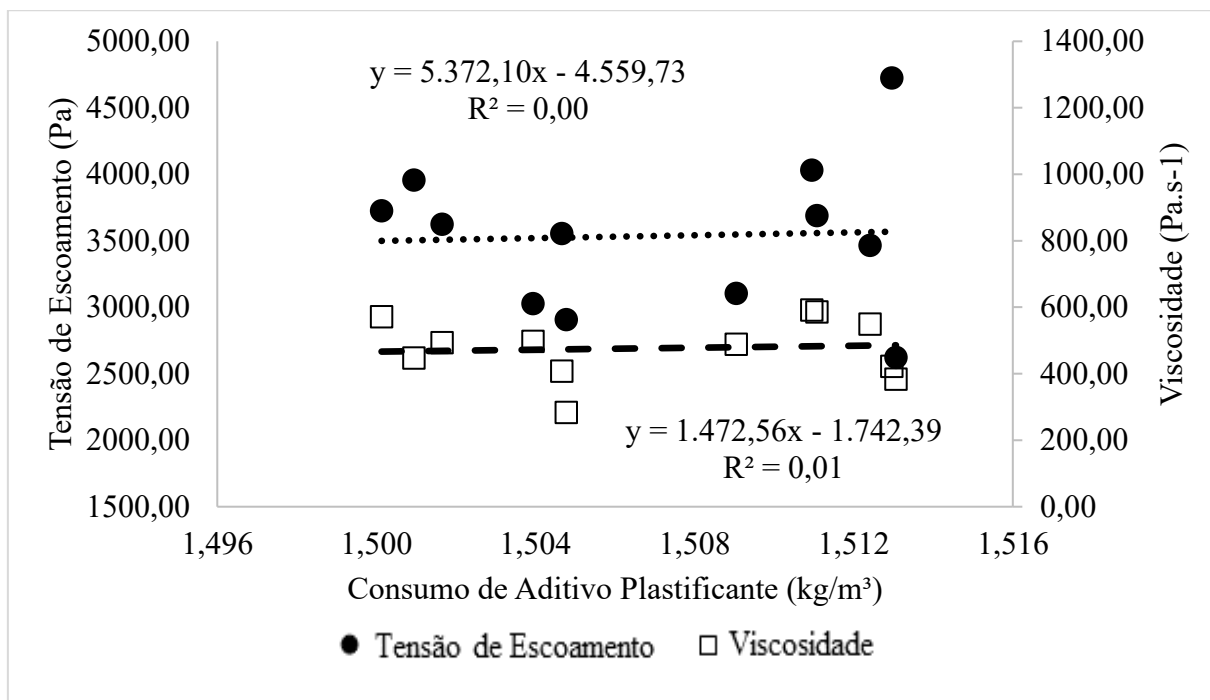


Apesar do pequeno intervalo de variação do estudo, verifica-se que a quantidade de aditivo superplastificante na composição dos concretos teve algum nível de significância na propriedade de tensão de escoamento.

Na propriedade de viscosidade não foi observada influência com elevada significância da quantidade de superplastificante dos concretos no intervalo restrito de variação do estudo.

O impacto da quantidade de aditivo plastificante nas propriedades reológicas também é explorado na Figura 65 a seguir.

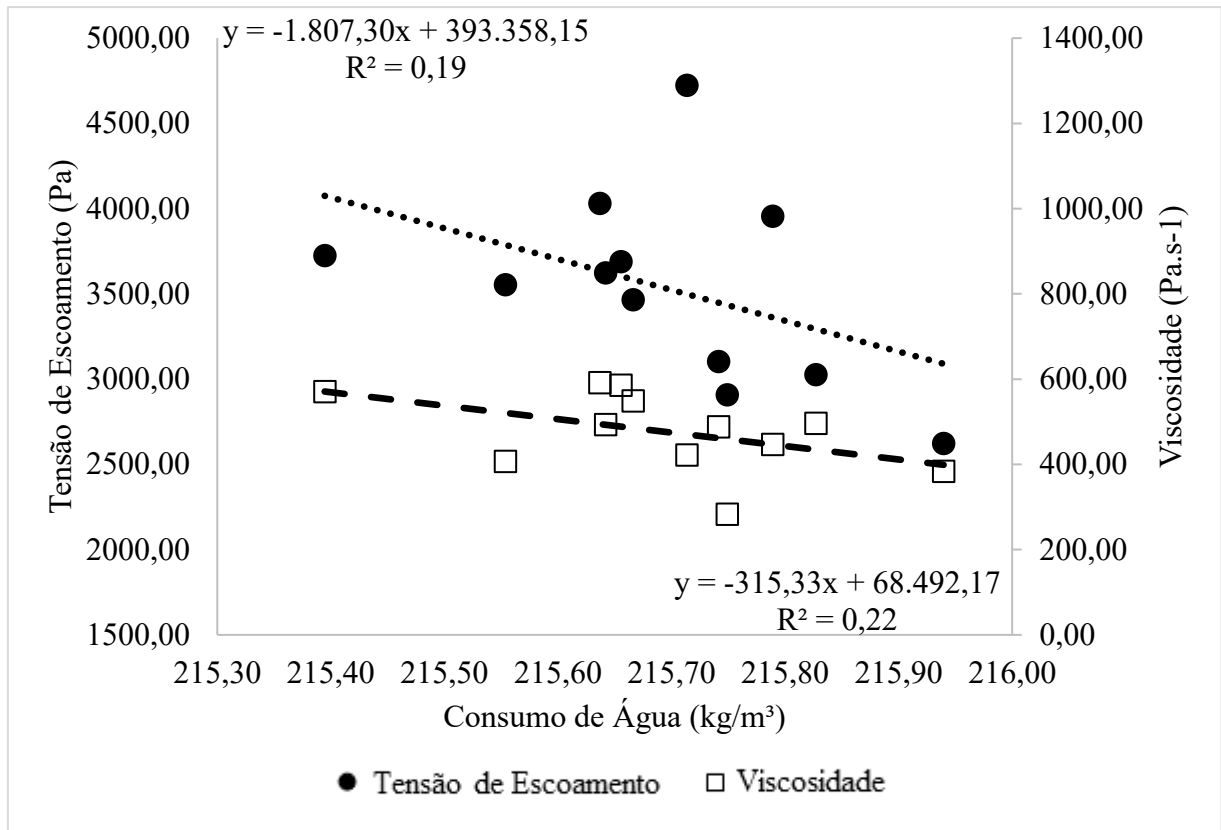
Figura 65 – Consumo de Aditivo Plastificante x Propriedades Reológicas



Diferentemente do observado na análise da variação dos aditivos superplastificantes que houve relativo impacto na propriedade de tensão de escoamento, a variação de aditivo plastificante observada no estudo não apresentou significância considerável na propriedade de tensão de escoamento e nem na propriedade de viscosidade.

Na Figura 66 a seguir o impacto do consumo de água nas propriedades reológicas dos concretos do estudo é explorada.

Figura 66 – Consumo de Água x Propriedades Reológicas



A variação do consumo de água, mesmo que pequena, observada no estudo teve significância na variação tanto da propriedade reológica de tensão de escoamento, quanto na propriedade de viscosidade.

A variação da quantidade de água nos concretos foi inversamente proporcional tanto na propriedade reológica de tensão de escoamento, quanto na propriedade de viscosidade.

Concretos com maior quantidade de água em sua composição apresentaram elevada de maneira geral menores valores de tensão de escoamento e viscosidade.

A seguir serão apresentadas as análises de significância das variações de carregamento nas propriedades reológicas dos concretos para expandir as discussões e apontar principais pontos de atenção na composição dos concretos.

A Tabela 21 a seguir explora a análise das variações de carregamento com a propriedade de tensão de escoamento.

Tabela 21 – Análise de Significância Variações de Carregamento x Tensão de Escoamento

Relação	Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Cimento (kg) Tensão de Escoamento	10	13,20%	-0,17	597,30 (Pa)

Sílica Ativa (kg)	Tensão de Escoamento	10	15,18%	0,20	471,50 (Pa)
Areia Artificial (kg)	Tensão de Escoamento	10	49,33%	-0,69	584,48 (Pa)
Areia Natural (kg)	Tensão de Escoamento	10	60,57%	-0,89	575,80 (Pa)
Brita 0 (kg)	Tensão de Escoamento	10	86,62%	1,63	531,59 (Pa)
Brita 1 (kg)	Tensão de Escoamento	10	44,45%	0,61	587,34 (Pa)
Água Carregamento (kg)	Tensão de Escoamento	10	84,57%	-1,54	537,72 (Pa)
Super Plastificante (kg)	Tensão de Escoamento	10	58,04%	-0,84	578,05 (Pa)
Plastificante (kg)	Tensão de Escoamento	10	11,45%	0,15	597,52 (Pa)

Sendo o principal parâmetro na demanda de pressão no sistema de bombeamento no que tange as propriedades dos concretos, a tensão de escoamento foi significativamente influenciada por variações de carregamento dos concretos.

Apesar de serem interdependentes e não serem analisados de forma isolada a análise de variância permite indicar quais constituintes exerceram maior influência na propriedade de tensão de escoamento.

Tanto a variação da quantidade de cimento quanto a quantidade de sílica não apresentaram variação significativa na propriedade de tensão de escoamento, assim como a variação da quantidade de aditivo plastificante acabou por não ser detectada como significativa na análise realizada.

Em ordem de significância os constituintes que mais influenciaram a propriedade de tensão de escoamento foram a brita 0 ($t=1,63$), a água ($t=-1,54$), a areia natural ($t=-0,89$) e o aditivo superplastificante ($t=-0,84$).

A variação do consumo de brita 0 foi o que mais impactou de forma direta a propriedade de tensão de escoamento e concretos com maior quantidade deste material apresentaram de forma geral maior valor de tensão de escoamento.

Tendo comportamento inverso ao observado na análise da brita 0, o consumo de água dos concretos foi o parâmetro que mais influenciou na diminuição na tensão de escoamento dos concretos, seguido pela quantidade de areia natural e no consumo de superplastificante.

Ressaltando-se que a propriedade de tensão de escoamento não é a única a ser considerada em uma condição extrema de bombeamento, a Tabela 22 a seguir explora a relação das variações de carregamento com a propriedade de viscosidade também relevante na potencialização da bombeabilidade de um concreto.

Tabela 22 – Análise de Significância Variações de Carregamento x Viscosidade

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Cimento (Kg)	Viscosidade	10	9,22%	0,12	97,30 (Pa.s ⁻¹)
Sílica Ativa (Kg)	Viscosidade	10	3,02%	0,04	97,37 (Pa.s ⁻¹)
Areia Artificial (Kg)	Viscosidade	10	91,03%	-1,88	83,71 (Pa.s ⁻¹)
Areia Natural (Kg)	Viscosidade	10	20,91%	0,27	97,01 (Pa.s ⁻¹)
Brita 0 (Kg)	Viscosidade	10	33,28%	0,44	96,43 (Pa.s ⁻¹)
Brita 1 (Kg)	Viscosidade	10	85,75%	1,59	86,97 (Pa.s ⁻¹)
Água Carregamento	Viscosidade	10	87,65%	-1,68	85,97 (Pa.s ⁻¹)
Super Plastificante (Kg)	Viscosidade	10	22,72%	0,30	96,95 (Pa.s ⁻¹)
Plastificante (Kg)	Viscosidade	10	19,17%	0,25	97,07 (Pa.s ⁻¹)

Assim como destacado na análise de significância na relação das variações de carregamento com a propriedade de tensão de escoamento, ao analisar a relação destas variações com a propriedade de viscosidade, em ordem de significância, os constituintes que mais influenciaram a propriedade de viscosidade foram o consumo de areia artificial ($t=-1,88$), o consumo de água ($t=-1,68$) e o consumo de brita 1 ($t=1,59$).

Já os demais constituintes não apresentaram elevado grau de significância de sua variação na propriedade de viscosidade dos concretos no estudo.

Diferentemente do observado na análise de significância com o enfoque na tensão de escoamento a brita 1 que não apresentou elevada significância relacionada a tal parâmetro, foi o material que mais impactou de forma direta a propriedade de viscosidade, e concretos com maior quantidade deste material apresentaram de maneira geral valores mais elevados de viscosidade.

Sendo novamente inversamente proporcional à propriedade reológica em estudo, a água também apresentou elevado grau de significância em relação à viscosidade.

Verifica-se assim que variações de carregamento podem vir a gerar impactos significantes nas propriedades reológicas dos concretos que podem vir a gerar fatores impeditivos ao bombeamento em condições críticas.

4.2.2 Volumetria Constituintes

Como as variações de carregamento acabam por gerar interações diferentes entre si, o presente item analisa a influência volumétrica dos constituintes no desempenho de bombeamento.

Conforme apontado em 2.2, o processo de bombeamento constitui-se no transporte de uma volumetria de materiais a partir da ação dos pistões da bomba.

Assim, a partir do processo descrito em 3.2.4, os materiais são corrigidos e convertidos para a volumetria real produzida a partir da determinação da determinação da massa específica em campo do concreto analisado.

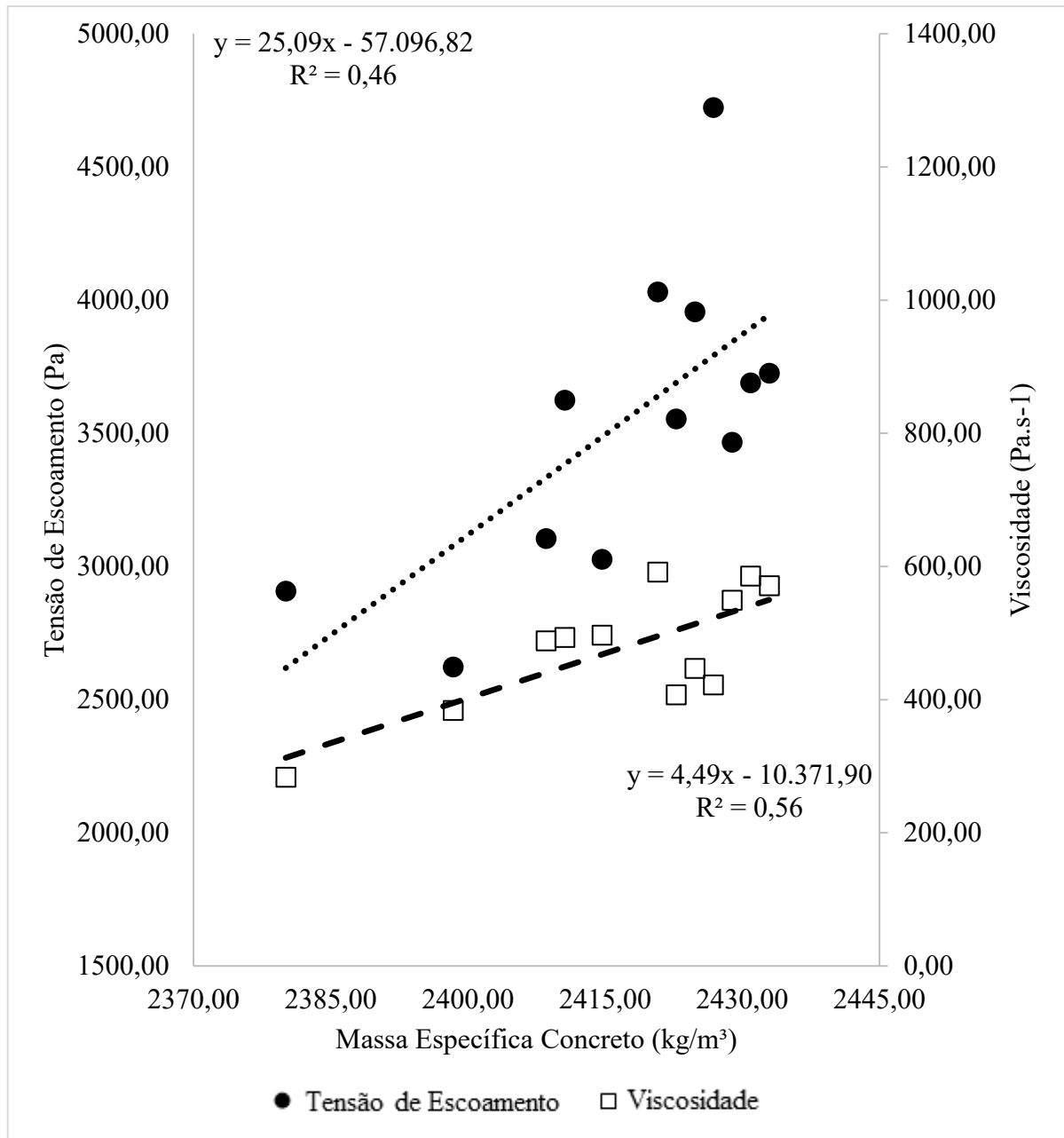
A Tabela 23 a seguir apresenta os valores obtidos na campanha experimental do Infinity Coast para a determinação da massa específica dos concretos produzidos, bem como o teor de ar incorporado determinado.

