



**UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE DOUTORADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL**

SÉRGIO CARLOS BERNARDO QUEIROZ

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA NO
DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUA PELA FILTRAÇÃO EM TUBO GEOTÊXTIL**

**RIBEIRÃO PRETO
2019**

Sérgio Carlos Bernardo Queiroz

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA NO
DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUA PELA FILTRAÇÃO EM TUBO GEOTÊXTIL**

Tese apresentada à Universidade de Ribeirão Preto-UNAERP, como requisito parcial de avaliação para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Doutorado em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Dr^a. Angela Di Bernardo Dantas

RIBEIRÃO PRETO
2019

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento Técnico
da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

Q384i Queiroz, Sérgio Carlos Bernardo, 1980-
Influência das características da água bruta no desaguamento
de resíduos gerados no tratamento de água pela filtração em tubo
geotêxtil / Sérgio Carlos Bernardo Queiroz. – Ribeirão Preto,
2019.

226 f.: il. color.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Angela Di Bernardo Dantas.

Tese (doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,
Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

1. Resíduos de ETA. 2. Tubo geotêxtil. 2. Desaguamento.

I. Título.

CDD 628

Sérgio Carlos Bernardo Queiroz
**“ INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA BRUTA NO
DESAGUAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE
ÁGUA PELA FILTRAÇÃO EM TUBO GEOTÊXTIL”.**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

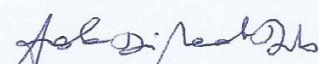
Orientadora: Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas.

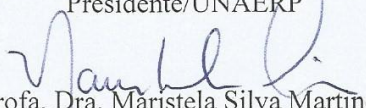
Área de concentração: Tecnologia Ambiental

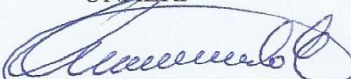
Data de defesa: 10 de maio de 2019

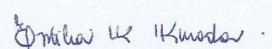
Resultado: APROVADO

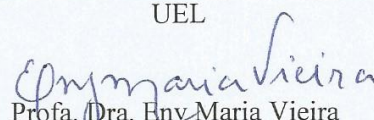
BANCA EXAMINADORA


Profa. Dra. Angela Di Bernardo Dantas
Presidente/UNAERP


Profa. Dra. Maristela Silva Martinez
UNAERP


Prof. Dr. Valdir Schalch
UNAERP


Profa. Dra. Emília Kiyomi Kuroda
UEL


Profa. Dra. Eny Maria Vieira
IQSC

Ribeirão Preto
2019

*Dedico este trabalho à Deus, e a minha esposa
querida, Andrea*

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por me permitir vencer mais esta etapa de vida;
- A minha esposa Andrea, meu porto seguro, que me acompanhou e me suportou em todos os momentos da caminhada;
- Aos meus Pais, José Carlos e Alicione, meus exemplos de caráter e amor incondicional;
- A minha tia Leonice e meus irmãos Aline e Adriano, família que me completa;
- As minhas queridas avós Teotônia e Maria José, que infelizmente nos deixaram durante a realização do curso;
- A Prof^a Dra. Angela Di Bernardo Dantas, muito obrigado pela preciosa orientação e paciência no acompanhamento de todo o trabalho. Vou seguir seu exemplo de ética profissional e compromisso com a pesquisa científica de qualidade;
- Ao Prof^o Luiz Di Bernardo pela confiança e orientação na pesquisa;
- A Hidrosan Engenharia por ter fornecido toda a estrutura técnica na obtenção de informações preciosas na realização do trabalho;
- Aos professores que compuseram a banca de defesa;
- Ao amigo o Prof^o Giulliano Guimarães pela amizade, pelas alegrias, tristeza e pelos desafios que passamos juntos em todas as etapas do doutorado;
- A Coordenação do Doutorado a Prof^a Luciana Rezende por todo carinho e apoio durante o curso;
- Agradeço a Coordenação e professores do curso de Engenharia Ambiental da UFT pelo apoio na realização da pesquisa;
- Agradeço a empresa BRK Ambiental/Saneatins por toda ajuda prestada durante a realização desse trabalho;
- Ao amigo biólogo José Roberto pela ajuda na realização das análises na estação de tratamento;
- A professora Maria Isabel Rodrigues por todo o ensinamento do planejamento estatístico experimental;
- A professora Dra. Cristina Paschoalato, pela ajuda fundamental na realização do Doutorado;
- Ao eng^o Matheus Guimarães pelo suporte nas análises de laboratório da Unaerp;

- Ao grande amigo Glauber na disponibilidade dos equipamentos e logística nos ensaios de campo na BRK Ambiental.
- Ao professor Marcelo Mendes pelo grande apoio da estrutura de laboratórios do IFTO;
- Aos alunos de engenharia civil do IFTO, Lucas Damasceno, Yitzhak Melo, Rodrigo Folha, Roberto Duarte e Laís Sá;
- As técnicas do laboratório de química do IFTO Evanuzia e Ana Cristina;
- A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro em forma de bolsa de estudo (Prodoutoral/UFT);

RESUMO

Dentre as tecnologias disponíveis para realizar o desaguamento dos resíduos gerados no tratamento de água (RETA), a filtração em tubo geotêxtil se tornou uma opção bastante viável, sendo usada em diversas ETAs no Brasil. Entretanto, algumas dúvidas sobre certos fatores desta tecnologia não foram totalmente abordadas na literatura, tais como: o efeito que mudanças na qualidade da água bruta da ETA possuem nas características de desaguamento de RETAs; a influência da concentração inicial de sólidos no RETA e como as condições do condicionamento químico interferem na eficiência de desempenho da filtração em tubo geotêxtil. Assim o presente trabalho, por meio de ensaios de bancada em filtro pressurizado de geotêxtil, buscou responder tais questionamentos. Os ensaios de desaguamento foram realizados com três tipos de RETAs gerados em escala piloto a partir de fontes de água bruta com características distintas: o RETA tipo I, preparado com suspensão da argila caulinita; o RETA tipo II, de manancial superficial com turbidez elevada, e RETA tipo III, manancial com matéria orgânica dissolvida natural (MON). Os resultados dos ensaios de desaguamento mostraram que o tipo da água bruta teve efeito direto na eficiência de desaguamento do resíduo no tubo geotêxtil, tendo o RETA tipo III (predominância de MON) resultando teor de sólidos após desaguamento de 6%, e o RETA tipo I (com características inorgânicas) alcançado teor de sólidos mais elevado, cerca de 37%. A capacidade de retenção de sólidos pelo tubo geotêxtil nos RETAs tipo I e tipo II foi influenciada pela concentração inicial de SST do resíduo, onde com baixa concentração (5 g/L de SST), obteve-se turbidez no efluente filtrado superior a 100 uT, e de maneira oposta, com concentração mais elevada (20 g/L de SST) a turbidez esteve próxima de 5 uT.

Palavras Chaves: resíduos de ETA, tubo geotêxtil, características da água bruta, desaguamento.

ABSTRACT

Among the technologies available to perform the dewatering of drinking water sludge (DWS), geotextile tube filtration became a viable option, being used in several water treatment plant (WTP) in Brazil. However, some doubts about certain factors of this technology have not been fully addressed in the literature, such as: the effect that changes in raw water quality of WTP have on the dewatering characteristics of DWS; the influence of the initial solids concentration on the DWS and how the conditions of the chemical conditioning interfere in the performance efficiency of the filtration in geotextile tube. Thus the present work, through tests of bench in pressurized filter of geotextile, sought to answer such questions. The dewatering tests were carried out with three types of DWS generated on pilot scale from raw water sources with different characteristics: the type I DWS, prepared with suspension of kaolinite clay; the DWS type II, with a high turbidity, and DWS type III, with natural dissolved organic matter (NOM). The results of the dewatering tests showed that the crude water type had a direct effect on the dewatering efficiency of the residue in the geotextile, with RETA type III (predominance of NOM) resulting in a solids content after dewatering of 6%, and the type DWS I (with inorganic characteristics) achieved higher solids content, about 37%. The retention capacity of solids by the geotextile tube in the type I and type II DWS was influenced by the initial concentration of solids of the residue, where at low concentration (5 g/L of TSS), turbidity was obtained in the filtered effluent higher than 100 uT, and conversely, with a higher concentration (20 g/L TSS), the turbidity was close to 5 uT.