Tabela 23 – Volumetria Concretos

Identificação Concreto	Massa Específica (kg/m³)	Teor de Ar Incorporado (%)	Identificação Concreto	Massa Específica (kg/m³)	Teor de Ar Incorporado (%)
I1	2426,83	0,28%	I7	2420,73	0,53%
I2	2430,89	0,13%	I8	2408,54	1,02%
I3	2424,80	0,36%	I9	2410,57	0,94%
I4	2380,08	2,19%	I10	2414,63	0,78%
I5	2422,76	0,47%	I11	2398,37	1,42%
I6	2428,86	0,20%	I12	2432,93	0,05%

A Figura 67 apresenta a relação da massa específica dos concretos produzidos com as propriedades reológicas dos concretos.

Figura 67 – Massa Específica Concreto x Propriedades Reológicas



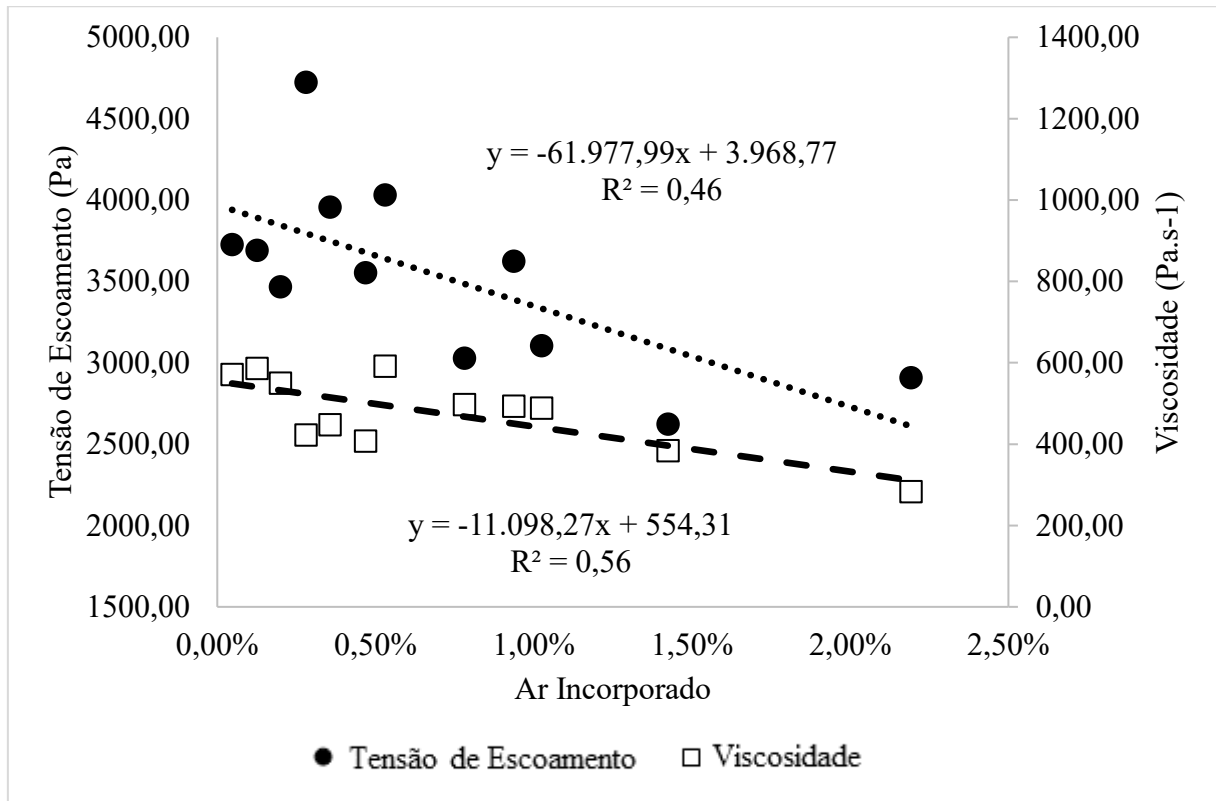
Conforme é possível verificar, a massa específica do concreto apresenta fortes relações tanto com a propriedade de tensão de escoamento quanto com a viscosidade dos concretos.

Concretos de maior valor para sua massa específica, apresentaram maiores valores de forma geral de tensão de escoamento e viscosidade.

O parâmetro reológico de viscosidade apresentou maior significância ao ser relacionado a massa específica dos concretos em estudo.

O ar incorporado em destaque na Tabela 23 também é explorado na Figura 68 a seguir, também sendo relacionado às propriedades reológicas dos concretos.

Figura 68 – Teor de Ar Incorporado x Propriedades Reológicas



Assim como a massa específica do concreto, o ar incorporado nos concretos apresentou uma forte significância nas relações com a tensão de escoamento e com a viscosidade dos concretos.

Assim como a massa específica o ar incorporado apresentou uma melhor relação de significância com a propriedade reológica de viscosidade.

A Tabela 24 explora a análise de significância da determinação volumétrica dos concretos do estudo com as propriedades reológicas, utilizando a massa específica experimental obtida em campo para reduzir todo o carregamento a uma unidade de volume (m^3).

Tabela 24 – Análise de Significância Volumetria Concreto x Propriedades Reológicas

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Ar Incorporado (%)	Tensão de Escoamento	10	98,50%	-2,93	438,75 (Pa)
Ar Incorporado (%)	Viscosidade	10	99,48%	-3,56	64,66 (Pa.s ⁻¹)
Massa Específica (kg/m ³)	Tensão de Escoamento	10	98,48%	2,92	439,24 (Pa)
Massa Específica (kg/m ³)	Viscosidade	10	99,47%	3,54	64,83 (Pa.s ⁻¹)

Diante dos valores apresentados, destaca-se que, o ar incorporado exerce influência na massa específica dos concretos, sendo uma possível razão para os valores na análise de significância terem ficados tão próximos.

Apesar de próximos a determinação do ar incorporado mostrou-se mais significativa na relação com as propriedades reológicas.

Ressalta-se que apesar de mais significativa, a determinação em campo da massa específica do concreto se faz mais simples de determinar, sendo um bom indicativo de caracterização dos concretos e avaliação de conformidade de bombeabilidade dos concretos *in loco*.

A Tabela 25 a seguir expande as relações realizadas no item 4.2.1 ao apresentar a volumetria dos materiais constituintes em cada concreto do estudo, a serem usados em unidade de volume (dm^3/m^3) nas relações subsequentes da presente dissertação.

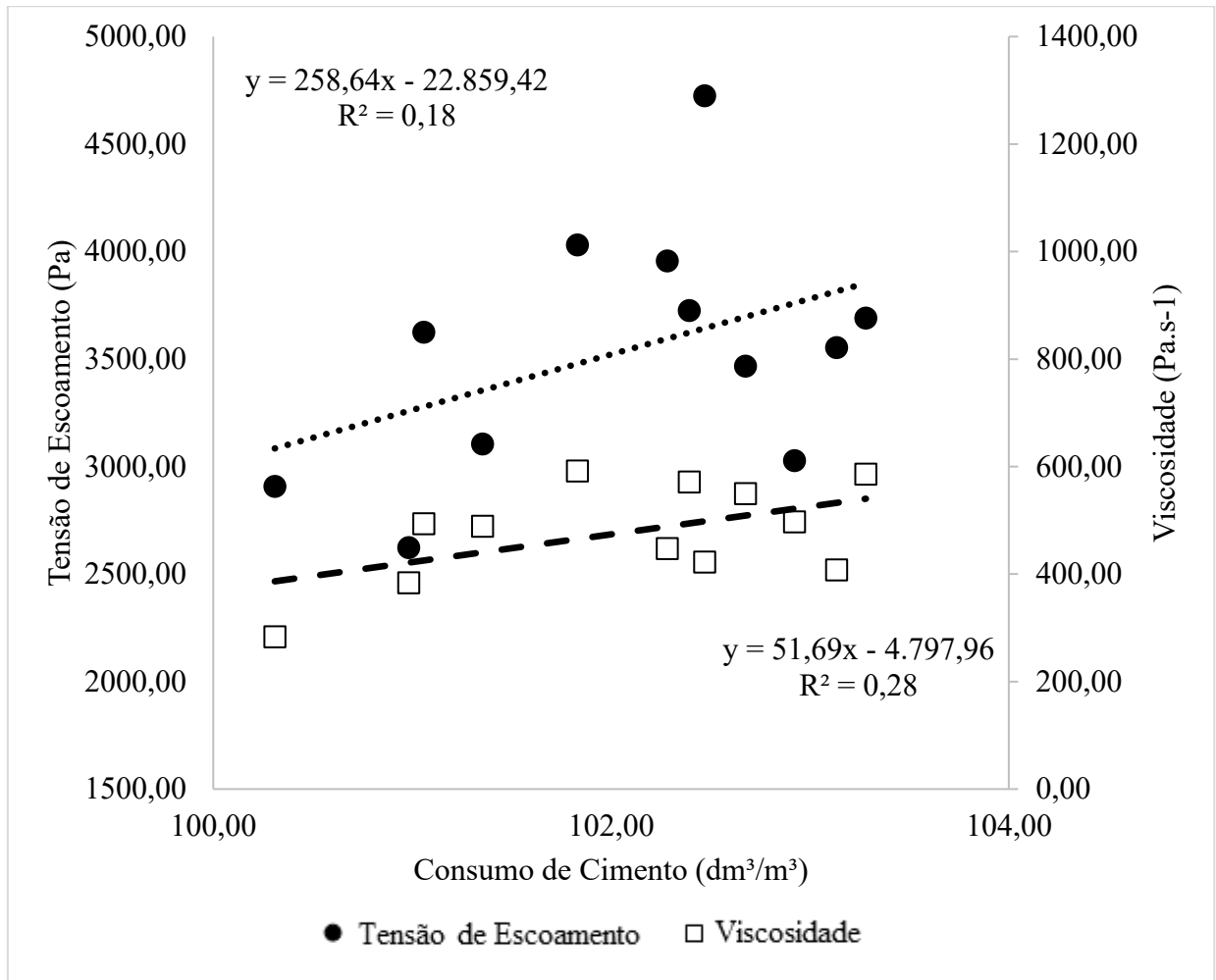
Tabela 25 – Constituintes Volumétricos dos Concretos – Infinity Coast

Identificação Concreto	Cimento	Sílica Ativa	Areia de Britagem	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Água	Super Plastificante	Plastificante
I1	102,47	6,45	107,16	196,94	293,61	73,20	215,11	0,95	1,30
I2	103,28	6,46	107,27	197,00	292,94	74,13	215,38	0,96	1,30
I3	102,28	6,45	108,17	196,61	291,69	73,97	215,02	0,95	1,29
I4	100,31	6,32	106,72	193,41	286,36	71,74	211,02	0,94	1,27
I5	103,13	6,44	107,66	196,24	291,80	73,25	214,54	0,96	1,29
I6	102,68	6,47	107,65	197,31	293,41	73,00	215,24	0,96	1,30
I7	101,83	6,44	107,76	196,57	291,93	73,43	214,49	0,96	1,30
I8	101,35	6,36	106,28	195,87	290,18	73,93	213,53	0,96	1,29
I9	101,06	6,39	107,50	196,90	290,22	72,70	213,62	0,95	1,28
I10	102,92	6,43	106,34	196,35	290,61	73,15	214,14	0,96	1,29
I11	100,98	6,39	107,02	195,07	289,32	71,88	212,86	0,94	1,29
I12	102,39	6,46	108,00	198,02	292,82	74,30	215,29	0,95	1,29

As variações volumétricas apresentas na Tabela 25 são utilizados nas análises subsequentes correlacionando estes valores com os respectivos valores de tensão de escoamento e viscosidade dos concretos constituídos por eles, verificando assim sua influência.

A Figura 69 inicia tais relações a partir da análise da influência do volume de cimento nas propriedades reológicas dos concretos.

Figura 69 – Volume de Cimento x Propriedades Reológicas

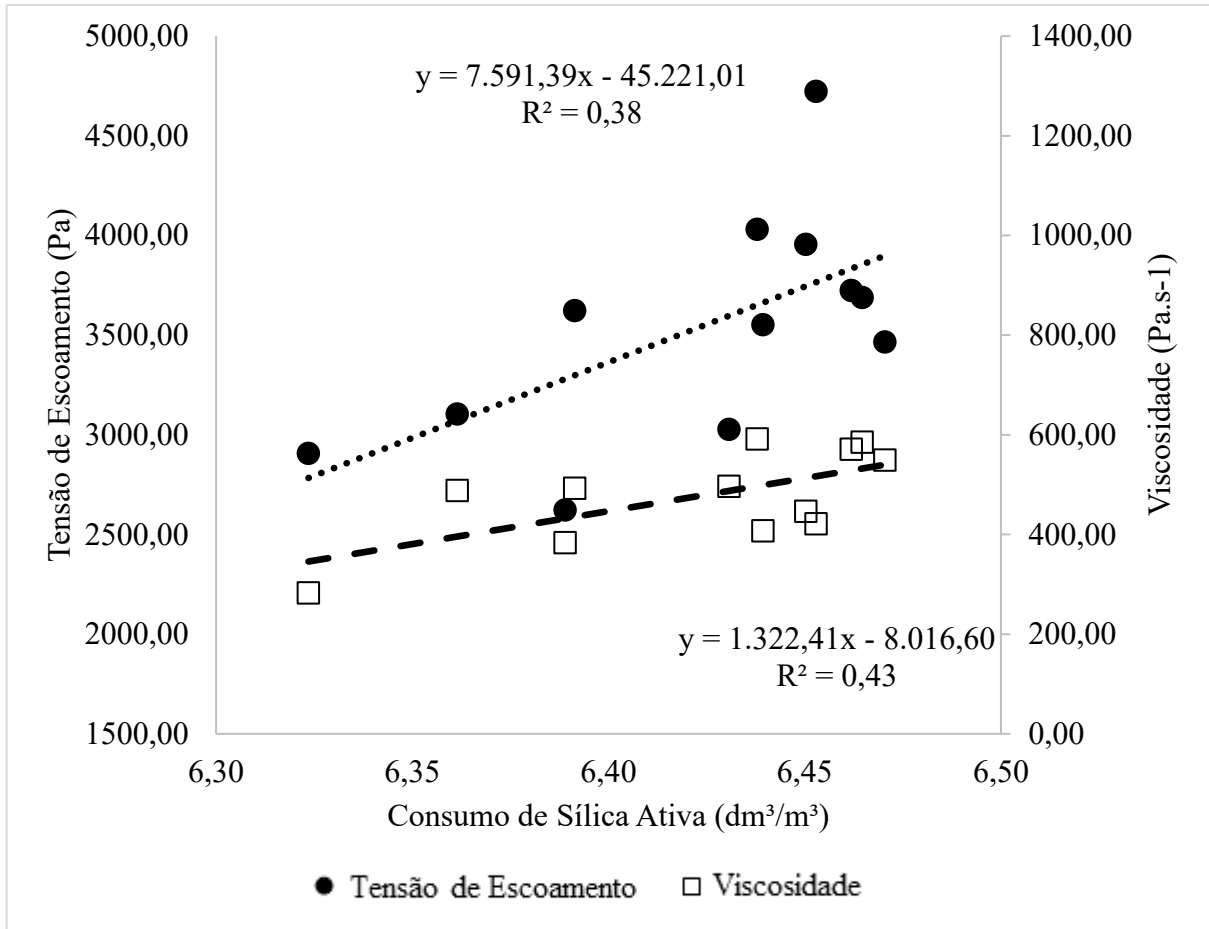


Diferentemente da análise realizada anteriormente na Figura 58 onde ao analisar se a variação de carregamento em massa absoluta de cimento não foi significativa, ao realizar tal análise voltada à volumetria de cimento há a constatação da influência de tal material nas propriedades reológicas dos concretos.

Mesmo diante do baixo intervalo de variação, se fez possível apontar que o consumo de cimento exerce maior influência na propriedade reológica de viscosidade do que na tensão de escoamento dos concretos.

Assim como realizado para o volume de cimento, a influência do volume de sílica ativa nos concretos é avaliada na Figura 70 na sequência.

Figura 70 – Volume de Sílica Ativa x Propriedades Reológicas



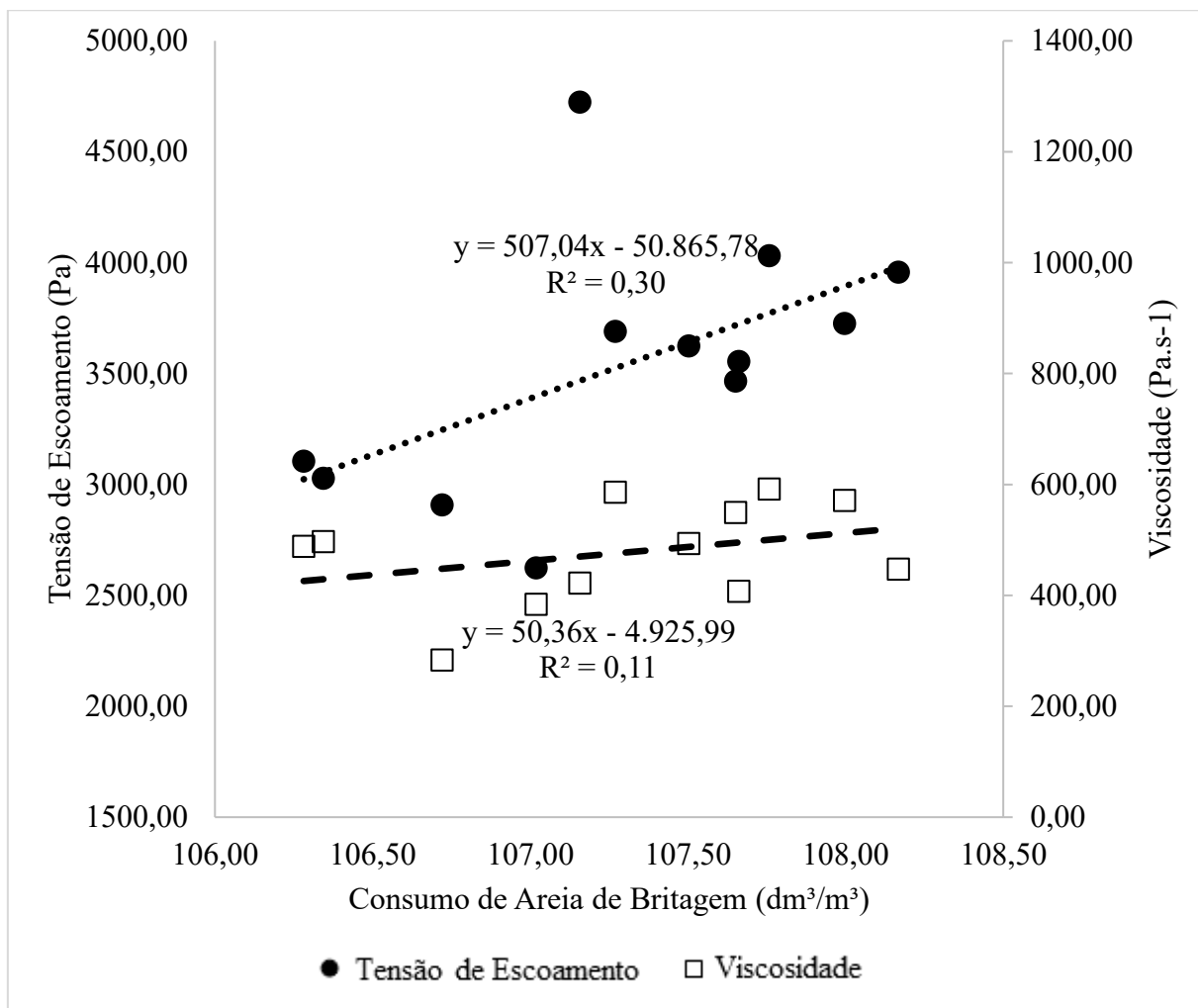
Como na análise da variação de carregamento do cimento com o enfoque na volumetria, a variação volumétrica da sílica ativa que anteriormente não havia sido identificada como significativa ao ser analisada de forma absoluta no carregamento (em massa), mostrou-se significativa tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade.

O impacto da variação volumétrica da sílica ativa na viscosidade foi superior ao observado na tensão de escoamento.

Tem-se assim que os aglomerantes ao serem analisados na ótica volumétrica, exercem influência nos parâmetros reológicos dos concretos do estudo, mesmo sendo pequenos os intervalos de variação, algo que anteriormente não havia sido constatado ao analisar tal variação apenas na ótica global (em massa).

A Figura 71 inicia a avaliação da variação volumétrica dos agregados nas propriedades reológicas dos concretos com a análise do impacto da variação volumétrica de areia de britagem nestas propriedades.

Figura 71 – Volume de Areia de Britagem x Propriedades Reológicas



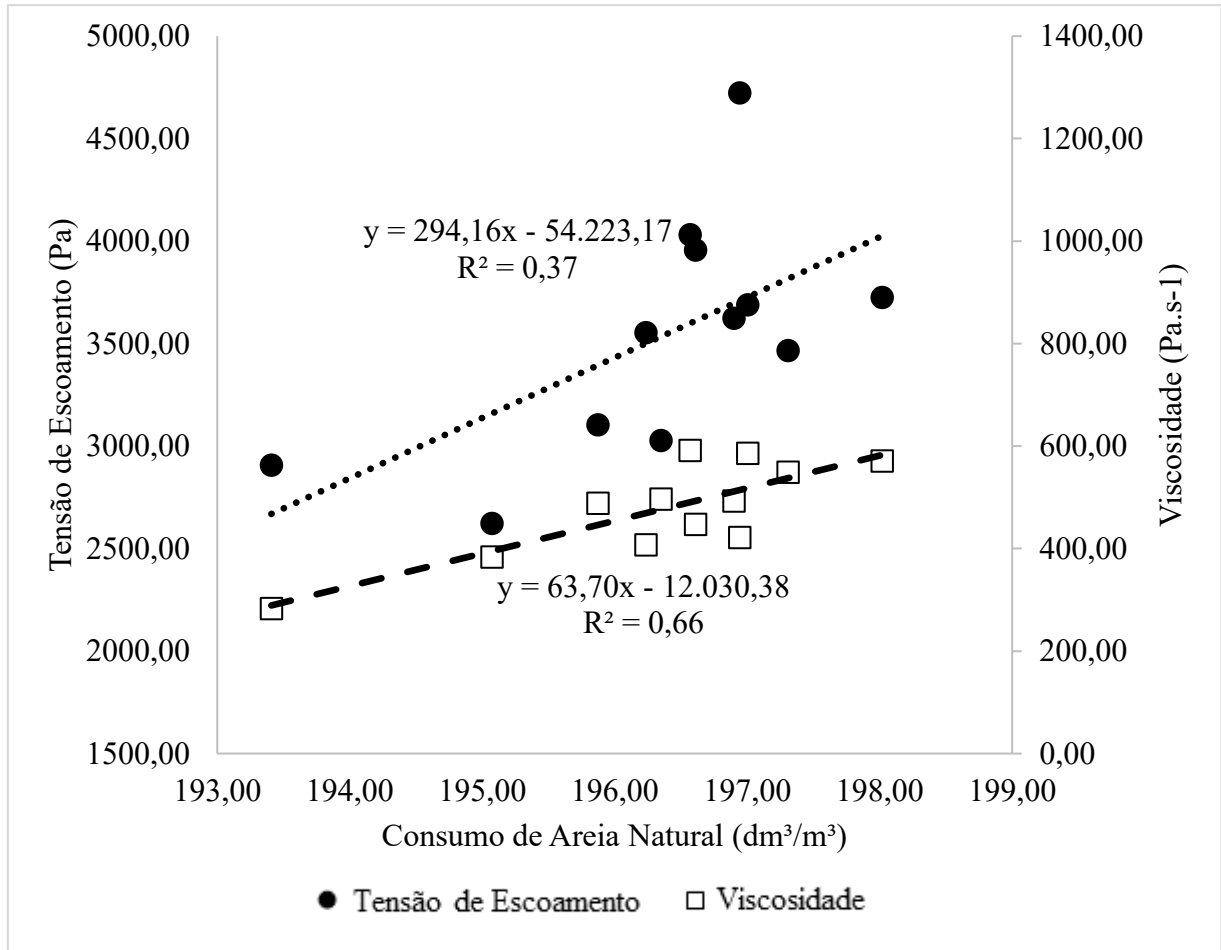
Nas relações realizadas verifica-se que o consumo volumétrico de areia de britagem exerce influência tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade dos concretos.

Anteriormente, a areia de britagem havia se mostrado mais significativa na influência da viscosidade dos concretos ao ser verificado de forma absoluta (em massa), já na presente análise realizada a influência se inverteu, sendo mais significativa agora na tensão de escoamento dos concretos.

A significância da relação com a propriedade de tensão de escoamento que anteriormente não apresentava uma significância que deveria ser destacada, na ordem de 49,33%, apresentou uma significância mais pronunciada.

Assim como realizado para a areia de britagem, a variação do volume de areia Natural é explorada na Figura 72 a seguir.

Figura 72 – Volume de Areia Natural x Propriedades Reológicas



A influência da variação da volumetria de areia natural nos concretos do estudo mostrou-se mais significativa nas propriedades reológicas dos concretos do que o anteriormente verificado na análise da variação absoluta de carregamento.

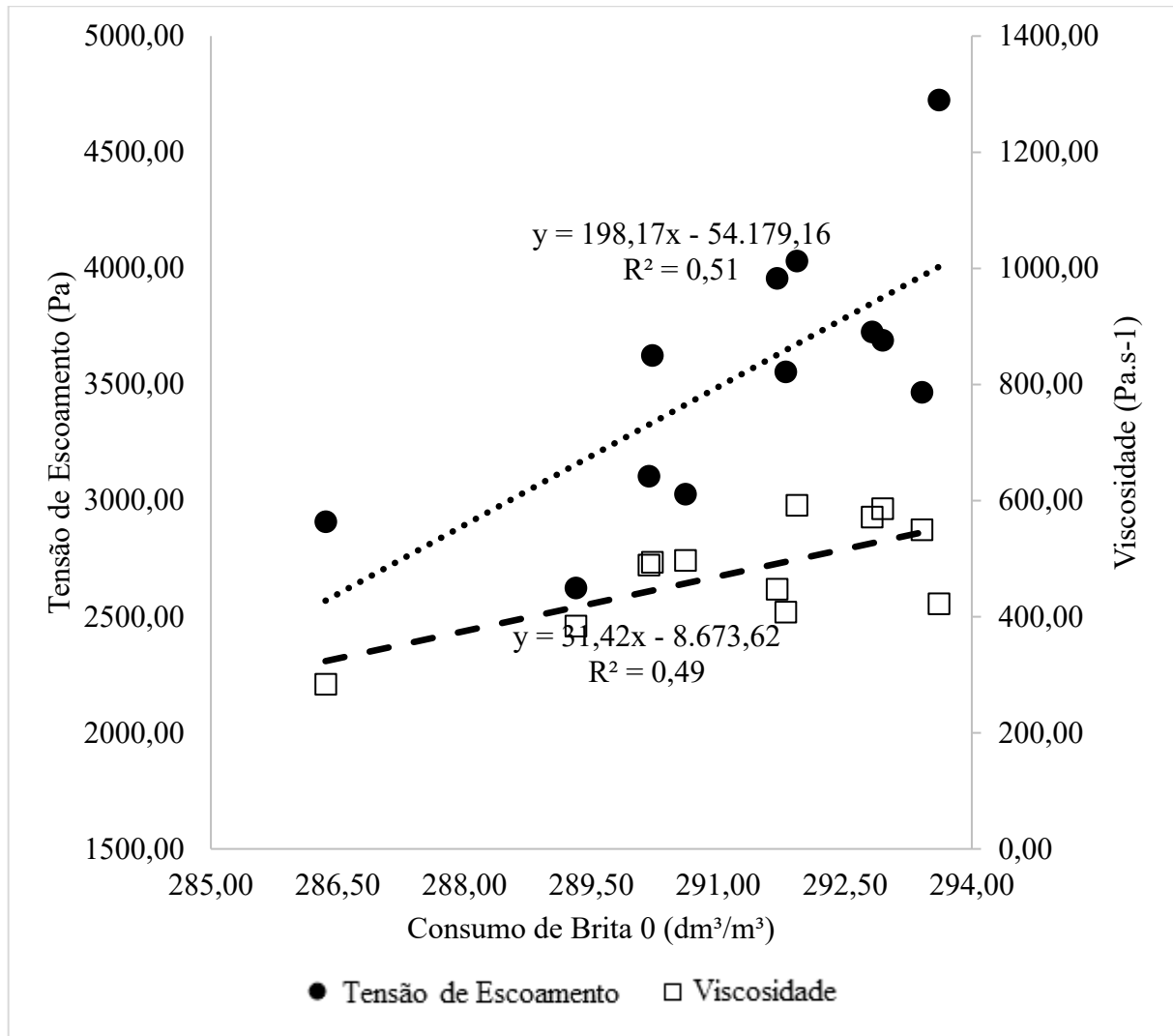
O consumo volumétrico de areia natural mostrou-se mais significativo na influência do parâmetro de viscosidade do que o anteriormente observado na análise da variação absoluta de carregamento.