Keywords: drinking water sludge, geotextile tube, characteristics of raw water, dewatering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotos de RETA. A esquerda limpeza manual de um decantador; a direita descarte da água de lavagem de filtro	23
Figura 2: Esquema ilustrativo da presença de água em resíduos gerados no tratamento de água	24
Figura 3: Imagem de uma centrífuga de desaguamento de RETA (esquerda) e o aspecto do resíduo já desaguado (à direita).....	27
Figura 4: Foto de um equipamento filtro prensa de esteira.....	27
Figura 5: Foto do equipamento prensa desaguadora tipo parafuso	28
Figura 6: Foto do sistema de desaguamento de leito de drenagem/secagem	28
Figura 7: Foto do sistema de lagoa	29
Figura 8: Imagem de um sistema de filtração em tubos geotêxteis (a esquerda, o sistema em operação; a direita, o geotêxtil em fim de operação com o resíduo já seco).....	29
Figura 9: Acima, esquema do funcionamento de um tubo geotêxtil. Abaixo, foto de um sistema real de desaguamento	34
Figura 10: Características de materiais desaguados em tubos geotêxteis	35
Figura 11: Modelo de teste de bancada por filtração a vácuo com geotêxtil usado por Moo-Young e Tucker (2002)	39
Figura 12: Modelo de teste de bancada utilizado por Moo-Young et al. (2002)	39
Figura 13: Filtro pressurizado em tubo geotêxtil usado por Kutay e Aydilek (2004).....	40
Figura 14: Modelo de filtro pressurizado proposto por Satyamurthy e Bhatia (2009)	41
Figura 15: Modelo de testes de filtro de geotêxtil por gravidade.....	41
Figura 16: A esquerda teste de bolsa suspensa (HBT). A direita teste de bolsa de pequena dimensão (GDT)	42
Figura 17: Curva de secagem de RETA no tubo geotêxtil.....	45
Figura 18: Fluxograma com as etapas da pesquisa	48
Figura 19: Preparação da água tipo I.....	54
Figura 20: Localização do manancial utilizado como a água tipo II	55
Figura 21: Localização do manancial utilizado como a água tipo III	56
Figura 22: Instalação de extração de SHA.....	58
Figura 23: Instalação piloto de geração de resíduos	60
Figura 24: Equipamento de jarreste utilizado na pesquisa	61
Figura 25: Fotos de algumas partes da sequência de geração dos resíduos	63
Figura 26: Filtro pressurizado em geotêxtil utilizado na pesquisa.....	65
Figura 27: Fluxograma do planejamento experimental estatístico.....	67

Figura 28: Esquema com um exemplo de cálculo dos índices de desempenho no ensaio de desaguamento no FPG	70
Figura 29: Turbidez da água decantada em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação para velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min da água de estudo tipo I.....	75
Figura 30: Turbidez da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min, da água de estudo tipo II.....	75
Figura 31: Turbidez da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, da água de estudo tipo III	76
Figura 32: Cor aparente da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, da água de estudo tipo III	76
Figura 33: Imagens dos três tipos de resíduos de tratamento de água (RETA) gerados para cada tipo de água de estudo.....	79
Figura 34: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo I.....	80
Figura 35: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo II.....	81
Figura 36: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo III	81
Figura 37: Distribuição do tamanho das partículas presentes nos RETAs.....	82
Figura 38: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	88
Figura 39: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	89
Figura 40: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	90
Figura 41: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	93
Figura 42: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	94
Figura 43: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	95
Figura 44: Aspecto do filtro geotêxtil ao final dos ensaios - polímero catiônico com os três tipos de RETA e para concentração inicial de SST do resíduo de 5 g/L.....	96

Figura 45: Aspecto do filtro geotêxtil ao final dos ensaios - para o polímero catiônico com os três tipos de RETA e para concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L.....	97
Figura 46: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.....	102
Figura 47: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.....	103
Figura 48: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.....	104
Figura 49: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	107
Figura 50: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	108
Figura 51: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	109
Figura 52: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.	113
Figura 53: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.....	114
Figura 54: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2.....	115
Figura 55: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 5 g/L nos três tipos de RETA e polímeros.....	118
Figura 56: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 12,5 g/L nos três tipos de RETA e polímeros.....	119
Figura 57: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L nos três tipos de RETA e polímeros.....	119

Figura 58: Gráfico boxplot dos resultados de teor de sólidos do resíduo desaguado, com as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST de todos os polímeros, nos três tipos de RETA e nas três concentrações iniciais de SST do resíduo.....	122
Figura 59: Resultados do tempo de desaguamento em função do volume filtrado, para os três tipos de RETA, polímeros e concentrações iniciais de SST do resíduo, para as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais micro e macropropriedades dos RETAs	25
Tabela 2: Valores de teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento.....	30
Tabela 3: Características da caulinita utilizada na pesquisa	49
Tabela 4: Características da resina macroporosa XAD-8	49
Tabela 5: Características do sulfato de alumínio usado na pesquisa	50
Tabela 6: Características do geotêxtil usado.....	50
Tabela 7: Características dos polímeros usados na pesquisa	50
Tabela 8: Equipamentos utilizados na pesquisa	51
Tabela 9: Parâmetros, métodos e limites de detecção utilizados na pesquisa.....	52
Tabela 10: Características técnicas da IPGR	60
Tabela 11: Níveis das variáveis estudados nos planejamentos de face centradas (DFC) para os ensaios de FPG; X ₁ (concentração inicial de SST no resíduo); X ₂ (dosagem de polímero)	67
Tabela 12: Planejamento dos ensaios realizados para o DFC faixa 1.....	68
Tabela 13: Planejamento dos ensaios realizados para o DFC faixa 2.....	68
Tabela 14: Caracterização físico-química dos três tipos de água de estudo	73
Tabela 15: Resultados da extração de SH da água de estudo tipo II	73
Tabela 16: Valores otimizados encontrados nos ensaios de jarteste para os três tipos de água de estudo	74
Tabela 17: Relação do quantitativo de ensaios realizados na IPGR para as águas de estudo.....	77
Tabela 18: Caracterização físico-química das três concentrações de SST preparadas para cada tipo de RETA.....	78
Tabela 19: Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida dos três tipos resíduo, usando o método EDS da microscopia eletrônica	79
Tabela 20: Resultados de eficiência de filtração (EF) e perda de partículas (PP) nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de resíduos.....	84
Tabela 21: Resultados de eficiência de filtração (EF) e perda de partículas (PP) nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos.....	85
Tabela 22: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta eficiência de filtração (EF) para todos os tipos de RETA e polímeros estudados.	86
Tabela 23: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta perda de partículas (PP) para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados.....	91
Tabela 24: Resultados do teor de sólidos do resíduo desaguado e percentual de desaguamento (PD) nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de resíduos.	98

Tabela 25: Resultados do teor de sólidos do resíduo desaguado e percentual de desaguamento (PD) nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos.	99
Tabela 26: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta percentual de desaguamento (PD) para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados.....	100
Tabela 27: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta teor de sólidos do resíduo desaguado para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados.....	105
Tabela 28: Resultados do tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de RETAs.....	110
Tabela 29: Resultados do tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos.	111
Tabela 30: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta tempo de desaguamento para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados.....	112
Tabela 31: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios de turbidez do filtrado para os diferentes tipos de resíduo e polímeros.	117
Tabela 32: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios de teor de sólidos no resíduo desaguado para os diferentes tipos de RETA e polímeros.	121
Tabela 33: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios do tempo total de desaguamento para os diferentes tipos de resíduo e polímeros.	124
Tabela 34: Resumo dos melhores resultados obtidos para cada índice de desempenho.....	127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - associação Brasileira de Normas Técnicas

AE – água de estudo

ALF - água de lavagem dos filtros

ANI – aniônico

ANOVA - análise de variância

CAT – catiônico

COT - carbono Orgânico Total

DCC – delineamento do composto central

DCCR - delineamento do composto central rotacional

DFC - delineamento de face centrada

DOE - design of experiments

EF - eficiência de filtração

ETA - estação de tratamento de água

ETE – estação de tratamento de esgoto

FPG - filtro pressurizado em geotêxtil

GDT - geotextile tube dewatering test

HBT - hanging bag test

IPGR - instalação piloto de geração de resíduos

MON – matéria orgânica natural

NIO – não iônico

PD - percentual de desaguamento

PD - perda de partículas

pH - potencial Hidrogeniônico

RETA - resíduos do tratamento de água

RSM - response surface methodology

SHA - substâncias húmicas aquáticas

SST – sólidos suspensos totais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVOS.....	21
2.1. OBJETIVO GERAL.....	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1 RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA	22
3.2 DESAGUAMENTO DOS RETAs	25
3.2.1 Tecnologias de Desaguamento	26
3.2.2 Fatores que influenciam no desaguamento de RETA	30
3.2.3 Influência da MON no desaguamento	31
3.3 FILTRAÇÃO EM TUBOS GEOTÊXTEIS.....	32
3.3.1 Evolução da Tecnologia de Filtração	32
3.3.2 Fundamentos da Tecnologia.....	33
3.3.3 Critérios de avaliação de desaguamento.....	36
3.3.4 Métodos e Testes de Desaguamento de Tubo Geotêxtil.....	38
3.3.5 Uso de condicionantes químicos	43
3.4 DESAGUAMENTO DE RETA EM TUBO GEOTÊXTIL.....	43
3.5 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS ANÁLICOS UTILIZADOS	49
4.1.1 Materiais e Produtos Químicos.....	49
4.1.2 Equipamentos e Métodos Analíticos	51
4.2 ÁGUAS DE ESTUDO – 1ª ETAPA	53
4.2.1 Água Tipo I - Suspensão com Caulinita.....	53
4.2.2 Água Tipo II – Manancial Superficial com Turbidez Elevada.....	54
4.2.3 Água Tipo III – Manancial com MON.....	55
4.2.4 Caracterização das águas de estudo	57
4.3 GERAÇÃO DOS RESÍDUOS – 2ª ETAPA	58
4.3.1 Montagem da Instalação Piloto de Geração de Resíduos.....	59
4.3.2 Ensaios de Jarteste – Diagrama de Coagulação.....	60
4.3.3 Ensaios de Geração dos Resíduos	62
4.3.4 Caracterização dos RETAs	64
4.4 ENSAIOS DE BANCADA EM TUBO GEOTÊXTIL – 3ª ETAPA.....	64
4.4.1 Montagem do Filtro Pressurizado em Geotêxtil.....	64
4.4.2 Planejamento Estatístico Experimental	66
4.4.3 Ensaios no Filtro Pressurizado em Geotêxtil.....	69
4.4.4 Análise dos Dados Gerados	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72