Anteriormente a variação de carregamento da areia natural havia sido mais influente no parâmetro de tensão de escoamento do que no parâmetro de viscosidade, na presente análise a lógica foi invertida.

Mesmo tendo sido invertida, a significância da variação volumétrica na propriedade de tensão de escoamento foi mais intensa do que o que fora anteriormente observado na relação apresentada na Figura 61.

Assim como realizado para os agregados miúdos a Figura 73 avalia a influência do primeiro agregado graúdo, a brita 0, nas propriedades reológicas dos concretos do estudo.

Figura 73 – Volume de Brita 0 x Propriedades Reológicas



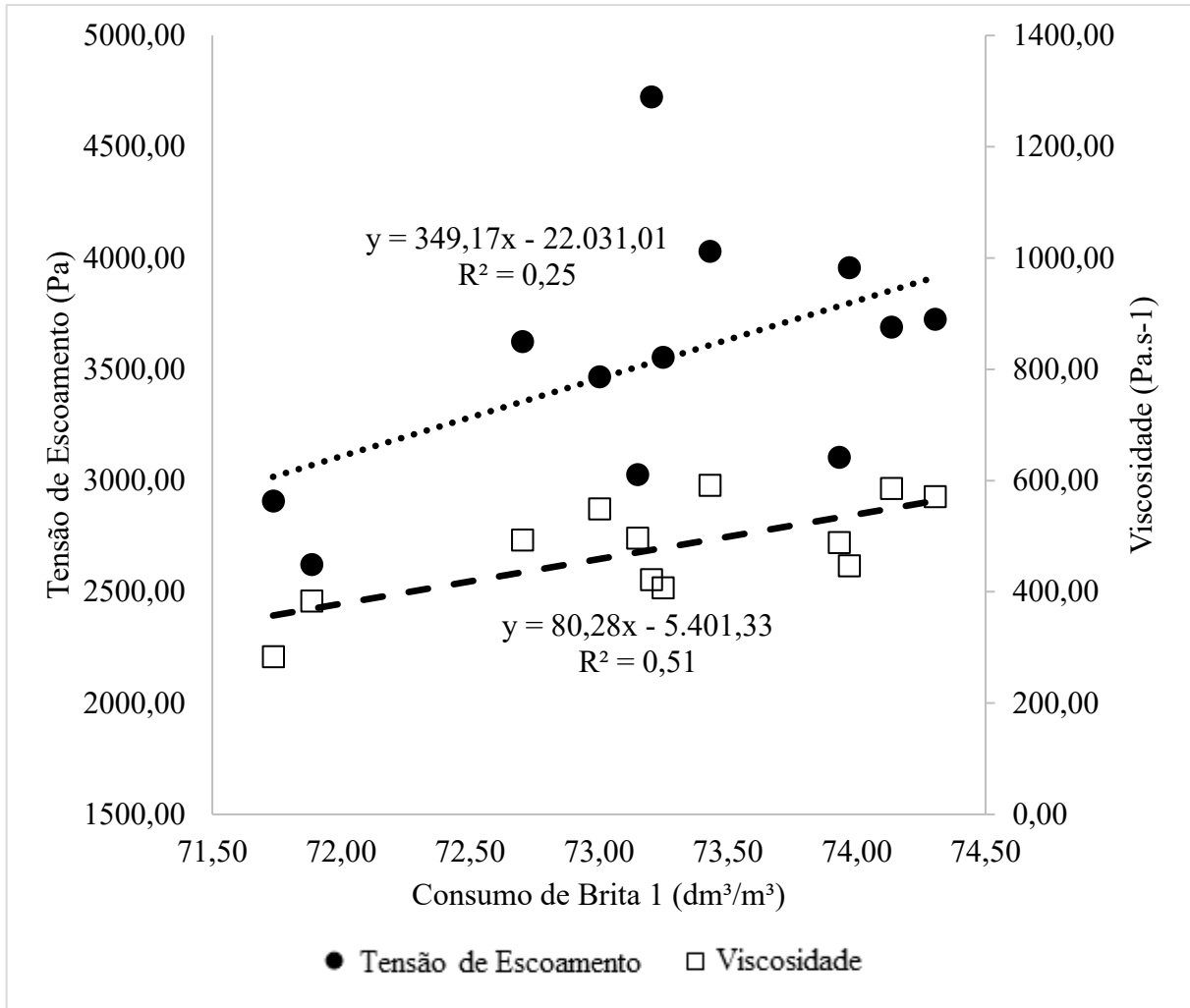
Assim como na análise global, apresentando na Figura 62, a variação do consumo volumétrico de brita 0 foi mais significativo no parâmetro de tensão de escoamento do que na viscosidade.

Apesar de ter sido significativa na análise de variação de carregamento absoluta, a significância da relação da variação volumétrica da brita 0 no parâmetro de tensão de escoamento foi intensificada.

O parâmetro de viscosidade que anteriormente não havia sido significativo na análise de variação absoluta de carregamento da brita 0, apresentou uma elevada significância ao ser considerada a variação volumétrica deste constituinte.

A influência do outro agregado gráudo da composição dos concretos em estudo, a brita 1, é avaliada na Figura 74 a seguir.

Figura 74 – Volume de Brita 1 x Propriedades Reológicas



Assim como foi verificado na análise da variação global de brita 1, a variação volumétrica do material foi mais significativa no parâmetro de viscosidade do que na tensão de escoamento do material.

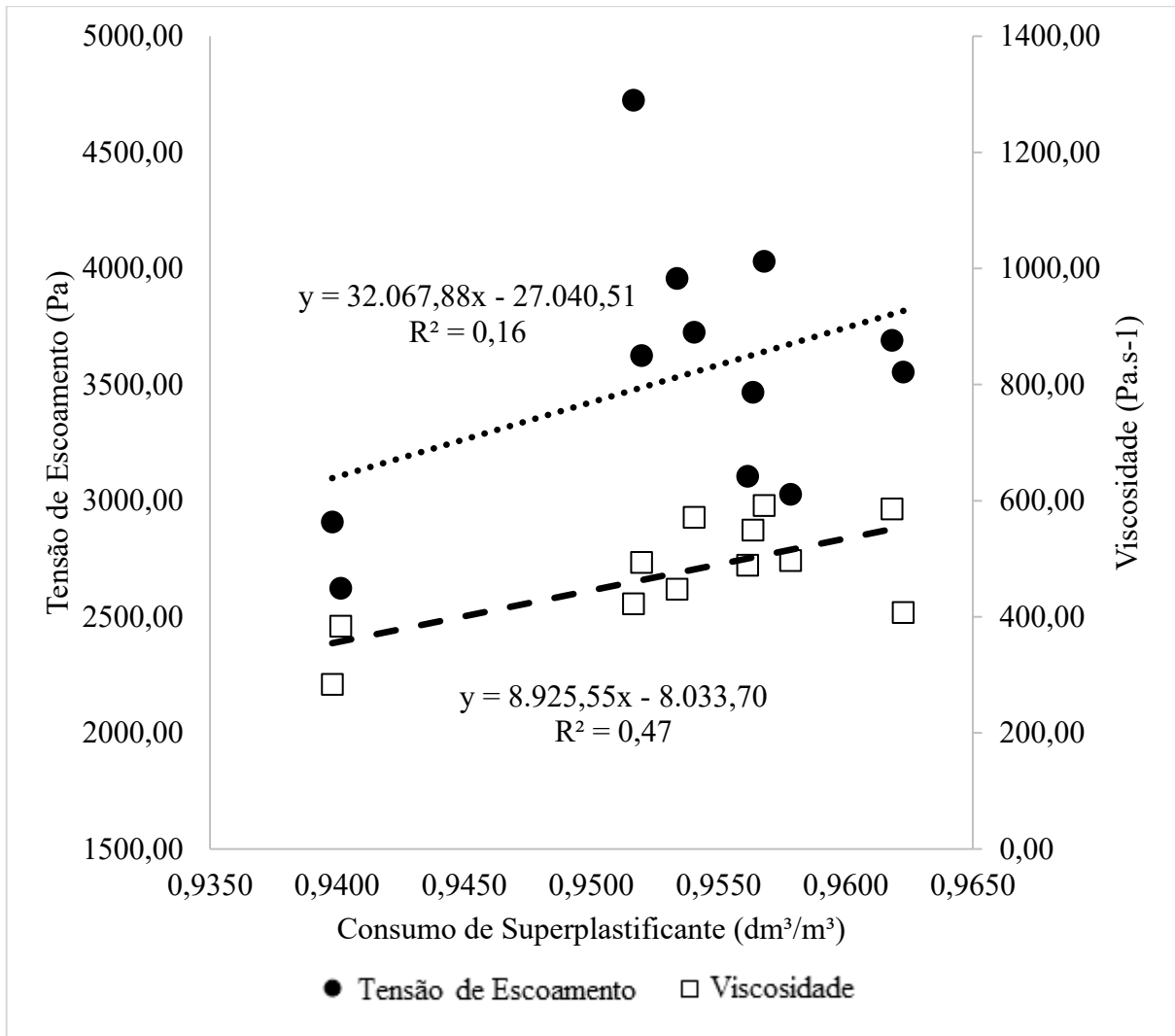
A influência da variação de carregamento da brita 1 na tensão de escoamento que anteriormente não havia sido muito significativa, foi intensificada.

Já o parâmetro de viscosidade que havia tido um razoável valor de significância, foi também intensificado.

Tem-se assim que todos os agregados ao serem analisados na ótica volumétrica, exercem influência nos parâmetros reológicos dos concretos do estudo, mesmo sendo pequenos os intervalos de variação.

Assim como realizado nas análises globais, a variação volumétrica dos aditivos nas propriedades reológicas também será avaliada, a Figura 75 inicia tal análise a partir da variação volumétrica do aditivo superplastificante.

Figura 75 – Volume de Superplastificante x Propriedades Reológicas



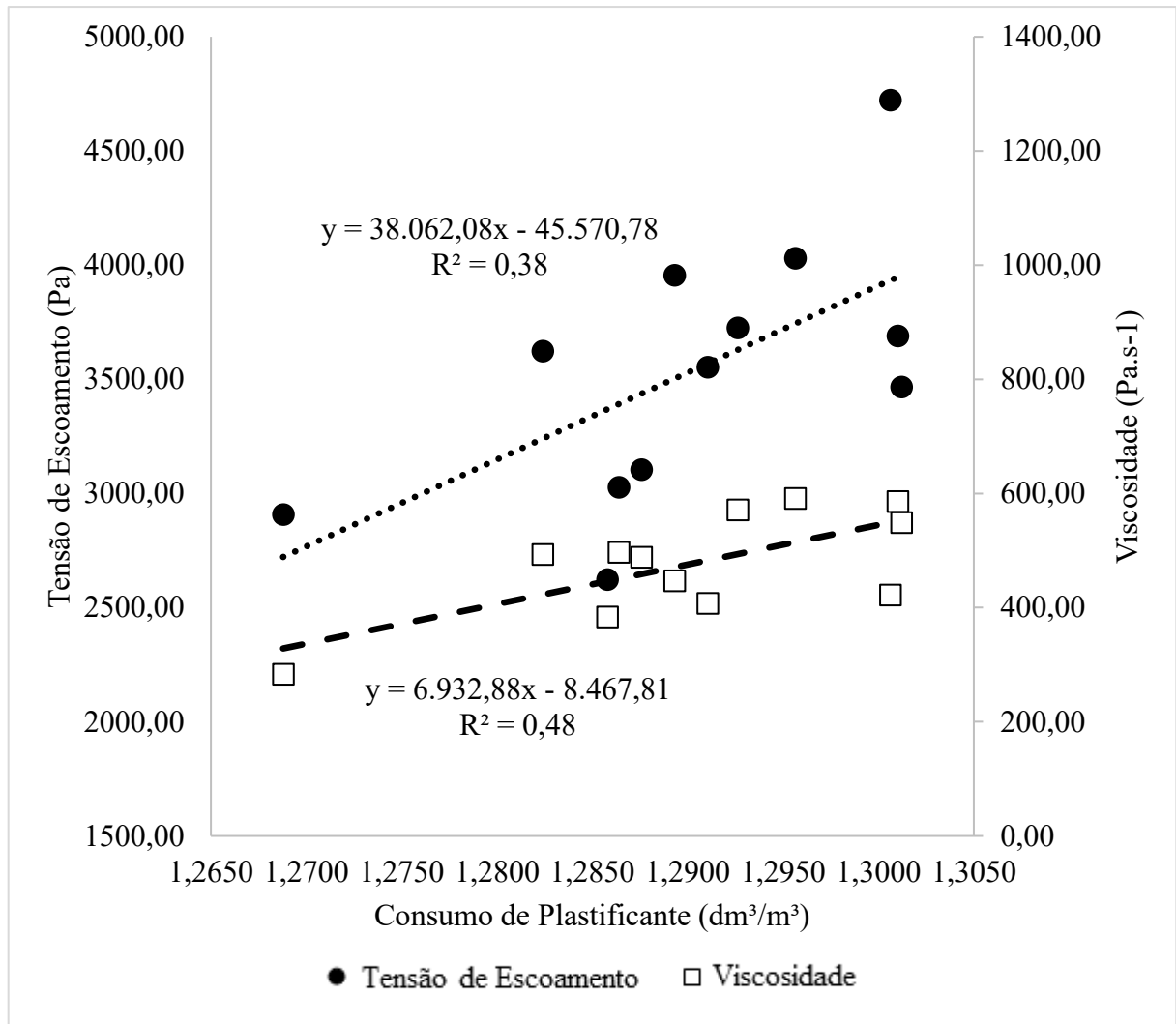
Com base na relação exposta, é possível verificar que diferentemente do observado na análise global, a variação volumétrica do consumo de aditivo superplastificante exerce influência tanto na propriedade de tensão de escoamento quanto na propriedade reológica de viscosidade.

A significância da variação volumétrica do consumo de aditivo superplastificante na propriedade de tensão de escoamento foi intensificada ao anteriormente observado na análise global.

Apesar de não ter sido significativa na análise de variação global, a variação volumétrica do aditivo superplastificante faz-se significativa no parâmetro de viscosidade.

Assim como destacado para o aditivo superplastificante, a Figura 76 explora a influência volumétrica do aditivo plastificante nas propriedades reológicas dos concretos.

Figura 76 – Volume de Plastificante x Propriedades Reológicas



Assim como a análise voltada para o aditivo superplastificante, a alteração volumétrica do aditivo plastificante também exerce influência nas propriedades reológicas dos concretos.

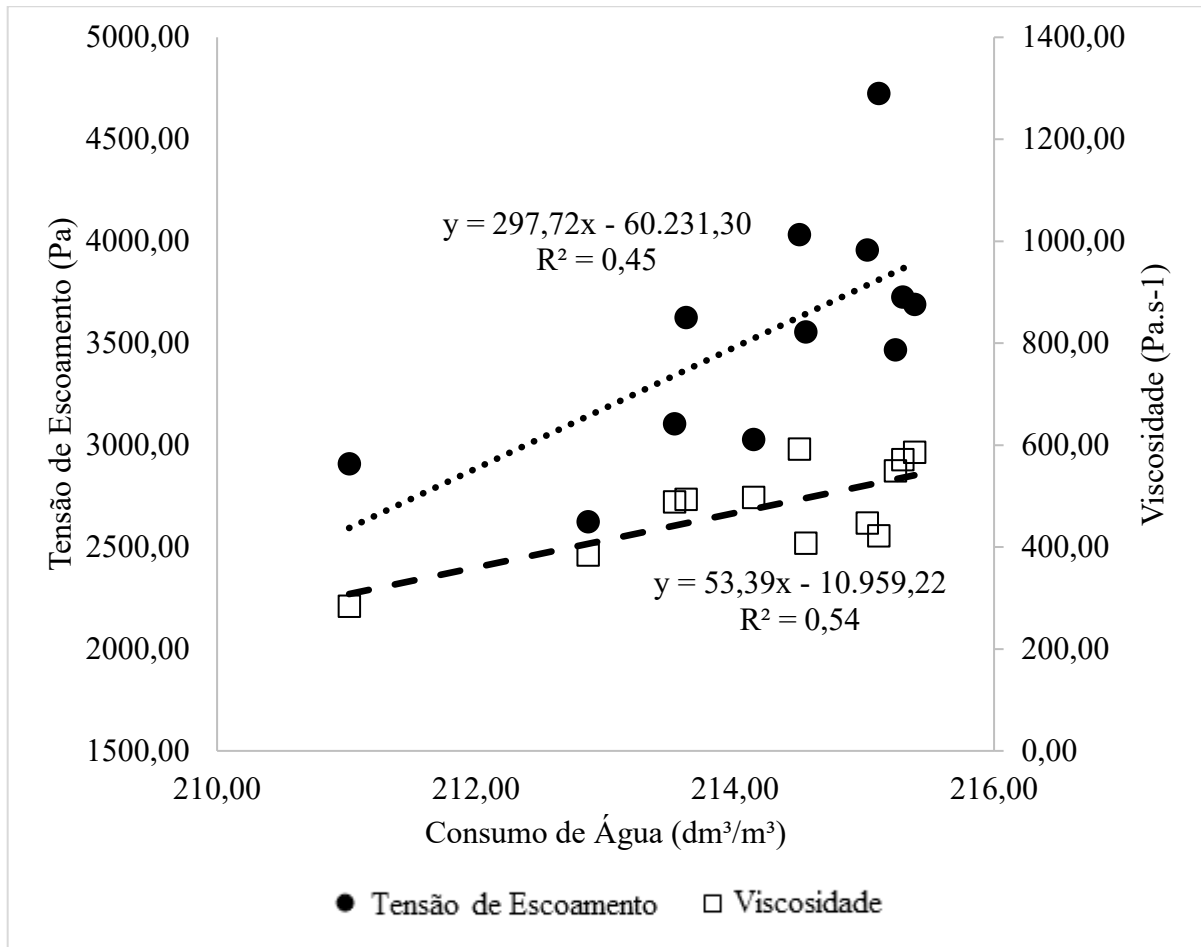
Diferentemente do observado na análise global da variação deste constituinte, a variação volumétrica do aditivo plastificante exerce significativa influência nos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade.

Dentre os dois parâmetros reológicos a variação volumétrica do aditivo plastificante exerce maior influência no parâmetro de viscosidade.

Em comparação ao aditivo superplastificante, o aditivo plastificante exerce maior influência tanto no parâmetro de viscosidade quanto no parâmetro de tensão de escoamento.

Finaliza a análise da variação volumétrica dos aditivos no concreto, na Figura 77, se é explorado a variação volumétrica do último constituinte a ser analisado nas propriedades reológicas dos concretos, a água.

Figura 77 – Volume de Água x Propriedades Reológicas



Assim como todos os outros materiais do estudo, a variação volumétrica da água no concreto também exerce influência nas propriedades reológicas dos concretos.

Anteriormente na análise global foi indicado que o consumo de água era mais influente na propriedade de viscosidade do que na tensão de escoamento, essa mesma relação foi encontrada na presente análise.

O nível de significância anteriormente encontrado na análise global de variação de carregamento também foi intensificado na presente análise.

A relação observada de que o volume de água é diretamente proporcional às propriedades de tensão de escoamento e viscosidade encontrada é dissonante ao senso comum e a lógica de que ao adicionarmos um maior volume de água em um concreto, as partículas inseridas no mesmo acabam por distanciar-se uma das outras.

A relação encontrada pode ter sido oriunda de uma não uniformidade das operações de carga e descarga dos caminhões influenciada pela necessidade da concretagem e consequente perda de eficiência de aditivos, e início de hidratação do cimento.

Sendo o último constituinte analisado, ressalta-se aqui que todos os constituintes do concreto são influentes nos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade, assim as tabelas a seguir destacam a análise da significância das relações das variações volumétricas de carregamento com as propriedades reológicas dos concretos.

A Tabela 26 a seguir destaca a análise de significância das variações volumétricas de carregamento com a propriedade reológica de tensão de escoamento.

Tabela 26 – Análise de Significância Variação Volumétrica x Tensão de Escoamento

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Cimento (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	83,80%	1,51	540,11 (Pa)
Sílica Ativa (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	96,69%	2,47	471,50 (Pa)
Areia Artificial (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	93,31%	2,06	501,56 (Pa)
Areia Natural (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	96,51%	2,44	473,65 (Pa)
Brita 0 (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	99,13%	3,25	417,06 (Pa)
Brita 1 (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	90,47%	1,84	516,90 (Pa)
Água (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	98,26%	2,85	444,64 (Pa)
Super Plastificante (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	80,51%	1,39	547,65 (Pa)
Plastificante (Dm ³)	Tensão de Escoamento	10	96,78%	2,49	470,18 (Pa)

Conforme anteriormente destacado, todas as variações volumétricas de carregamento de cada material geraram impactos na propriedade de tensão de escoamento.

O nível de impacto na propriedade de tensão de escoamento teve variação dependo do material em análise.

Toda a relação entre a variação volumétrica de cada material e a tensão de escoamento foi encontrada de forma crescente, variando apenas o grau de significância.

Por tratar-se de uma análise volumétrica interdependente, onde sempre que um material tem seu volume incrementado, outro tem seu volume reduzido, tensões de escoamento

são aumentadas ou diminuídas em função do material com volume aumento e do material diminuído.

Os materiais que mais geraram impacto, ou seja, tem uma maior significância no parâmetro de tensão de escoamento foram a brita 0, a água, o aditivo plastificante e a sílica ativa.

A variação volumétrica dos materiais cimento, e aditivo superplastificante, foram os materiais que geraram uma menor influência na propriedade reológica de tensão de escoamento.

Assim, na presente composição analisada, na concepção de um material com menor tensão de escoamento para potencializar o bombeamento, o volume de brita 0 poderia ser controlado e substituído por um aumento volumétrico de cimento e aditivo superplastificante.

Assim como realizado para a propriedade de tensão de escoamento a Tabela 27 a seguir destaca a análise de significância das variações volumétricas de carregamento com a viscosidade dos concretos.

Tabela 27 – Análise de Significância Variação Volumétrica x Viscosidade

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Cimento (Dm ³)	Viscosidade	10	92,21%	1,96	82,72 (Pa.s ⁻¹)
Sílica Ativa (Dm ³)	Viscosidade	10	98,01%	2,77	73,28 (Pa.s ⁻¹)
Areia Artificial (Dm ³)	Viscosidade	10	70,90%	1,11	91,83 (Pa.s ⁻¹)
Areia Natural (Dm ³)	Viscosidade	10	99,87%	4,41	56,77 (Pa.s ⁻¹)
Brita 0 (Dm ³)	Viscosidade	10	98,84%	3,08	69,71 (Pa.s ⁻¹)
Brita 1 (Dm ³)	Viscosidade	10	99,04%	3,20	68,49 (Pa.s ⁻¹)
Água (Dm ³)	Viscosidade	10	99,37%	3,45	65,82 (Pa.s ⁻¹)
Super Plastificante (Dm ³)	Viscosidade	10	98,66%	3,00	70,69 (Pa.s ⁻¹)
Plastificante (Dm ³)	Viscosidade	10	98,73%	3,03	70,32 (Pa.s ⁻¹)

Conforme anteriormente destacado na análise do impacto das variações volumétricas de carregamento de cada material na propriedade de tensão de escoamento, o mesmo fenômeno foi encontrado na análise da viscosidade, onde todos os materiais geraram impacto na viscosidade dos concretos.

O grau de impacto da variação volumétrica variou conforme a análise individual de cada material, mas novamente a interdependência volumétrica dos materiais se faz presente, e ora um material gera um impacto em uma magnitude e ora noutra.

Os materiais que mais geraram impacto, ou seja, sua variação gera uma maior significância no parâmetro de viscosidade foram a areia natural, a água, e a brita 1.

A variação volumétrica dos aglomerantes e da areia natural, foram os materiais que geraram uma menor influência na propriedade reológica de viscosidade.

Assim, na concepção de um material com menor viscosidade na busca da potencialização do bombeamento, poderia ter sido controlado o volume de areia natural e brita 1 sendo este substituído por um aumento volumétrico de aglomerantes e volume de areia artificial.

Diante do exposto, o controle volumétrico dos materiais constituintes pode ser utilizado para minimizar riscos de variação reológica dos concretos com o enfoque na garantia da manutenção de propriedades reológicas favoráveis a uma condição de bombeamento.

4.2.3 Características Volumétricas Concreto

Conforme discutido no item anterior, a volumetria dos materiais constituintes de um concreto e a variação desta tem influência nas propriedades dos concretos.

O presente item amplia a discussão dos resultados obtidos na presente dissertação a partir da análise da influência de características volumétricas dos concretos.

Na Tabela 28 a seguir são apresentadas tais características a serem exploradas no presente item de discussão do trabalho.

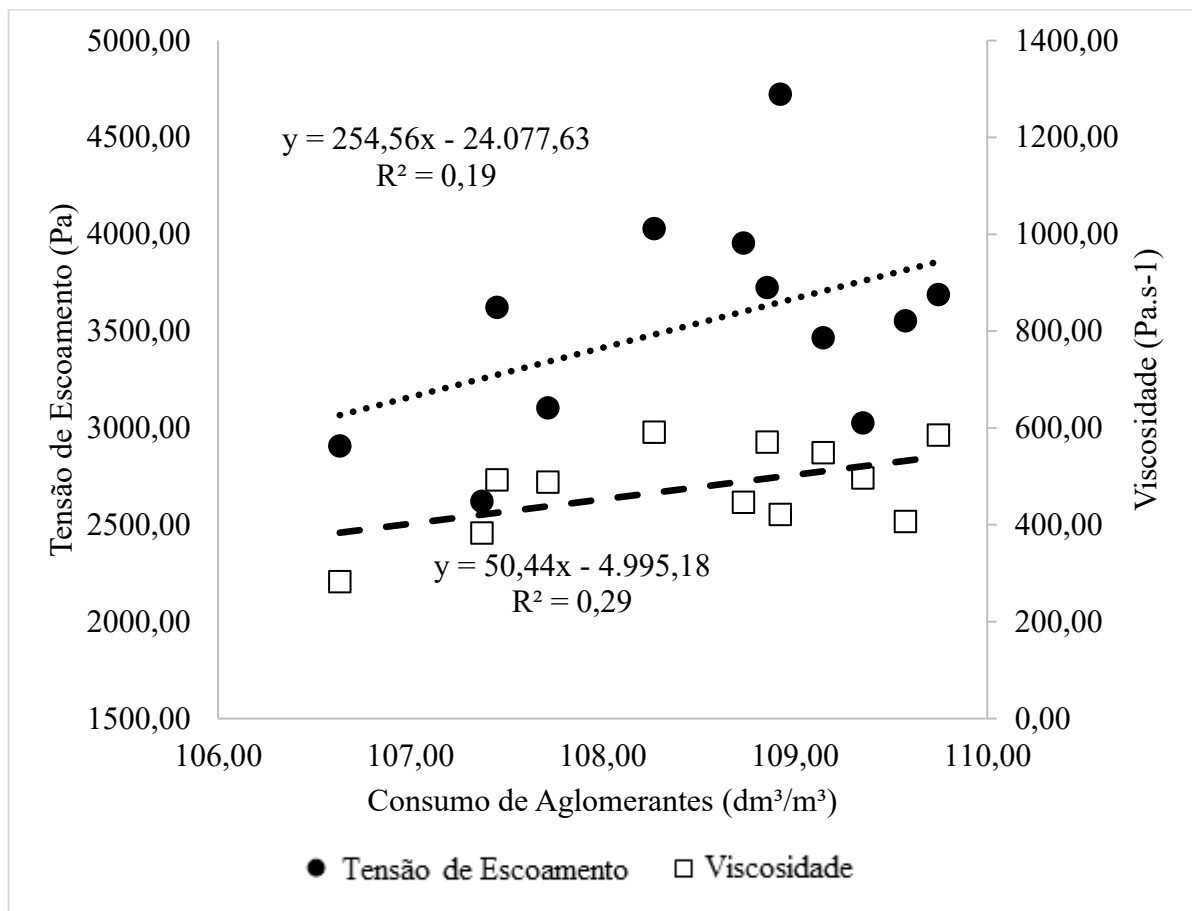
Tabela 28 – Características Volumétricas dos Concretos

Identificação Concreto	Vol. Aglomerantes (dm ³ /m ³)	Vol. Agregados Miúdos (dm ³ /m ³)	Vol. Agregados Graúdos (dm ³ /m ³)	Teor de Argamassa Volumétrico (%)	Prop. Areia Natural (%)	Prop. Brita 1 (%)
I1	108,92	304,10	366,81	52,96	64,76	19,96
I2	109,75	304,27	367,08	53,00	64,75	20,20
I3	108,73	304,78	365,66	53,07	64,51	20,23
I4	106,63	300,13	358,09	53,18	64,44	20,03
I5	109,57	303,90	365,05	53,11	64,57	20,07
I6	109,15	304,96	366,41	53,06	64,70	19,92
I7	108,27	304,33	365,36	53,04	64,59	20,10
I8	107,71	302,15	364,11	52,96	64,83	20,30
I9	107,45	304,40	362,92	53,16	64,68	20,03
I10	109,35	302,69	363,76	53,11	64,87	20,11
I11	107,37	302,09	361,20	53,13	64,57	19,90
I12	108,86	306,01	367,12	53,05	64,71	20,24

Assim como destacado nos itens anteriores, destaca-se que a variação contida no presente trabalho para os itens em análise é pequena, entretanto mesmo em um pequeno intervalo de variação apresenta indicativos de que gera influência nas propriedades dos concretos produzidos.

Na Figura 78 se faz iniciada a análise da influência do consumo de aglomerantes nas propriedades reológicas dos concretos do estudo.

Figura 78 – Consumo de Aglomerantes x Propriedades Reológicas



Diante da relação efetuada verifica-se que o consumo de aglomerantes em um dado concreto exerce influência nas propriedades reológicas dos concretos.

Mesmo com o baixo intervalo de variação observado, o consumo de aglomerantes apresenta significância na relação com a tensão de escoamento dos concretos.