5.1 ÁGUAS DE ESTUDO.....	72
5.1.1 Caracterização	72
5.2 GERAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	74
5.2.1 Ensaio de Jarteste – Diagrama de Coagulação.....	74
5.2.2 Ensaio de Geração e Caracterização dos RETAs.....	77
5.3 ENSAIOS DE BANCADA EM TUBO GEOTÊXTIL.....	82
5.3.1 Resultados da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM).....	83
5.3.1.1 Índices de Retenção de Partículas	83
5.3.1.1.1 Eficiência de Filtração.....	86
5.3.1.1.2 Perda de partículas	91
5.3.1.2 Índices de Desaguamento do Resíduo	97
5.3.1.2.1 Percentual de Desaguamento (PD).....	100
5.3.1.2.2 Teor de Sólidos do Resíduo Desaguado.....	105
5.3.1.2.3 Tempo Total de Desaguamento.....	110
5.3.2 Resultados do Teste de Comparação de Médias Anova/Tukey	116
5.3.2.1 Turbidez do filtrado	116
5.3.2.2 Teor de sólidos no resíduo desaguado	120
5.3.2.3 Tempo de desaguamento.....	123
5.3.3 Resumo Comparativo dos Resultados	126
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	128
7. REFERÊNCIAS.....	130
APÊNDICE A.....	137

1 INTRODUÇÃO

O aprimoramento no tratamento de água potável tornou-se uma necessidade crescente na sociedade moderna. No Brasil, a maioria das estações de tratamento de água (ETAs) que tratam água captada em mananciais superficiais empregam a tecnologia de tratamento por ciclo completo. Essa técnica de tratamento utiliza processos e operações unitárias (coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção), visando à remoção de partículas suspensas, em estado coloidal, compostos químicos e microrganismos presentes na água bruta. Assim, como resultado do processamento da água bruta pelas unidades da ETA, além da obtenção de água potável, tem-se a geração dos resíduos do tratamento de água (RETAs).

A maior parte dos RETAs são provenientes das limpezas ou descargas dos decantadores (ou eventualmente, em flotadores) e da água de lavagem dos filtros (ALF). A água de lavagem dos filtros produz a maior quantidade de resíduos em termos volumétricos, já a descarga de decantador produz a maior quantidade em termos mássicos. A quantidade e a qualidade dos RETAs dependem de diversos fatores, merecendo destaque principalmente a qualidade da água bruta, a tecnologia de tratamento de água, as dosagens de produtos químicos empregados e as condições de operação e manutenção do sistema. Em função de todos estes fatores, podem ser gerados resíduos com características diversas, o que dificulta muito na definição do melhor sistema de tratamento para os RETAs, pois tais características interferem nos processos de adensamento, desaguamento e secagem do resíduo (Di Bernardo *et al.*, 2012).

O gerenciamento dos RETAs, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, representa um sério problema para os responsáveis da área de saneamento, pois o lançamento em corpos d'água destes resíduos é considerado crime ambiental quando não aprovado por órgãos ambientais, de acordo com o artigo 54 da Lei 9.605/98. Os efeitos sobre o meio ambiente decorrentes do lançamento dos RETAs nos corpos d'água são severos, podendo ocorrer alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água, principalmente devido à sobrecarga de ferro e alumínio, presentes em quantidade marcante nos resíduos (Guimarães, 2007).

Tanto no Brasil como em outros países, o tratamento dos RETAs envolve técnicas convencionais de separação sólido-líquido, geralmente com uma etapa inicial de clarificação/adensamento, e logo após uma etapa de desaguamento/secagem. Esta última etapa pode ser realizada por métodos mecanizados (como centrífuga, filtro prensa e prensa

desaguadora) e métodos não mecanizados (como leito de secagem, leito de drenagem, lagoa de sedimentação e filtração em tubo geotêxtil) (Di Bernardo *et al.*, 2012).

O desaguamento de materiais com alto teor de umidade pela filtração em tubos geotêxteis vem sendo muito utilizado nas últimas décadas, sendo uma tecnologia eficiente para a redução do impacto ambiental destes resíduos. A técnica consiste em eliminar o excesso de água do resíduo, através da drenagem do líquido pelos pequenos poros do geotêxtil, ocorrendo desaguamento progressivo e redução do volume original. Utiliza-se a filtração em geotêxtil desde a década de 1980, geralmente em material dragado de rios e represas, sendo que nos últimos anos, com o avanço da tecnologia, permitiu-se a melhoria e diversificação da aplicação dessa tecnologia (Morgan, 2014).

Entre as vantagens deste método quando comparado a outras tecnologias de desaguamento, destaca-se o baixo custo de energia, fácil operação e alta eficiência. Para Lawson (2008), os tubos geotêxteis são simples de se utilizar, ao contrário de outras tecnologias de desaguamento mecânicas mais complexas. Entretanto, em função do número de variáveis envolvidas no processo de filtração em tubo geotêxtil, existem ainda, incertezas sobre a melhor condição do desaguamento em alguns tipos de resíduos, entre eles os RETAs.

Apesar de várias experiências práticas em ETAs no Brasil mostrarem o potencial do uso dos tubos geotêxteis no desaguamento de RETAs, dúvidas sobre a influência de certos fatores, não foram totalmente abordadas na literatura. Entre tais fatores pode-se citar: a) qual a importância da origem da água bruta nas características de desaguamento dos RETAs pela filtração em tubo geotêxtil; b) qual a concentração mínima de SST que os resíduos devam possuir para que a eficiência do desaguamento não fique comprometida; c) qual a interferência do tipo e da dosagem dos condicionantes químicos no desaguamento.

Dentro deste contexto, a principal motivação para a realização do presente trabalho foi a investigação experimental e o fornecimento de subsídios técnicos e científicos sobre o comportamento e eficiência da filtração em tubo geotêxtil no desaguamento de RETAs com diferentes características.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a influência do desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água pela filtração em tubo geotêxtil em escala de bancada, considerando diferentes características da água bruta e condicionamento químico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Produzir em escala piloto, RETAs a partir de três tipos diferentes de água bruta: água tipo I (suspensão com caulinita), água tipo II (manancial superficial com turbidez elevada) e água tipo III (manancial com MON);
- ✓ Executar ensaios de desaguamento nos RETAs produzidos, por meio de testes de bancada com filtro pressurizado em tubo geotêxtil;
- ✓ Avaliar, por meio de ferramentas estatísticas, o processo de desaguamento dos RETAs, identificando o nível de influência das variáveis: tipo da água bruta, concentração inicial de SST do resíduo, tipo e dosagem dos condicionantes químicos;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Uma estação de tratamento de água pode ser considerada, de fato, a unidade produtiva da “indústria da água”. Deve possuir unidades em que se desenvolvem operações e processos unitários, que utilizam um recurso natural (água superficial ou subterrânea) como matéria-prima, faz uso de insumos (produtos químicos), consome energia elétrica e gera resíduo. Isto para a obtenção de um produto final, a água para abastecimento público (Haak, 2011).

Os resíduos provenientes das unidades de tratamento de água, retidos em sua maioria nos tanques de decantação (ou flotação) e de filtração, é originado no processo de coagulação/floculação, ou seja, nas unidades formadoras de flocos. Na coagulação da água são adicionados sais de alumínio e/ou de ferro, visando a formação de aglomerados que serão removidos nas unidades posteriores (Hedlund, 2016).

Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduo é proveniente da lavagem de filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade produzida é gerada nos decantadores, por ser a sedimentação o primeiro processo físico de separação sólido-líquido (Di Bernardo e Dantas, 2005). Valores indicados na literatura exemplificam essa afirmação: enquanto a água de lavagem possui concentrações de sólidos entre 50 e 400 mg/L - representando entre 2 e 5% do volume processado na estação, a operação de descarga em decantadores gera um resíduo bem mais concentrado, entre 500 e 30.000 mg/L - correspondente a uma fração entre 0,1 e 0,3% do volume produzido pela estação de tratamento de água (Andreoli *et al.*, 2001). A Figura 1 mostra o descarte de RETAs, de um decantador e de um filtro rápido de areia.

Historicamente no Brasil, preocupou-se sempre em garantir a produção de água com qualidade necessária a atender aos padrões de potabilidade, não existindo muitos estudos sobre a geração de resíduos, características qualitativas e quantitativas desses, bem como aspectos relativos a prováveis impactos ambientais e métodos de tratamento e disposição final destes resíduos. Infelizmente, mesmo com a Lei 9.605/98 – de crimes ambientais, este panorama não apresentou a evolução esperada, uma vez que grande parte das ETAs no Brasil ainda descartam seus resíduos em corpos de água, especialmente as de pequeno porte. Dentre os impactos que o descarte destes resíduos pode causar em um corpo de água estão, a deterioração da qualidade de água pela adição de sólidos e microrganismos removidos previamente no tratamento de água, alterações da biota aquática, redução do volume útil do

corpo de água devido ao assoreamento e possíveis efeitos tóxicos aos seres humanos e animais (Richter, 2001).

Figura 1: Fotos de RETAs. A esquerda limpeza manual de um decantador; a direita descarte da água de lavagem de filtro



Fonte: Hidrosan (2018)

Para Cordeiro (2002) as características dos RETAs dependem de vários fatores, podendo ser citados: o tipo de manancial e qualidade da água bruta; tipo e qualidade dos produtos químicos aplicados nos sistemas e as condições operacionais/projeto da ETA.

Seguindo uma classificação proposta por Cornwell (1987), os RETAs podem possuir diferentes características, dependendo do tipo de água a ser tratada e dos processos e operações unitárias presentes na estação de tratamento:

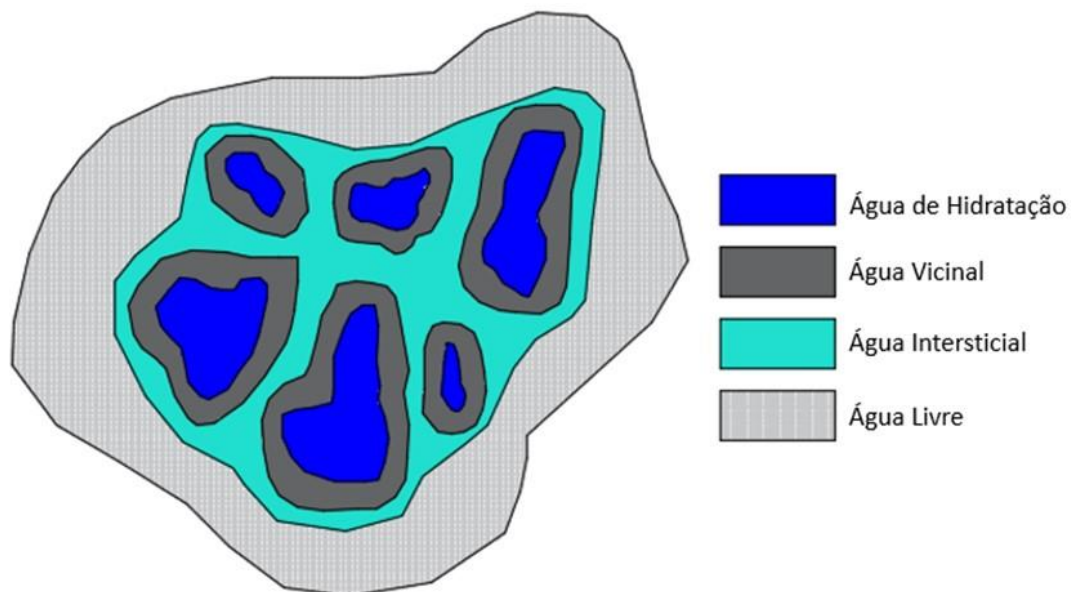
- Resíduos gerados durante processos de tratamento de água visando à remoção de cor e turbidez, em ETAs de ciclo completo (descarga de decantadores ou eventualmente nos flotadores com ar dissolvido e as águas de lavagem dos filtros);
- Resíduos gerados durante processos de remoção de dureza em águas para abastecimento;
- Resíduos gerados durante processos de tratamento avançado visando à redução de compostos orgânicos presentes na água bruta, usando a adsorção com carvão ativado;
- Resíduos gerados durante processos visando à redução de compostos inorgânicos presente na água bruta, como processos de membrana (osmose reversa, ultrafiltração, nanofiltração, etc);

Cada tipo de resíduo apresenta características físico-químicas distintas, influenciadas pelo tipo e concentração de compostos presentes na água bruta, pelos coagulantes adicionados durante o processo de tratamento e pelo tipo de processo utilizado no tratamento (Koorse, 1993).

De acordo com Richter (2001) os RETAs são compostos de água e sólidos em suspensão, acrescidos de produtos utilizados no tratamento de água. Além de serem classificados como resíduos sólidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Neste sentido para evitar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, os resíduos precisam ser caracterizados segundo parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Para isto as normas NBR 10.004 (ABNT, 2004a), NBR 10.005 (ABNT, 2004b), NBR 10.006 (ABNT, 2004c) e NBR 10.007 (ABNT, 2004d) são utilizadas na classificação dos resíduos.

Os RETAs apresentam como principal característica, serem formados basicamente de água e sólidos em suspensão. Estes resíduos possuem grande umidade, geralmente maior que 95%, de maneira geral, sob a forma fluída (Cordeiro, 1999). A água presente no resíduo apresenta diversas frações, como ilustrado na Figura 2, a qual influencia a separação da fase líquida da sólida. Conforme a ilustração pode-se ter as seguintes frações: 1) água livre - água não associada aos sólidos e que pode ser facilmente separada por sedimentação gravitacional simples; 2) água intersticial ou capilar - água presente no interior ou intimamente ligada aos flocos que pode ser liberada quando há quebra do floco, mediante aplicação de força mecânica, tais como centrífugas; 3) água vicinal – associada às partículas sólidas por virtude da estrutura molecular da água, pontes de hidrogênio; 4) água de hidratação – água quimicamente ligada às partículas sólidas e pode ser liberada somente por destruição termoquímica das partículas (Barroso, 2007).

Figura 2: Esquema ilustrativo da presença de água em resíduos gerados no tratamento de água



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)

Segundo Barroso (2007) as micropropriedades do resíduo definem suas características intrínsecas, e podem ser tratadas como características de suspensão, enquanto, as macropropriedades descrevem as características relativas à tratabilidade dos resíduos e são dependentes das micropropriedades. Dharmappa *et al.*, (1997) reportam as principais micropropriedades e macropropriedades consideradas na caracterização de RETAs, conforme listado na Tabela 1.

Tabela 1: Principais micro e macropropriedades dos RETAs

Micropropriedades	Macropropriedades
Distribuição e tamanho dos flocos	Velocidade de sedimentação
Estrutura/forma dos flocos	Flotabilidade
Tensão de cisalhamento do floco	Centrifugabilidade
Densidade	Resistência específica
Teor de sólidos	Tempo de filtração
Umidade	Tempo de sucção por capilaridade
Viscosidade e temperatura	Compressibilidade
Tensão superficial	Lixiviação
Composição química	Força cisalhante

Fonte: Adaptado de Dharmappa (1997)

A determinação das características de efluentes quaisquer, se torna fundamental para a definição de sistemas de controle. Assim, para os RETAs, a remoção da água livre presente se torna um dos principais pontos na definição do sistema de redução de volume. Dessa forma, o tamanho e a forma das partículas presentes e a sua distribuição são parâmetros que podem definir com mais clareza o sistema a ser adotado para remoção de água livre (Cordeiro, 2002).

3.2 DESAGUAMENTO DOS RETAs

A etapa básica das tecnologias de tratamento de RETAs visa uma diminuição no conteúdo de água. Sem este passo, seria difícil e consideravelmente antieconômico lidar e tratar o resíduo. Isso normalmente é realizado em sistemas de desaguamento. Assim, todo processo de desaguamento de resíduos, busca maximizar o teor de sólidos no material final,

com conseqüente redução do seu volume, para posterior disposição. De maneira geral utilizam-se os seguintes processos de desaguamento de RETAs:

- Desaguamento não mecânico: leitos de secagem/drenagem, lagoas e tubo geotêxtil;
- Desaguamento mecânico: centrífuga, filtro prensa de esteira e prensa desaguadora parafuso.

A escolha da tecnologia a ser empregada depende de um cuidadoso processo de verificação das condições operacionais das estações, características dos resíduos e condições regionais e locais. Principalmente para os meios naturais de desaguamento, as condições locais quanto à disponibilidade de área e clima são de grande importância (Fontana, 2004).

O adensamento é uma das operações unitárias mais importantes do processo de tratamento da fase sólida, pois, de um modo geral, os equipamentos de desaguamento mecânico existentes no mercado recomendam um teor de sólidos no resíduo de entrada superior a 2% (20 g/L de SST) para que o seu funcionamento ocorra de forma adequada e econômica (Ferreira Filho e Além Sobrinho, 1998). Esse processo, cuja finalidade principal é a remoção do máximo de água possível antes do desaguamento final, usualmente é realizado por decantação ou por flotação e produz um resíduo concentrado, com conseqüente redução de volume pela remoção da água (Richter, 2001). Qualquer que seja a concepção do sistema de adensamento, é fundamental que o resíduo seja pré-condicionado com polímero, cujas dosagens situam-se normalmente entre 0,5 a 6,0 gramas de polímero por quilo de sólidos secos (g/kg).

3.2.1 Tecnologias de Desaguamento

A seguir, são apresentadas as principais características das tecnologias utilizadas no desaguamento de resíduos gerados no tratamento de água, tanto sistemas mecânicos como não mecânicos.