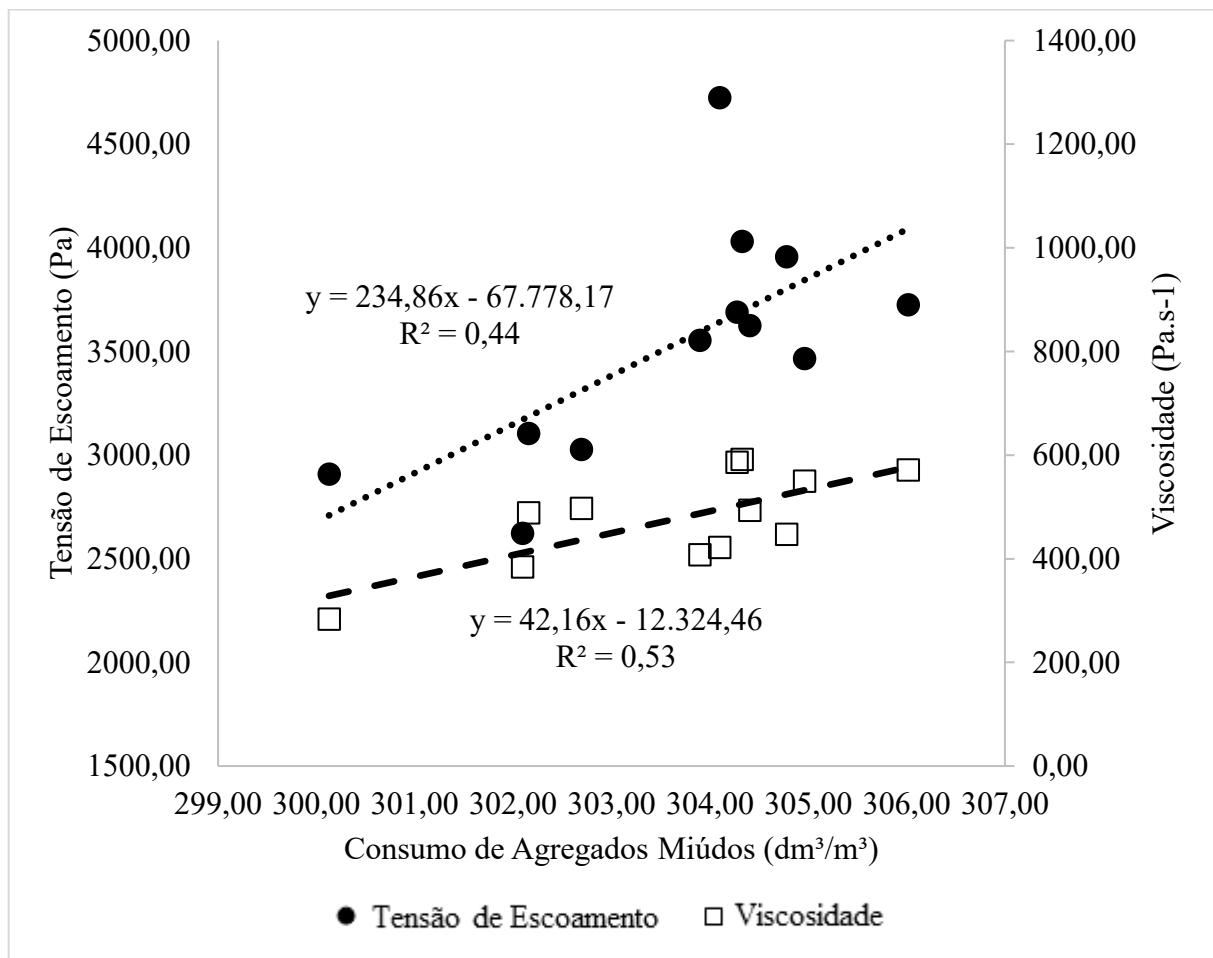
Assim como exerce influência na tensão de escoamento, a significância da relação do consumo volumétrico de aglomerantes também é elevado ao ser relacionado com a viscosidade dos concretos.

De forma direta, quanto maior foi o consumo de aglomerantes na constituição dos concretos, mais elevados foram os valores de tensão de escoamento e viscosidade destes concretos.

Em relação à magnitude da influência o consumo de aglomerantes foi mais significativa na relação encontrada com a viscosidade dos concretos.

Assim como explorado para o consumo de aglomerantes, a Figura 79 analisa a influência do consumo geral de agregados miúdos nas propriedades reológicas dos concretos.

Figura 79 – Consumo de Agregados Miúdos x Propriedades Reológicas



Assim como observado na análise individual, o consumo de agregados miúdos ao ser analisado de maneira conjunta, exerce elevada influência nas propriedades reológicas dos concretos do estudo.

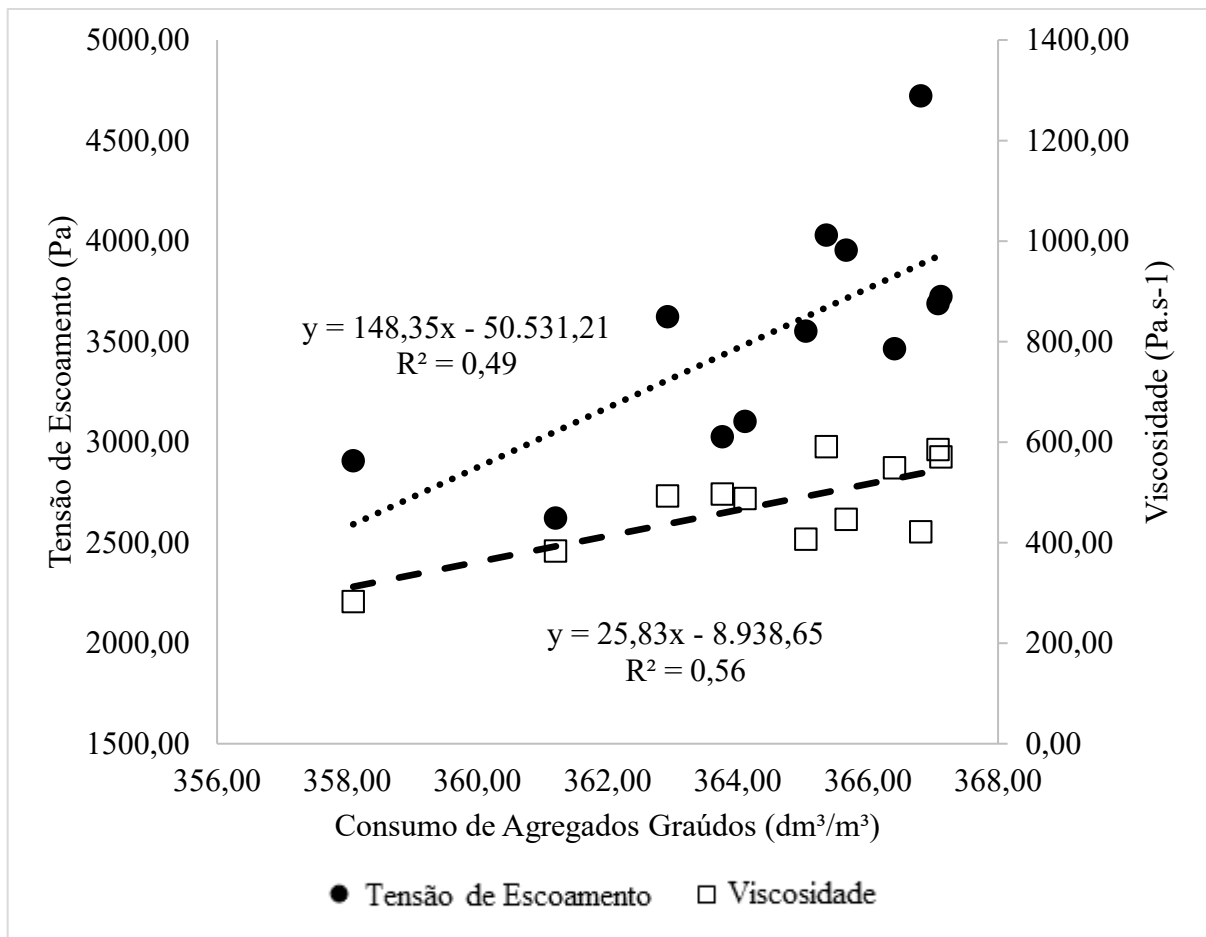
A tensão de escoamento ao ser relacionada de forma conjunta aos agregados miúdos do estudo – areia de britagem e areia natural – acaba por ser intensificada em relação ao anteriormente observado entre nas duas areias de forma individual.

Já na análise da viscosidade, a areia natural ao ser analisada de maneira individual apresenta maior valor de significância, ainda que a presente relação também apresente um elevado valor de significância.

De maneira geral e diretamente proporcional, quanto maior foi o consumo volumétrico de agregados miúdos, maior foi o valor das propriedades reológicas de tensão de escoamento e viscosidade, sendo mais significativa a relação encontrada com a propriedade de viscosidade.

O consumo de agregados graúdos é explorado na Figura 80 a seguir, sendo relacionado às propriedades reológicas dos concretos no presente estudo.

Figura 80 – Consumo de Agregados Graúdos x Propriedades Reológicas



Novamente, o consumo volumétrico dos agregados graúdos apresenta comportamento diretamente proporcional às propriedades reológicas dos concretos no estudo.

De forma geral concreto de maior consumo volumétrico de agregados graúdos apresentaram maior valor de tensão de escoamento e maior valor de viscosidade.

Em comparação aos materiais constituintes analisados na ótica individual, a tensão de escoamento apresentou leve redução na análise de significância ao ser comparada com o valor

encontrado para o consumo volumétrico de brita 0 e aumento em relação ao consumo de brita 1.

Já em comparação com a viscosidade, o resultado da análise de significância apresentou incremento nos resultados encontrados.

Como encontrado na análise individual do consumo volumétrico de materiais constituintes, seja o consumo estudado o consumo volumétrico de aglomerantes, de agregados miúdos ou graúdos, todos os agrupamentos realizados apresentaram significância na alteração dos valores das propriedades reológicas dos concretos do estudo.

A Tabela 29 explora a significância dos agrupamentos de materiais constituintes realizado em relação às propriedades reológicas estudadas.

Tabela 29 – Análise de Significância Consumo Agrupado x Propriedades Reológicas

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Consumo de Aglomerantes (dm ³ /m ³)	Tensão de Escoamento	10	84,87%	1,55	536,86 (Pa)
Consumo de Agregados Miúdos (dm ³ /m ³)	Tensão de Escoamento	10	98,04%	2,78	449,48 (Pa)
Consumo de Agregados Graúdos (dm ³ /m ³)	Tensão de Escoamento	10	98,90%	3,11	426,22 (Pa)
Consumo de Aglomerantes (dm ³ /m ³)	Viscosidade	10	92,81%	2,01	82,15 (Pa.s ⁻¹)
Consumo de Agregados Miúdos (dm ³ /m ³)	Viscosidade	10	99,27%	3,35	66,8 (Pa.s ⁻¹)
Consumo de Agregados Graúdos (dm ³ /m ³)	Viscosidade	10	99,51%	3,59	64,34 (Pa.s ⁻¹)

Conforme apontado anteriormente, todos os agrupamentos volumétricos apresentaram forte significância em suas relações com as propriedades reológicas dos concretos.

De maneira geral o grau de significância das relações foi mais intenso na relação das variações volumétricas destes agrupamentos com a propriedade de viscosidade.

Em ordem de significância o grupo de materiais que mais impactou a propriedade de tensão de escoamento foi o consumo de agregados graúdos.

Este mesmo agrupamento também apresentou maior impacto na viscosidade dos concretos.

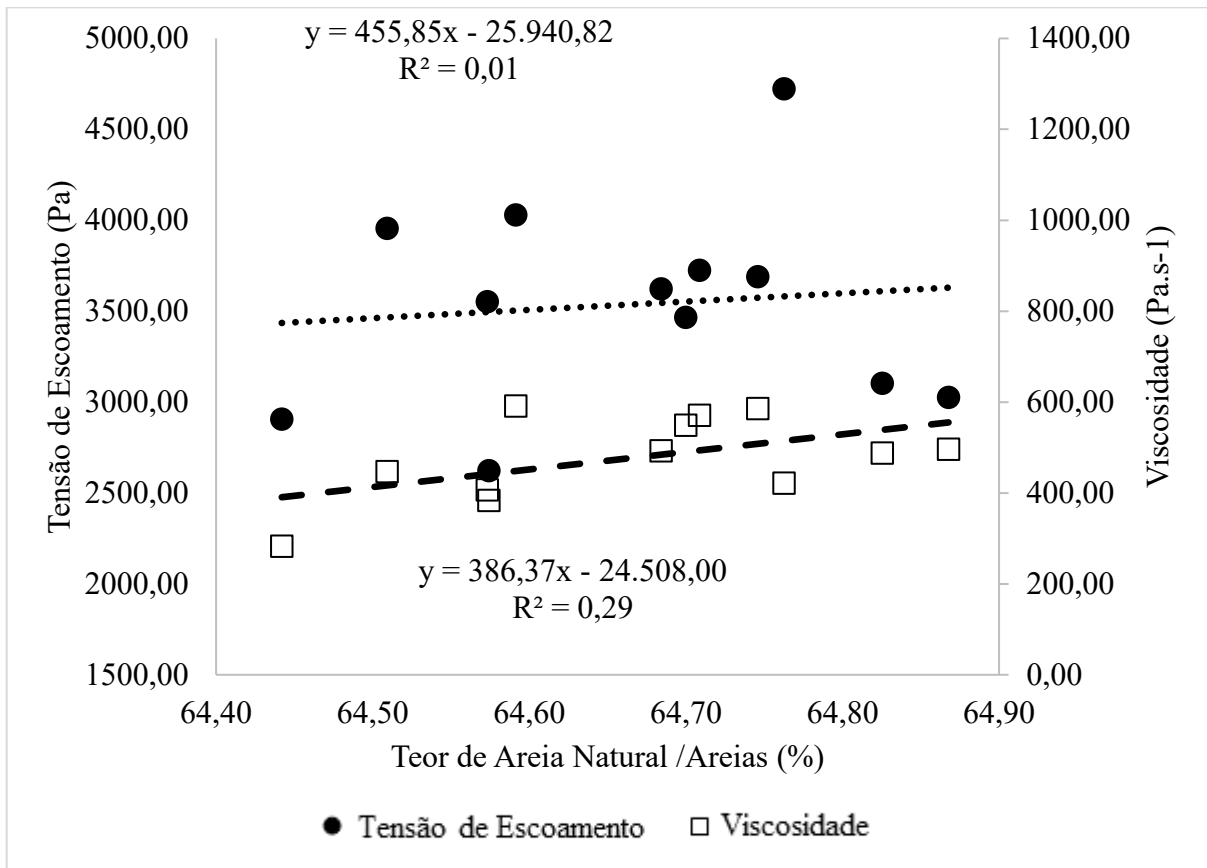
Com base nas relações de significância apresentada, uma forma de reduzir o nível de tensão de escoamento e viscosidade destes concretos seria a redução do consumo de agregados

gráudos e substituí-los por aglomerantes, ou agregados miúdos, sendo o primeiro citado menos influente no incremento destas propriedades.

Diante da análise realizada, pode se determinar que o cuidado a ser tomado com variações de carregamento deve ser tão rigoroso quanto for necessário a garantia de controle das propriedades reológicas dos concretos em função da demanda do sistema de bombeamento ao concreto.