- Centrífuga

A centrifugação é uma operação de separação de fases que ocorre pela ação do campo de forças centrífugas que surge quando se rotaciona um recipiente cilíndrico (tambor) contendo as fases que se deseja separar (resíduo). O cilindro é submetido à altas rotações, as partículas mais densas (sólidos) são rapidamente impulsionadas na direção da parede interna do tambor, onde são acumuladas e, dessa forma, separadas da fase líquida (Reali, 1999).

A força mecânica que é utilizada na centrífuga é cerca de 500 a 3.000 vezes maior que a força de gravidade. A Figura 3 mostra uma imagem de uma centrífuga para desaguamento de RETA (Vanzetto, 2012).

Figura 3: Imagem de uma centrífuga de desaguamento de RETA (esquerda) e o aspecto do resíduo já desaguado (à direita)



Fonte: Di Bernardo *et al.* (2012)

- Filtro prensa de esteira

O filtro prensa é um equipamento que funciona com o resíduo sendo introduzido entre duas correias, em que uma delas é o meio filtrante (Figura 4). Estas deslocam-se entre roletes que promovem a compressão de uma esteira sobre outra, provocando a drenagem do líquido. A operação do filtro prensa envolve basicamente três estágios, sendo eles: drenagem por gravidade, zona de baixa pressão (compressão) e zona de alta pressão (Kukenberger, 1996).

Figura 4: Foto de um equipamento filtro prensa de esteira



Fonte: Di Bernardo *et al.* (2012)

- Prensa desaguadora parafuso

A prensa parafuso é um dispositivo de desaguamento que utiliza uma rosca transportadora, conhecida também como parafuso sem fim, que gira ao redor de uma tela de aço perfurada (ver Figura 5). À medida que a rosca gira, ocorre a deposição contínua de sólidos na tela perfurada e devido à geometria da rosca e da tela, ocorre um aumento progressivo da pressão até o fim do equipamento (Vanzetto, 2012).

Figura 5: Foto do equipamento prensa desaguadora tipo parafuso



Fonte: Di Bernardo *et al.* (2012)

- Leito de secagem/drenagem

Os leitos de secagem são constituídos por tanques rasos, com duas ou três camadas de areia com granulometria diferente e cerca de 30 cm de espessura. O sistema completo é composto por camada suporte, meio filtrante sistema de drenagem. A Figura 6 apresenta um sistema de leito de secagem recebendo RETAs.

Figura 6: Foto do sistema de desaguamento de leito de drenagem/secagem



Fonte: Autor (2019)

- Lagoas

A remoção de água em lagoas é muito parecida aos leitos de secagem, sendo um método que pode ser utilizado quando se tem disponibilidade de grandes áreas. O tratamento ocorre em três fases: drenagem, evaporação e transpiração. A Figura 7 apresenta um sistema de lagoas.

Figura 7: Foto do sistema de lagoa



Fonte: Autor (2019)

- Filtração em tubo geotêxtil

A técnica consiste em eliminar o excesso de água do resíduo, através da drenagem do líquido pelos pequenos poros do geotêxtil, ocorrendo desaguamento progressivo e redução do volume original. No item 3.3 será detalhado mais esta tecnologia, que é objeto da presente pesquisa. A Figura 8 mostra a imagem de um sistema de desaguamento de RETA por tubos geotêxteis.

Figura 8: Imagem de um sistema de filtração em tubos geotêxteis (a esquerda, o sistema em operação; a direita, o geotêxtil em fim de operação com o resíduo já seco)



Fonte: Autor (2019)

Segundo Di Bernardo *et al.*, (2011), cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, sendo necessária para escolha da técnica a ser utilizada a realização de ensaios preliminares. Os sistemas mecânicos envolvem altos custos de aquisição, manutenção, além de consumir energia e produtos químicos, já os sistemas naturais apresentam como restrições a necessidade de grandes áreas e depende das condições climáticas. Uma questão primordial na escolha da tecnologia de desaguamento, que conseqüentemente impacta na destinação final do resíduo, é o teor de sólidos mínimo para o resíduo ser encaminhado a etapa de desaguamento. Dependendo da situação da ETA, há necessidade de se ter uma etapa anterior, de adensamento, para elevar o teor de sólidos no líquido. A Tabela 2 apresenta alguns valores recomendados pela literatura/fabricantes das tecnologias de desaguamento, para os teores de sólidos mínimo na entrada do sistema, e o teor de sólidos esperado no final do tratamento.

Tabela 2: Valores de teor de sólidos para diferentes tecnologias de desaguamento

Tecnologia de Desaguamento	Teor de sólidos mínimo antes do tratamento (%)	Teor de sólidos após o Tratamento (%)
Centrífuga	2 % (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012)	20-30% (Cornwell, 1987)
Filtro prensa de esteiras	1-5 % (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012)	20-25% (Cornwell, 1987)
Leitos de secagem	-	30-40% (Barroso, 2007)
Lagoa	-	7-15% (Cornwell, 1987)
Tubo Geotêxtil	1 % (Maccaferri, 2018)	20-30% (Guimaraes <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Autor (2019)

3.2.2 Fatores que influenciam no desaguamento de RETA

Conforme comentado anteriormente, vários fatores influenciam nas características finais dos resíduos gerados no tratamento de água, conseqüentemente, influência também no processo de desaguamento destes. Dentre estes fatores, pode-se citar como principais: o tipo da água bruta e as condições de coagulação (pH, dosagem e tipo de coagulante).

Várias pesquisas têm mostrado que quando a água bruta tem altos valores de turbidez, gera-se resíduos com teor de sólidos mais elevado, facilitando assim o processo de desaguamento. E que o inverso, com baixa turbidez da água bruta, resulta em dificuldades no processo de desaguamento (Bache *et al.*, 1999; Cornwell, 2006; Dixon *et al.*, 2004). Altas

dosagens de coagulantes em ETAs com água bruta de baixa turbidez, tendem a produzir resíduos que possuem pequena eficiência de desaguamento, tanto para resíduos a base de sulfato de alumínio, como para cloreto férrico (Dixon *et al.*, 2004). Isto se deve provavelmente ao coagulante precipitado predominar na massa de resíduo quando a turbidez é baixa. Verrelli (2008), relata que a capacidade de remoção de água dos resíduos de alumínio, tende a piorar à medida que a dosagem de coagulante aumenta.

Chang *et al.* (1997), estudando o desaguamento de RETAs a base de argila e coagulação com de sulfato de alumínio, verificaram uma melhoria no desaguamento com a alteração do pH de coagulação de pH 10, para pH 7. Quando o pH caía para 3, foi observado uma deterioração no desaguamento.

Vários trabalhos na literatura, relatam que na comparação de RETA's a base de alumínio e ferro, os resíduos a base de cloreto férrico como coagulante, tendem a desaguar mais rapidamente, do que os resíduos a base de alumínio (Verrelli, 2008).

Outro fator que influencia o desaguamento de resíduos de ETA, é o condicionamento químico, por meio de polímeros. Atualmente, quase todas as tecnologias de desaguamento de RETAs, utilizam o condicionamento químico em alguma parte do processo. Gharaibeh (2009), relata que, a aplicação de polímeros no desaguamento, aumenta consideravelmente a taxa de deságue. Os polímeros podem ser classificados de acordo com a sua carga elétrica em catiônicos, aniônicos, não-iônicos e anfotéricos e, quanto a sua origem: sintética ou natural. Barroso (2007) destaca duas vantagens no uso específico de polímeros sintéticos que se aplicam ao tratamento de resíduos. São elas: (i) redução do volume do resíduo gerado; (ii) maior facilidade de desaguamento do resíduo gerado.

3.2.3 Influência da MON no desaguamento

Flutuações naturais na qualidade da água bruta podem causar grandes mudanças nas características de RETAs através de mudanças no tamanho, morfologia e resistência na estrutura do floco (Thompson e Paulson, 1998). Segundo Verrelli (2008), é tentador supor que, se a uma água bruta de cor e carbono orgânico elevado, com baixa turbidez, é difícil de tratar, então o resíduo resultante também será difícil de desaguar. O autor afirma que, essa premissa não pode ser generalizada para todos os casos, contudo há uma forte relação entre presença de MON no resíduo, e baixa eficiência no desaguamento.

Dulin e Knocke (1989) estudaram em escala de bancada os efeitos da coagulação em água bruta com presença de MON, nas características de desaguamento por centrifuga dos

resíduos gerados. Foi utilizado o sulfato de alumínio (variando o pH da coagulação, dosagem e pré-oxidação com permanganato de potássio). Os resultados mostraram que, as características de desaguamento do resíduo pioraram com o aumento da quantidade específica de matéria orgânica incorporada na água bruta. As mudanças observadas nas características do resíduo, foram correlacionadas com uma diminuição no tamanho e na densidade do floco, que ocorreu quando maiores quantidades de matéria orgânica foram incorporadas à estrutura do floco. A pré-oxidação com permanganato de potássio, melhorou as taxas de desaguamento do resíduo.

Segundo Ho e Newcombe (2005), o aumento da cor “natural” e a diminuição da turbidez na água bruta resultam em resíduos com estruturas mais frágeis, tanto para sulfato de alumínio como para cloreto férrico. Os autores afirmam ainda que, a presença de MON (matéria orgânica natural) inibe a formação de grandes agregados. Níveis elevados de MON em RETA, produzem dificuldade no desaguamento, tanto em sistemas por gravidade, como em sistemas mecânicos de filtração.

Jarvis *et al.* (2005) relatam que RETA's com altos teores de MON, são mais propensos a forças de cisalhamento nas etapas de desaguamento. Os efeitos foram correlacionados com a proporção de COT e altas dosagens de sulfato de alumínio.

Verrelli (2008), comenta que RETAs, a base de sulfato de alumínio e enriquecido com MON, chegam a desaguar 50% menos, quando comparados com os mesmos resíduos, sem a presença de MON.

3.3 FILTRAÇÃO EM TUBOS GEOTÊXTEIS

3.3.1 Evolução da Tecnologia de Filtração

O uso de tubos geotêxteis no desaguamento de resíduos contaminados, incluindo os resíduos de saneamento (ETA e ETE) teve início no fim dos anos 80 (Fowler *et al.*, 1996). O desaguamento em tubos geotêxteis é um processo no qual um material de suspensão líquido é bombeado para um tubo ou série de tubos para facilitar a remoção de água. Esta tecnologia utiliza as propriedades hidráulicas do geotêxtil para suspensões de água, retendo sedimentos e contaminantes.

Segundo Lawson (2008), o geotêxtil deve ser permeável o suficiente para permitir que a água drene rapidamente, mas deve fazê-lo sem perda excessiva de partículas sólidas finas. Os tubos também fornecem uma grande área de superfície tridimensional sobre a qual o

desaguamento pode ocorrer. Ainda segundo o autor, diferentemente de outras tecnologias, os tubos geotêxteis podem ser fabricados em tamanhos específicos e projetados para acomodar as necessidades de uma operação particular de desaguamento. Os tubos também são simples de transportar e usar, e são significativamente mais econômicos que instalações de descarte confinadas e sistemas mecânicos. Para Maurer (2011), os tubos geotêxteis são sistemas ideais para o desaguamento de resíduos e sedimentos contaminados, pois fornecem uma grande área de superfície de contato com o resíduo, tornando o desaguamento eficiente.

Embora o uso de tubos geotêxteis em processos de desaguamento de resíduos, esteja em franco desenvolvimento, o conceito não é novo. Os tubos geotêxteis foram patenteados em 1967 pela empresa dinamarquesa Aldek, A.S. Foram usados pela primeira vez em estruturas marinhas durante o final dos anos 60 (Koerner, 2016). Nos anos seguintes, o uso da tecnologia em aplicações marítimas tornou-se cada vez mais comum. Hoje, os tubos são usados em todo o mundo em uma variedade de estruturas, incluindo, quebra-mares, revestimentos, diques de proteção e contenção. A evolução dos tubos geotêxteis para uso em aplicações de desaguamento de resíduos contaminados ocorreu durante a década de 1990, depois que um estudo nos estados unidos demonstrou que materiais de grãos finos poderiam ser contidos nesses tubos (Fowler *et al.*, 1996).

O desaguamento de resíduos contaminados com tubos geotêxteis cresceu exponencialmente nos últimos anos, impulsionada por legislações ambientais mais restritivas e pela consequente necessidade de métodos de desaguamento eficientes e de baixo custo. Os tubos são fabricados e/ou comercializados em praticamente todas as regiões do mundo. A tecnologia já foi adotada pelas principais indústrias que geram resíduos com alto teor de umidade, como a agroindústria, saneamento (tratamento de água e esgoto), papel e celulose, mineração, dragagem e processamento de alimentos. No final dos anos 2000, os tubos geotêxteis expandiram em quase todas as indústrias com necessidades de desaguamento. (Muthukumaran *et al.*, 2006; Lawson, 2008).

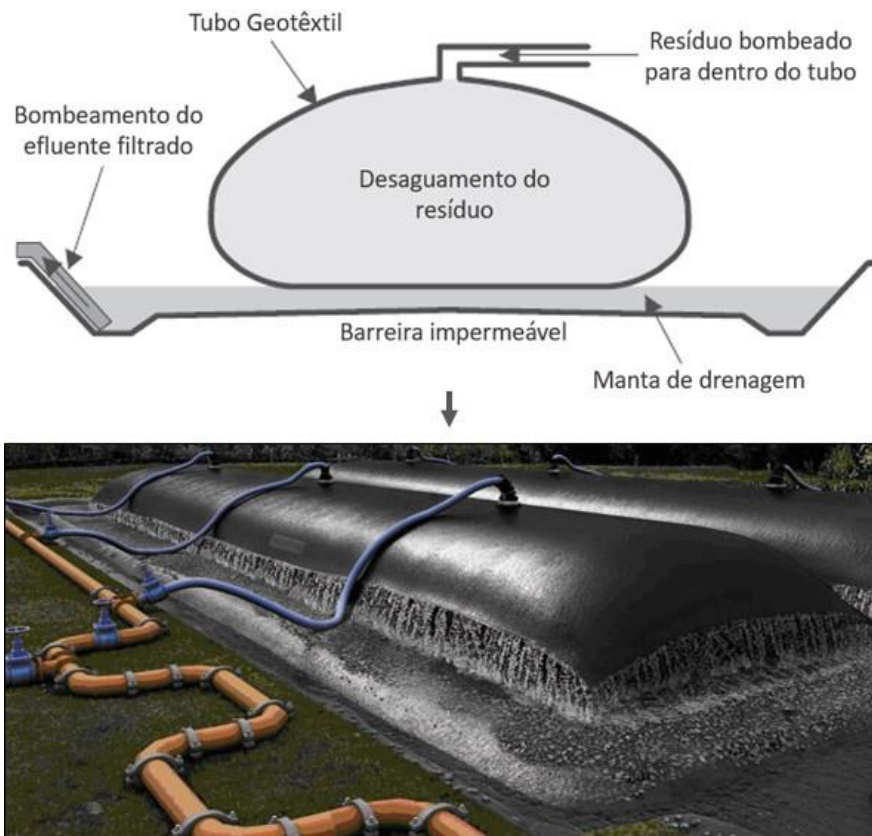
3.3.2 Fundamentos da Tecnologia

A implantação de um sistema de desaguamento com tubos geotêxteis é relativamente simples. Antes da instalação do tubo, uma plataforma de desaguamento é construída, consistindo de uma barreira impermeável (terra compactada, concreto ou revestimento de geomembrana) situada sob uma camada de drenagem (granular ou geocomposto). A

plataforma de desaguamento possui uma pequena declividade, para que o efluente drenado seja então coletado e direcionado para descarte ou reuso (ver

Figura 9).

Figura 9: Acima, esquema do funcionamento de um tubo geotêxtil. Abaixo, foto de um sistema real de desaguamento



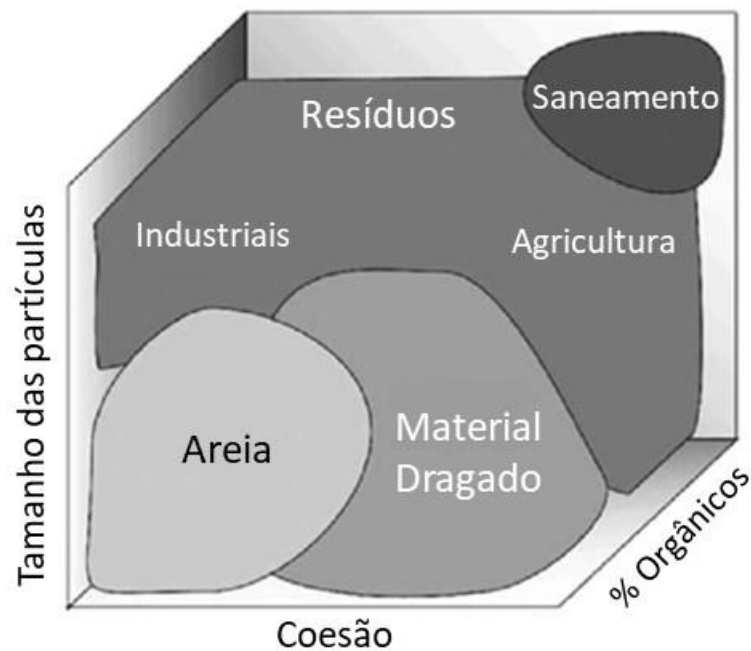
Fonte: Adaptado de Lawson (2008).

O processo de desaguamento dos resíduos envolve três fases: enchimento, desaguamento e consolidação. Durante a fase de enchimento, o resíduo é bombeado para o tubo geotêxtil, sendo que o tempo de bombeamento varia de cada projeto e situação específica. Durante o bombeamento já ocorre a etapa de desaguamento. A água livre drena através dos poros do geotêxtil, resultando em uma grande redução no volume. Os ciclos de enchimento e desaguamento antes que o processo entre na fase final de consolidação, depende da quantidade de sólidos no resíduo, e a capacidade de armazenamento do tubo geotêxtil (Koerner e Koerner, 2006). Durante a fase de consolidação, a água dos poros dentro do material contido se dissipa lentamente e o conteúdo do tubo se consolida em uma forma

adequada para descarte ou transporte. A consolidação requer geralmente entre 2 a 4 meses, dependendo do material a ser desaguado e do teor de sólidos final desejado (Lawson, 2008).