Finalizada a análise com o enfoque em agrupamentos individuais de aglomerantes e agregados, na Figura 81 são analisadas as relações da proporção volumétrica das areias encontradas nas composições dos concretos do estudo com suas propriedades reológicas resultantes, sendo adotada como areia referência o teor de areia natural.

Figura 81 – Percentual Areia Natural x Propriedades Reológicas



Diferentemente das análises anteriormente analisadas, as relações entre o teor de areia natural e as propriedades reológicas dos concretos não se mostraram significantes para as duas propriedades reológicas em estudo.

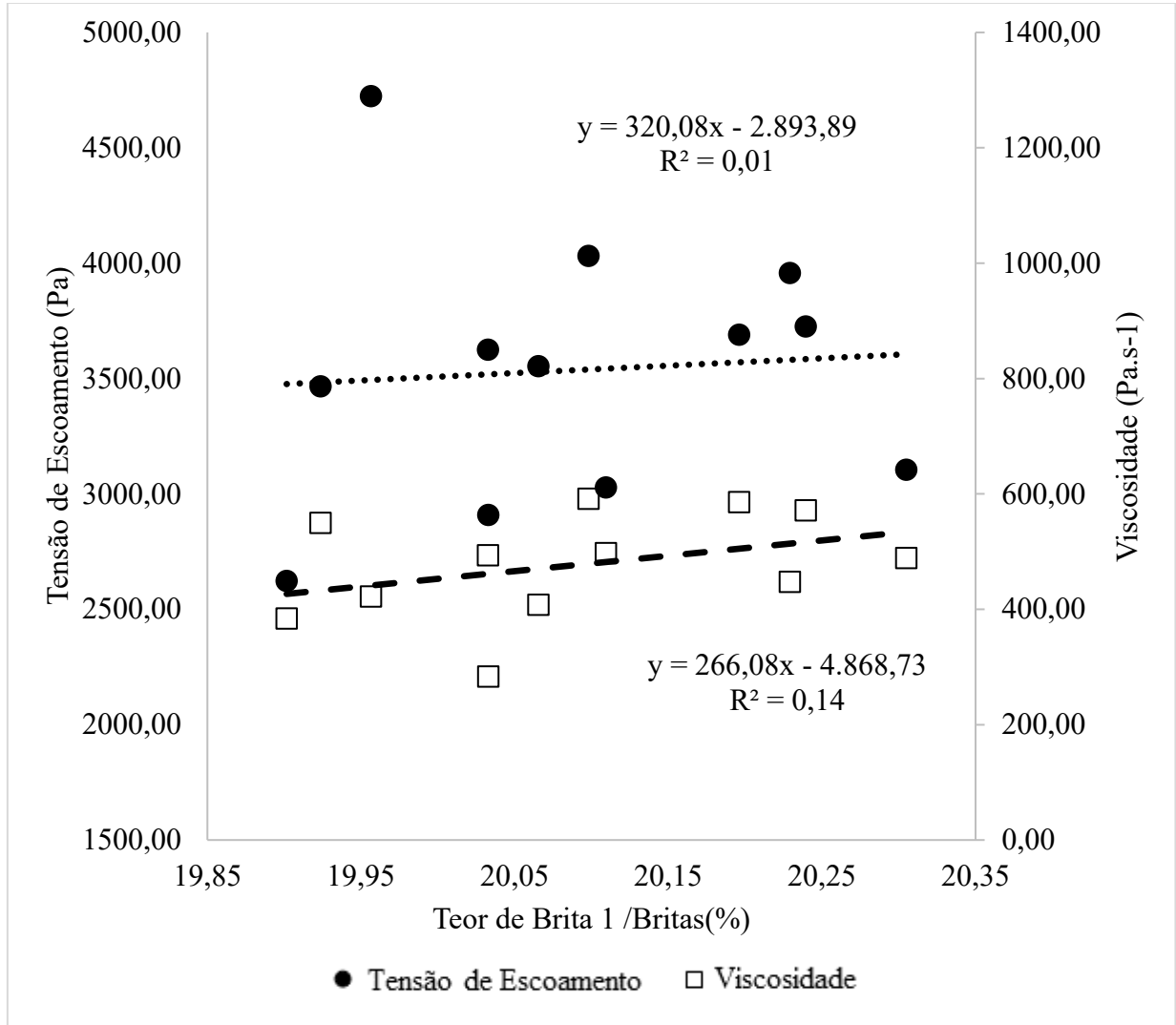
No que tange a propriedade de tensão de escoamento, não fora detectado uma relação significativa entre o teor de areia natural e esta propriedade para o nível de variação encontrado.

Para a propriedade de viscosidade, o teor volumétrico de areia natural apresentou elevada significância na relação executada.

Em concretos com maior teor de areia natural foram encontrados de maneira geral maiores valores de viscosidade e não foram encontradas tendencias significantes de comportamento para a tensão de escoamento.

Assim como realizado para a análise da influência da proporção volumétrica das areias encontradas nos concretos com as propriedades reológicas resultantes, na Figura 82 são exploradas as proporções dos teores de brita 1 encontrado sendo este relacionado às propriedades reológicas dos concretos produzidos.

Figura 82 – Percentual Brita 0 x Propriedades Reológicas



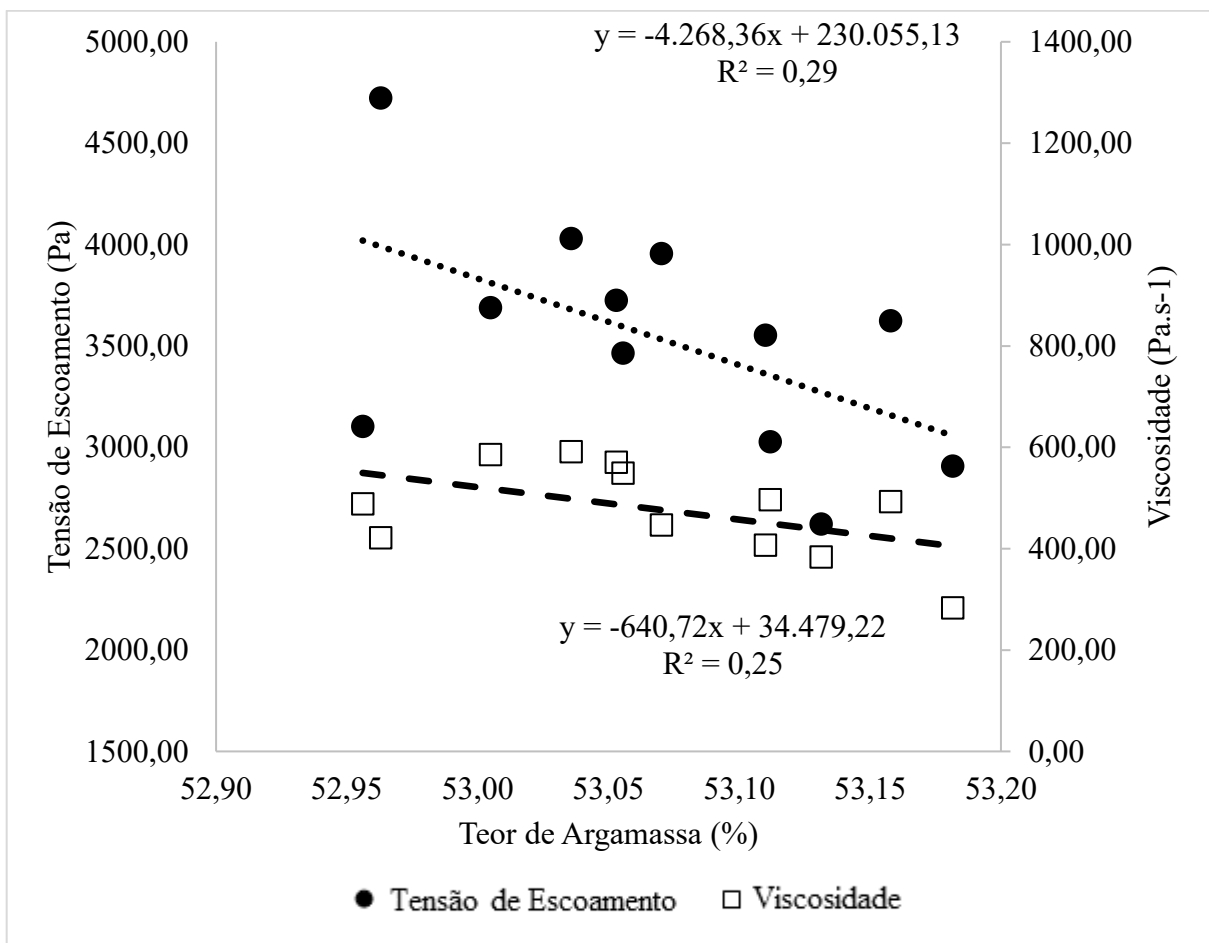
Assim como verificado na análise da proporção volumétrica das areias, o teor de brita 1 resultante da variação de carregamento encontrado nos concretos também não apresentaram forte significância para as duas propriedades reológicas.

Como na análise do teor de areia natural com o enfoque na tensão de escoamento, o teor volumétrico de brita 1 também não apresentou significância na relação com esta propriedade reológica.

Na análise da viscosidade, o teor volumétrico de brita 1 apresentou relativa significância, não tão alto quanto para a areia natural, mas com relativa significância.

Finalizado e identificado a influência das proporções dentro de uma mesma composição de agregados graúdos e miúdos nas propriedades reológicas dos concretos do estudo, na Figura 83 são identificadas e exploradas as relações do teor de argamassa dos concretos do presente estudo com as propriedades reológicas dos concretos em estudo.

Figura 83 – Teor de Argamassa x Propriedades Reológicas



Diferentemente do teor de brita 1 e do teor de areia natural, o teor de argamassa exerce influência tanto na propriedade de viscosidade, quanto na tensão de escoamento dos concretos no estudo.

Na tensão de escoamento o teor de argamassa é inversamente proporcional para o intervalo analisado, onde concretos com maior teor de argamassa tenderam a apresentar de maneira geral um menor valor de tensão de escoamento.

Assim como para a propriedade de tensão de escoamento, o teor de argamassa também apresentou comportamento inversamente proporcional no intervalo analisado, onde concretos com maior teor de argamassa apresentaram menor valor para a propriedade de viscosidade.

A partir dessa premissa, concretos com maior teor de argamassa dentro do intervalo analisado, tendem a apresentar um menor valor de pressão de bombeamento em um dado conjunto de bombeamento.

A Tabela 30 a seguir apresenta as análises de significância das características volumétricas apresentadas relacionadas às propriedades reológicas dos concretos.

Tabela 30 – Análise de Significância Características Volumétrica x Propriedades Reológicas

Relação		Graus de Liberdade	Significância	t	Erro
Areia Natural / Areias (%)	Tensão de Escoamento	10	24,98%	0,33	594,99 (Pa)
Brita 1 / Britas (%)	Tensão de Escoamento	10	17,91%	0,23	596,56 (Pa)
Teor de Argamassa (%)	Tensão de Escoamento	10	93,12%	-2,04	502,77 (Pa)
Areia Natural / Areias (%)	Viscosidade	10	92,76%	2,01	82,20 (Pa.s ⁻¹)
Brita 1 / Britas (%)	Viscosidade	10	76,94%	1,28	90,29 (Pa.s ⁻¹)
Teor de Argamassa (%)	Viscosidade	10	90,18%	-1,82	84,35 (Pa.s ⁻¹)

Conforme destacado, o único parâmetro analisado que apresentou significância na relação com a propriedade de tensão de escoamento foi o teor de argamassa sendo inversamente proporcional à esta propriedade.

Em relação à análise de viscosidade, tanto o teor de areia natural, quanto o teor de brita 1 e o teor de argamassa apresentaram significância com este parâmetro.

Em relação aos cuidados a serem tomados em uma central de concretos, a característica que mais deve ser analisada no que tange a bombeabilidade de seus concretos produzidos é o teor de argamassa dos concretos, visto que a propriedade de tensão de escoamento é a principal propriedade em relação à demanda de bombeamento e este parâmetro foi o parâmetro volumétrico mais influente na propriedade em questão.

Em configurações mais complexas, onde o concreto esteja sendo bombeado próximo a um limite do sistema em que esteja inserido, tanto o teor de argamassa quanto os demais fatores apresentados devem ser controlados para que se tenha controle da viscosidade do material, reduzindo o impacto do incremento desta propriedade na demanda de bombeamento.

5 CONCLUSÕES

Em decorrência do desenvolvimento da dissertação no presente tópico serão abordadas as considerações finais dessa pesquisa apontando os principais fatores de risco encontrados para o impacto no desempenho de bombeamento bem como sugestões de trabalhos futuros para o aprofundamento do tema.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do desenvolvimento da presente dissertação foi possível destacar os pontos de influência tangíveis ao desempenho de bombeamento, bem como fatores de risco:

- Em relação as análises individuais das campanhas experimentais têm-se que, as propriedades reológicas do concreto têm influência na demanda de pressão do sistema de bombeamento;
- Ao analisar de forma global todas as campanhas experimentais verifica-se que a rede de bombeamento tem influência no nível de pressão exigido ao sistema;
- A rede de bombeamento a qual o concreto é submetido ao bombeamento aumenta, ou diminuí, a demanda de pressão em função de sua configuração, quão maior o número de conexões ou maior o seu comprimento, maior o nível de pressão exigido;
- Reduzir a diferença das redes de bombeamento das campanhas experimentais através da análise normalizada permite determinar que tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade têm influência no nível de pressão exigido ao sistema de bombeamento;
- O nível de significância das relações de tensão de escoamento e pressão de bombeamento tendem a 100,00%;
- O parâmetro de viscosidade também gera influência na pressão de bombeamento, com nível de significância na ordem de 99,66%;
- O principal parâmetro de influência no desempenho de bombeamento relacionado ao concreto é o parâmetro reológico de tensão de escoamento;
- Ensaio tecnológicos têm relação com propriedades reológicas dos concretos;

- Os ensaios tecnológicos utilizados na presente dissertação apresentaram maior significância na relação com a propriedade de tensão de escoamento do que com o parâmetro de viscosidade;
- Concretos de maior índice de abatimento e medida de espalhamento tenderam a apresentar um menor valor de tensão de escoamento;
- Concretos de maiores valores de índice de abatimento e medida de espalhamento tenderam a demandar um menor nível de pressão de bombeamento;
- A comum prática de indicação por parte de concreteiras de concretos com maior índice de abatimento e espalhamento em redes mais complexas de bombeamento mostra-se relativamente assertiva quando não se faz possível a determinação das propriedades reológicas dos concretos;
- O índice de abatimento e a medida de espalhamento podem ser utilizados como diretrizes gerais para a concepção de concretos bombeáveis em determinadas condições de bombeamento, mas não podem ser utilizados como valores absolutos;
- Ao dividir os concretos da presente dissertação em níveis de tensão de escoamento é possível determinar que a significância do parâmetro de viscosidade é incrementada;
- Os agrupamentos realizados demonstram que não somente a tensão de escoamento é importante na concepção de concretos bombeáveis, mas o parâmetro de viscosidade também se faz relevante na obtenção de concretos bombeáveis em situações complexas de bombeamento;
- Tem-se assim que tanto a tensão de escoamento e o parâmetro de viscosidade devem ser estudados para a concepção de concretos mais facilmente bombeáveis e que venham a demandar uma menor pressão de bombeamento ao equipamento a ser utilizado;
- Além da importância da determinação dos parâmetros de maior influência no bombeamento de concretos a presente dissertação demonstrou que variações de carregamento podem vir a gerar impactos significantes nas propriedades reológicas dos concretos e que conseqüentemente podem vir a gerar fatores impeditivos ao bombeamento em condições críticas;
- Variações de constituintes durante o carregamento geraram impactos tanto na tensão de escoamento quanto na viscosidade;

- Alguns constituintes foram mais significativos no impacto da propriedade de tensão de escoamento do que na propriedade de viscosidade. O consumo volumétrico de agregados graúdos teve maior impacto na tensão de escoamento e viscosidade dos concretos estudados, e consumo volumétrico de aglomerantes foi o que gerou menor impacto na tensão de escoamento e viscosidade dos concretos;
- O controle volumétrico dos materiais constituintes pode ser utilizado para minimizar riscos de variação reológica dos concretos com o enfoque na garantia da manutenção de propriedades reológicas favoráveis a uma condição de bombeamento;
- A proporção da quantidade de britas e da relação das areias geraram impactos na propriedade de viscosidade dos concretos estudados;
- A variação do teor de argamassa foi o único parâmetro analisado que teve influência na propriedade de tensão de escoamento sendo inversamente proporcional à esta propriedade;
- Do estudo de variações de carregamento tem-se que o cuidado a ser tomado com variações de carregamento deve ser tão rigoroso quanto for necessário a garantia do controle das propriedades reológicas dos concretos em função da demanda do sistema de bombeamento ao concreto;
- Em situações em que o controle de carregamento não seja suficiente, podem ser realizadas determinações de propriedades reológicas in loco como maneira de minimizar riscos de prejudicar o bombeamento de concreto.