Vários tipos de resíduos, com diferentes características (teor de sólidos, umidade, tamanho de partículas, conteúdo orgânico) têm utilizado a filtração em tubos geotêxteis com sucesso. A Figura 10 apresenta graficamente materiais que vem sendo comumente desaguados em tubos geotêxteis.

Figura 10: Características de materiais desaguados em tubos geotêxteis



Fonte: Adaptado de Moo-Young e Tucker (2002)

A concentração percentual de teor de sólidos nos materiais desaguados em um tubo geotêxtil pode variar de 1%, em resíduos de estação de tratamento de esgoto, a 35% em sedimentos dragados. A concentração de sólidos, em vez do teor de umidade, é usada para descrever a relação de peso sólido-líquido em aplicações de tubos geotêxteis. Esta distinção deve-se ao fato de que o teor de umidade no resíduo poder aproximar-se de 10.000%, enquanto o teor de sólidos encontra-se na faixa de 0 a 100%, sendo, portanto, um valor mais razoável e significativo (Maurer, 2011).

Os principais critérios operacionais no desaguamento de tubos geotêxteis são: retenção de sólidos, taxa de desaguamento e colmatação. Dependendo das características específicas de cada resíduo, pode-se ter, ou a retenção de sólidos, ou a taxa de desaguamento como critério determinante. A viabilidade econômica de um projeto de desaguamento, depende da obtenção

de uma taxa de desaguamento eficiente. A retenção, portanto, pode ser parcialmente comprometida, desde que a perda de sólidos, não exceda um limite de controle ambiental (ex: turbidez) (Moo-Young *et al.* 2002). Já em outras situações, a retenção de sólidos, é o critério de projeto dominante, e a taxa de desaguamento pode ser parcialmente comprometida, desde que a pressão interna no geotêxtil não exceda os limites do material (Liao e Bhatia, 2006). Contudo, o ideal é que se tenha os dois critérios (retenção e desaguamento) maximizados, para se obter o melhor proveito da tecnologia.

Um fator muito importante durante o processo de desaguamento é a formação de uma camada interna no tubo, denominada de *filter cake*. Vários pesquisadores (Moo-Young *et al.*, 2002; Liao e Bhatia, 2005; Satyamurthy e Bhatia, 2009) reconheceram a importância deste fenômeno em tubos geotêxteis. O *filter cake* se forma durante os estágios iniciais do desaguamento, quando o tubo geotêxtil é preenchido pela primeira vez. Partículas finas ficam presas no geotêxtil nas aberturas dos poros. À medida que partículas adicionais se acumulam, uma estrutura espessa é formada e a perda de sólidos diminuem.

Grzelak *et al.* (2011) realizou testes de filtração de pressão em pequena escala, usando dois tipos de geotêxteis. Foi observado que, uma vez ocorrida a formação do *filter cake*, a taxa de desaguamento (vazão) é controlada pelas propriedades do *filter cake*, e não pelas propriedades do geotêxtil. Esses achados são consistentes com os de outros pesquisadores, que concluíram que a compreensão do processo de formação e da estrutura do *filter cake* é fundamental para melhorar o desempenho do desaguamento.

3.3.3 Critérios de avaliação de desaguamento

Não existe padronização de índices para avaliar o desempenho do desaguamento em tubos geotêxteis. Embora, os objetivos do desaguamento sejam comuns à maioria dos projetos de tubos geotêxteis, ou seja, o resíduo bombeado para o tubo deve desaguar rapidamente e, o efluente deve ter o mínimo de turbidez e estar livre de contaminantes, não há padrões comuns em termos de avaliação de desempenho. Um bom desempenho de desaguamento para um determinado fornecedor de geotêxtil, pode ser ruim para outro. Isso é especialmente evidente em estudos de casos fornecidos por consultores, que normalmente não têm medidas de desempenho pré-determinadas. Se os resultados parecerem relativamente positivos, a operação será considerada bem-sucedida (Maurer, 2011).

Contudo, em pesquisas acadêmicas, vários trabalhos propuseram índices para uso na avaliação do desempenho de desaguamento do tubo geotêxtil, sendo os mais comuns o

percentual de desaguamento (PD), a eficiência de filtração (EF) e a perda de partículas (PP) (Kutay e Aydilek, 2004; Satyamurthy e Bhatia, 2009; Moo-Young *et al.*, 2002; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006). Segue abaixo o detalhamento destes índices:

- Percentual de desaguamento (PD)

O percentual de desaguamento é uma medida da alteração relativa da umidade inicial do resíduo, com a umidade do material retido no tubo geotêxtil, após o desaguamento. O PD é usado como uma medida da capacidade de um tubo geotêxtil de drenar líquidos do material de suspensão, sendo um índice de remoção de água e não um índice de retenção. Segue abaixo o cálculo do índice:

$$PD = \frac{Um_i - Um_f}{Um_i} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

em que:

PD: Percentual de desaguamento (%);

Um_i: Umidade inicial no resíduo a ser desaguado (%);

Um_f: Umidade final do resíduo retido no geotêxtil (%);

- Eficiência de Filtração (EF)

A eficiência de filtração (EF) é um índice que mede a retenção de sólidos. É uma medida da alteração na concentração total de sólidos suspensos do efluente filtrado em relação à concentração inicial do resíduo:

$$EF = \frac{SST_i - SST_f}{SST_i} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

em que:

EF: eficiência de filtração (%);

SST_i: sólidos suspensos totais no resíduo a ser desaguado (mg/L);

SST_f: sólidos suspensos totais no efluente filtrado (mg/L);

- Perda de Partículas (PP)

O índice PP, também denominado de “perda de partículas” é uma relação entre a massa seca perdida durante o desaguamento, e a área filtrante do tubo geotêxtil. O índice PP depende das propriedades do material retido, como porosidade, viscosidade e peso específico, e das propriedades hidráulicas do geotêxtil, das condições de desaguamento e da pressão de confinamento. Este fenômeno pode ser grave quando o geotêxtil não consegue reter as partículas do material, causando a instabilidade do sistema. A perda de partículas pode ser minimizado pelo adequado condicionamento químico do material a ser desaguado. Segue abaixo cálculo do índice.

$$PP = \frac{SST_f}{A} \quad \text{Equação 3}$$

em que:

PP: Perda de partículas (g/m²);

SST_f: quantidade de sólidos suspensos totais no efluente filtrado (g);

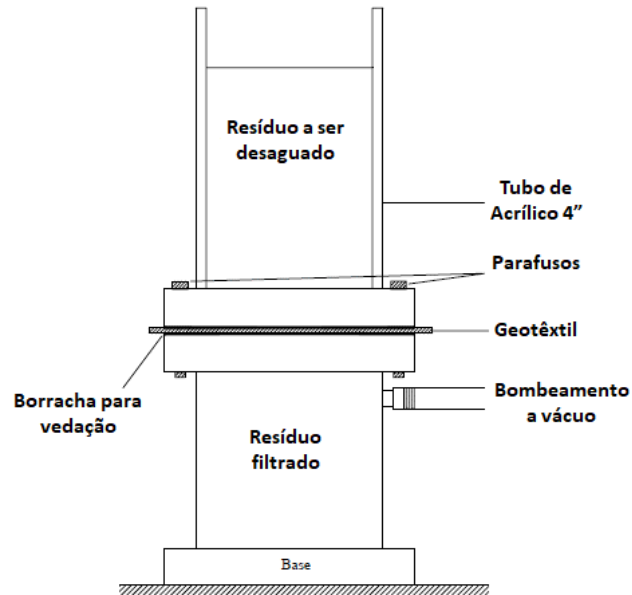
A: Área do tubo geotêxtil (m²);

3.3.4 Métodos e Testes de Desaguamento de Tubo Geotêxtil

Vários métodos de ensaios, tanto a nível de bancada como em escala piloto, têm sido utilizados pelos pesquisadores como um meio de verificar o desempenho do desaguamento em tubos geotêxteis. Estes métodos, apesar de não padronizados, são agora frequentemente usados por profissionais para avaliar a eficiência da tecnologia. Os testes laboratoriais em escala de bancada mais usados são: o teste de cone, e o teste do filtro de pressão em geotêxtil (Gaffney, 2001). Como esses testes não são padronizados, as variações geralmente existem entre cada pesquisador. A seguir detalhes de alguns tipos de testes de bancada. Moo-Young e Tucker (2002) utilizaram um filtro a vácuo para avaliar o desaguamento do geotêxtil. Eles estudaram 3 tipos de resíduos: material dragado de aterro sanitário, resíduo de uma ETE de efluentes industriais e material usado na construção de taludes. A Figura 11 mostra os detalhes do modelo de filtro usado. O teste de filtração a vácuo foi realizado através da aplicação de uma pressão de vácuo abaixo da interface geotêxtil/resíduo. O dispositivo era

composto por um tubo de acrílico (100 mm). O geotêxtil foi fixado entre dois flanges e logo abaixo era feita a sucção com a bomba a vácuo.