Como contribuição da presente dissertação permite-se determinar premissas para minimizar riscos em situações desafiadoras de bombeamento. O concreto a ser bombeado em tal configuração de bombeamento deve ser concebido com a intenção de controlar seus parâmetros reológicos a fim de ter menores valores possível de tensão de escoamento e viscosidade para garantir máximo desempenho de bombeamento e que métodos de controle de carregamento e correções de proporcionamento volumétrico dos materiais sejam adotados para minimizar alterações em sua reologia que venham a comprometer o desempenho de bombeamento.

5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com o decorrer e a finalização da pesquisa sugestões de trabalhos futuros podem ser realizadas, uma vez que por razão de limitações econômicas e sanitárias da época em que o presente trabalho experimental foi desenvolvido não puderam ser realizadas.

O autor destaca que no decorrer da presente dissertação fatores de operação não puderam ser apuradas, sugerindo o seguinte embrião para a determinação de impactos de operação:

- 1) Escolher rede padrão de bombeamento onde não serão alterados comprimento e nem quantidade de conexões;
- 2) Realizar o controle da reologia dos concretos a serem bombeados a partir do efetivo controle para que não sejam alterados volumetricamente o concreto a ser bombeado;
- 3) Caracterizar as propriedades reológicas do concreto antes de ser submetido ao processo de bombeamento;
- 4) Variar fatores de operação para determinar sua influência no desempenho de bombeamento.

Para a determinação do impacto de constituintes em uma rede de bombeamento que não puderam ser apurados pela mesma razão anteriormente apontada a seguinte sequência de pontos pode ser adotada.

Para a determinação do impacto do diâmetro de tubulações podem ser adotados os seguintes pontos:

- 1) Escolher rede padrão de bombeamento onde não serão alterados comprimento e nem quantidade de conexões;
- 2) Realizar o controle da reologia dos concretos a serem bombeados a partir do efetivo controle para que não sejam alterados volumetricamente o concreto a ser bombeado;
- 3) Caracterizar as propriedades reológicas do concreto antes de ser submetido ao processo de bombeamento;
- 4) Determinar o desempenho de bombeamento do concreto na rede de bombeamento com o diâmetro de referência;
- 5) Alterar o diâmetro da rede de bombeamento através da troca dos constituintes da rede com diâmetro superior e inferior;

- 6) Bombeamento de concreto de mesma propriedade reológica através do controle de carregamento volumétrico rígido e determinação prévia destas propriedades anteriormente ao bombeamento;
- 7) Determinação do impacto da alteração do diâmetro de tubulação.

Para a avaliação do impacto do trecho reto de tubulações podem ser adotados os seguintes pontos:

- 1) Escolher rede padrão de bombeamento onde não serão alterados diâmetro e nem quantidade de conexões;
- 2) Realizar o controle da reologia dos concretos a serem bombeados a partir do efetivo controle para que não sejam alterados volumetricamente o concreto a ser bombeado;
- 3) Caracterizar as propriedades reológicas do concreto antes de ser submetido ao processo de bombeamento;
- 4) Determinar o desempenho de bombeamento do concreto na rede de bombeamento com o comprimento referência;
- 5) Remover trechos de tubos e avaliar o impacto no desempenho de bombeamento durante o processo de bombeamento do mesmo concreto.

Finalizando a determinação do impacto de trechos retos de tubos e do diâmetro podem ser determinados o impacto de conexões na rede com a seguinte metodologia:

- 1) Escolher rede padrão de bombeamento;
- 2) Realizar o controle da reologia dos concretos a serem bombeados a partir do efetivo controle para que não sejam alterados volumetricamente o concreto a ser bombeado;
- 3) Caracterizar as propriedades reológicas do concreto antes de ser submetido ao processo de bombeamento;
- 4) Determinar o desempenho de bombeamento do concreto na rede de bombeamento;
- 5) Adicionar conexões à rede e avaliar o impacto no desempenho de bombeamento durante o processo de bombeamento do mesmo concreto.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 304.2R-96**: Placing Concrete by Pumping Methods. Detroit: American Concrete Institute, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM – ABESC. **Concreto Dosado em Central – meio século de serviços ao Brasil**. 1ª ed. 140p. São Paulo, dezembro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM – ABESC. **Manual do Concreto Dosado em Central**. Disponível em: <<http://www.abesc.org.br>>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5578**: Produtos tubulares de aço - Terminologia. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

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

BARNES, H. A.; WALTERS, K. **The yield stress myth?** Rheologica Act, nº 24, p. 323-326, 1985.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**: Concreto madeira cerâmica metais plásticos asfalto. 5ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC.2008.

BBC (org). **Man dies in Port of Felixtowe industrial accident**. BBC News 7 de agosto de 2015. Suffolk, Felixstowe, 2015. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/uk-england-suffolk-33825247>>. Acessado em: 10 jan. 2020.

BEST, J; LANE, R. **Testing for Optimum Pumpability of Concrete**. Concrete International, p. 9-17. Out, 1960.

BOTELLA, R. M. **Reología de suspensiones cerâmicas**. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2005.

BROWN, G. O. **The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance**. Environmental and Water Resources History, p. 34-43, 2002.

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.

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.

DEWAR, J. D.; ANDERSON, R. **Manual of Ready Mixed Concrete**. 2ª ed. 247 p. Glasgow, 2004.

DINGER, D.R. **Rheology for ceramists**. C.B. Dinger Publishing, 2010.

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

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.

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.

GREIM, M. **Rheology of Fresh Concrete**. Schleibinger Gerate Teubert u. Greim GmbH. Buchbach, Alemanha 2015. Disponível em: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?download=k15_workshop_regensburg_15_english.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2020.

HICKEL, G. H.; VIERA, F. **Contribuição ao estudo de concretos bombeáveis**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

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.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (org). **Material efficiency in clean energy transitions**. International Energy Agency, Technology report – March 2019. 2019. Disponível

em: <<https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>>. Acessado em: 10 de janeiro de 2020.

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

KAPLAN, D.; DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Design of Concrete Pumping Circuit**. ACI MATERIALS JOURNAL, 102(2), p. 110-117, 2005.

KASTEN, K. **Gleitrohr** – Rheometer, ein verfahren zur bestimmung der fließeigenschaften von dickstoffen in rohrlösungen. “Reômetro de tubo deslizante, método de determinação de propriedades de fluxo de materiais espessos em tubulações”. TU Dresden, 2010.

KHATIB, R. **Analysis and prediction of pumping characteristics of high-strength selfconsolidating concrete**. 2013. 276f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

MANDINGA, L. B. **Concreto** – sua história, curiosidades e aplicações. 6º Curso de engenharia aplicada às obras de fundações e contenções. São Paulo, 2016.

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

MORINAGA, M. **Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines**. Fresh Concrete: Important Properties and Their Measurement, Proceedings of a RILEM Seminar. Leeds, Vol. 7, p 1-39. Mar, 1973.

NERELLA, V. N.; KASTEN, K.; MECHTCHERINE, V. **Experimental study on pumpability of concrete using sliding pipe rheometer**. Em: 1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, Paris, 2 - 4 September, 2013. TU Dresden, Instituto de Materiais de Construção. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Venkatesh_Naidu_Nerella/publication/296706212_Experimental_study_on_pumpability_of_concrete_using_sliding_pipe_rheometer_SLIPER/links/56dac02e08aebdb412d944/Experimental-study-on-pumpability-of-concrete-using-sliding-pipe-rheometer-SLIPER.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2020.

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

PEARSON, E.; MCMILLAN, A. **‘Concrete bullets’**: Workers injured after Southbank worksite explosion. The Sydney Morning Herald, 19 de outubro de 2019. Melborn, 2019. Disponível em: <<https://www.smh.com.au/national/victoria/concrete-bullets-workers-injured-after-southbank-worksite-explosion-20191019-p53281.html>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

RIDING, K. A.; VOSAHLIK, J.; FEYS, D.; MALONE, T.; LINDQUIST, W. **Best practices for concrete pumping**. Kansas Department of Transportation, Report No. K-TRAN: KSU-14-2, 2016.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, n. 114, p. 2-26, 2018.

SCHWING STETTER (org). **Apostila de treinamento de operadores**. Fabricação – Transporte – Bombeamento – Reciclagem. 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.

Sindicato Nacional da Industria do Cimento. **Perfil da distribuição do cimento por regiões e estados 2021**. 2022. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1660573953.pdf> > Acesso em: 16 ago. 2022.

TATTERSALL, G. H. **Workability and quality control of concrete**. Londres, E & FN SPON, 262 f., 2001.

THE CONSTRUCTION INDEX (org). **Untrained concrete pump operator killed trying to clear blockage**. The Construction Index 5 de dezembro de 2018. Wimbledon, 2018. Disponível em: <<https://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/concrete-pump-operator-killed-by-blockage-release>>. Acessado em: 10 jan. 2020.

TOLSTOI, D. **Скольжение жидкостей и дисперсных систем по твердым поверхностям**, “O deslizamento dos fluidos e das suspensões em paredes duras”. Academia de Ciência da União Soviética, Instituto de físico química, Moscou, 35 p. 1953.

VENANCIO, R. **Revolução tecnológica no controle de concreto dosado em central**. CONCRETO & Construções, n. 93, p. 45-49, 2019.

APÊNDICE A – FRAÇÃO DE CONCRETO BOMBEADO

Na busca de quantificar a importância do estudo em questão foi realizado levantamento da porção de produção submetida ao bombeamento de uma concreteira de médio porte na região de Grande Florianópolis, apresentadas na Tabela A e sintetizados na Tabela B.

Tabela A – Levantamento da proporção do concreto bombeado

Mês/Ano	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21
Descarga Convencional	982,0	1166,5	1415,0	656,0	772,5	355,5	1511,0
Bombeado	2293,0	4277,0	4948,5	4257,5	4421,5	4647,0	4834,5
Total	3275,0	5443,5	6363,5	4913,5	5194,0	5002,5	6345,5
Fração Bombeada	70%	79%	78%	87%	85%	93%	76%
Mês/Ano	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21		
Descarga Convencional	1637,5	1422,5	1103,5	1463,0	1167,5		
Bombeado	4330,0	4599,0	5041,5	5224,0	5183,0		
Total	5967,5	6021,5	6145,0	6687,0	6350,5		
Fração Bombeada	73%	76%	82%	78%	82%		
Mês/Ano	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22
Descarga Convencional	3944,5	2417,0	571,0	728,0	777,5	414,0	825,5
Bombeado	5231,5	6371,0	5379,5	5433,0	5939,0	5379,0	6752,5
Total	9176,0	8788,0	5950,5	6161,0	6716,5	5793,0	7578,0
Fração Bombeada	57,0%	72,5%	90,4%	88,2%	88,4%	92,9%	89,1%

Tabela B – Proporção do concreto bombeado acumulada

Ano	2021	2022 (até jul/22)	Total
Descarga Convencional	13652,5	9677,5	23330,0
Bombeado	54056,5	40485,5	94542,0
Total	67709,0	50163,0	117872,0
Fração Bombeada	79,8%	80,7%	80,2%

APÊNDICE B – COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DAS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS

Tabela C – Compilação de Resultados Campanhas Experimentais

Identificação Concreto	Slump (mm)	Espalhamento (mm)	Tensão de Escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s ⁻¹)	Pressão de Bombeame nto (Bar)	Pressão Normalizada (bar/m)
I1	230	420	4724,40	422,28	220,00	1,10
I2	225	410	3690,30	586,07	200,00	1,00
I3	210	360	3957,00	447,37	210,00	1,05
I4	225	360	2908,40	283,60	200,00	1,00
I5	230	430	3554,30	407,69	195,00	0,97
I6	220	370	3466,80	549,63	205,00	1,02
I7	225	390	4031,60	591,90	210,00	1,05
I8	230	400	3105,20	488,74	197,00	0,98
I9	220	400	3625,00	493,56	202,00	1,01
I10	225	370	3028,10	497,17	197,00	0,98
I11	235	430	2623,60	384,05	190,00	0,95
I12	220	380	3726,20	571,36	212,00	1,06
R1	-	650	1994,90	1272,30	55,00	0,83
R2	-	705	1123,30	828,28	60,00	0,90
R3	-	660	2269,40	1622,00	80,00	1,20
R4	-	630	2290,80	1183,50	90,00	1,36
R5	-	645	1544,40	501,29	45,00	0,68
R6	170	285	18657,00	1461,60	200,00	3,01
R7	235	430	7276,50	2236,90	100,00	1,51
R8	195	320	10955,00	1582,60	105,00	1,58
R9	220	400	7326,00	1204,00	95,00	1,43
R10	160	235	22501,00	1723,30	175,00	2,63
R11	195	300	16027,00	1451,30	190,00	2,86
R12	210	365	6426,50	1015,30	125,00	1,88
R13	240	465	5841,00	1197,80	125,00	1,88
R14	245	460	6181,00	1493,50	140,00	2,11
P1	-	700	3842,90	1250,80	61,00	0,92
P2	-	770	1174,30	876,72	59,00	0,89
P3	-	630	2701,70	1279,20	81,00	1,22
P4	-	715	1526,50	1387,40	77,00	1,16
P5	-	720	830,48	1117,50	62,50	0,94
P6	170	-	9502,80	1351,70	98,00	1,48
P7	200	-	15930,00	2952,30	135,00	2,03
P8	195	-	11326,00	2203,40	177,00	2,66
P9	220	-	4947,10	1504,80	110,00	1,66
P10	185	-	15979,00	1673,90	172,00	2,59
P11	200	-	11546,00	2521,00	140,00	2,11
P12	225	-	15718,00	1988,60	160,00	2,41
P13	195	-	11172,00	2608,30	148,00	2,23