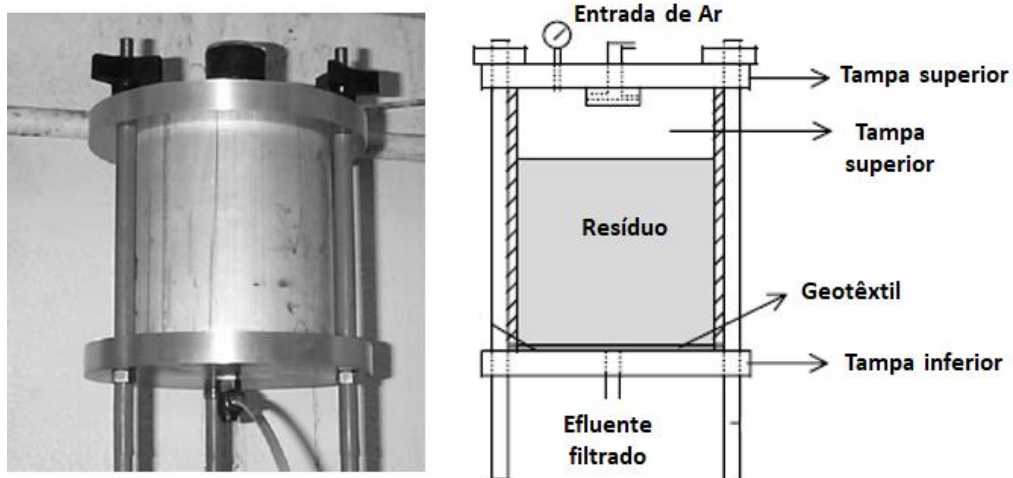
Figura 11: Modelo de teste de bancada por filtração a vácuo com geotêxtil usado por Moo-Young e Tucker (2002)



Fonte: Adaptado de Moo-Young e Tucker (2002)

Moo-Young *et al.* (2002) utilizaram um sistema diferente. Em vez da filtração a vácuo, foi testado a filtração por pressão. O filtro possuía 125 mm de diâmetro, com o geotêxtil fixado na parte inferior. A pressão aplicada de ar na parte superior variou entre 35 a 68 kpa. A Figura 12 mostra o modelo usado pelos autores.

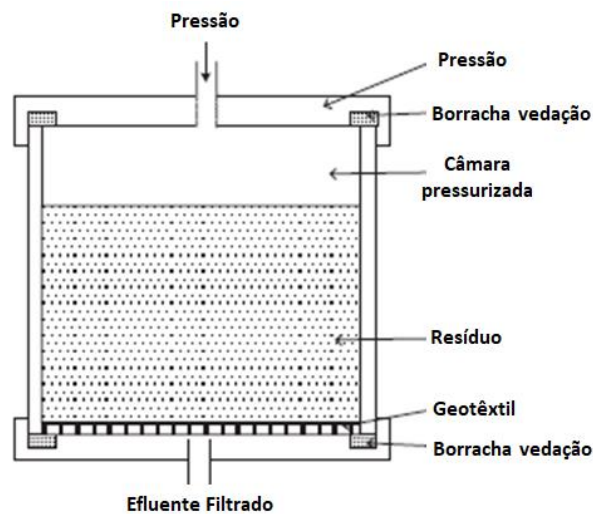
Figura 12: Modelo de teste de bancada utilizado por Moo-Young *et al.* (2002)



Fonte: Adaptado de Moo-Young et al. (2002)

Kutay e Aydilek (2004) utilizaram um sistema de bancada similar ao testado por Moo-Young *et al.* (2002), (ver a Figura 13). O filtro tinha 78 mm de diâmetro e 90 mm de altura. A principal diferença deste sistema para o apresentado anteriormente, foi a pressão aplicada na parte superior, que nesse caso foi mais baixa, 27 kpa.

Figura 13: Filtro pressurizado em tubo geotêxtil usado por Kutay e Aydilek (2004)

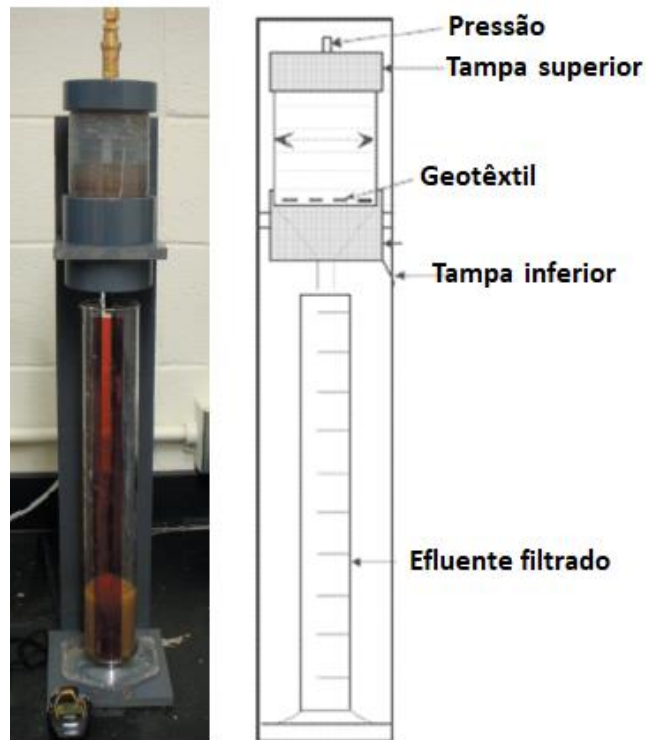


Fonte: Adaptado de Kutay e Aydilek (2004)

O modelo de filtro pressurizado proposto por Satyamurthy e Bhatia (2009), vem sendo o protótipo mais replicado em pesquisas de desaguamento com tubos geotêxteis. A Figura 14 apresenta os detalhes do modelo do filtro.

O teste de filtração sob pressão possui três partes: uma placa inferior, uma câmara central e uma placa superior. O diâmetro interno da câmara de teste é de 72 mm e a altura é de 17 cm. A amostra de geotêxtil a ser testada é colocada na placa inferior e a câmara do meio é fixada usando conectores de rosca sobre a placa inferior. Na parte superior é inserido o ar comprimido por uma mangueira. Os valores de pressão adotados variaram entre 10 kpa a 30 kpa.

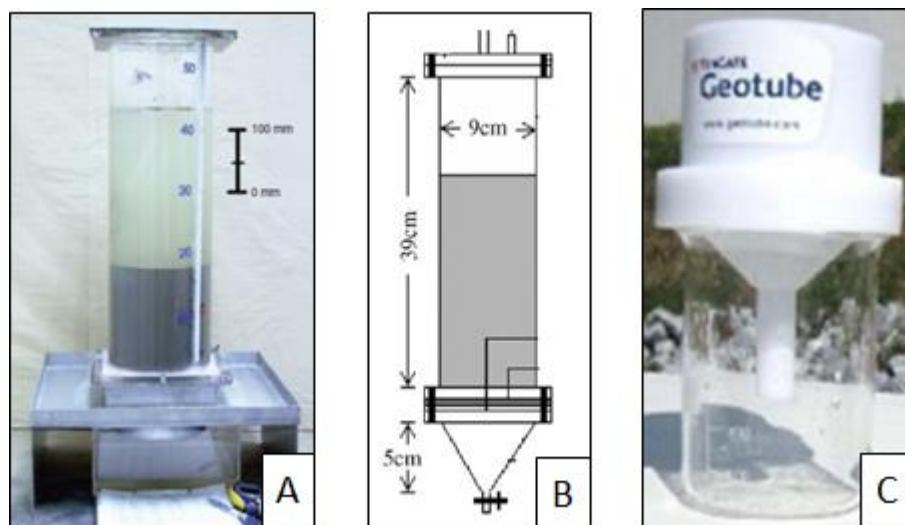
Figura 14: Modelo de filtro pressurizado proposto por Satyamurthy e Bhatia (2009)



Fonte: Satyamurthy e Bhatia (2009)

Já os trabalhos realizados por Muthukumaran e Ilamparuthi (2006), Huang e Luo (2007) e Lawson (2008) utilizaram sistemas de filtro de bancada por gravidade em geotêxtil. Os protótipos dos autores são apresentados na Figura 15.

Figura 15: Modelo de testes de filtro de geotêxtil por gravidade



Fonte: Muthukumaran e Ilamparuthi (2006) (A), Huang e Luo (2007) (B) e Lawson (2008) (C)

Além dos testes de bancada, existem testes de média escala. Dentre estes destaca-se o *hanging bag test* (HBT) ou teste de bolsa suspensa, e o *geotextile tube dewatering test* (GDT), ou teste de bolsa de pequena dimensão. Estes testes são mais representativos do desaguamento em geotêxtil em larga escala, mas consomem tempo e exigem grandes quantidades de material geotêxtil e resíduo (Koerner e Koerner, 2006). O HBT usa um saco geotêxtil padrão (40 cm de largura e 150 cm de comprimento) pendurado em uma estrutura simples. O GDT é um teste recente, que foi desenvolvido na tentativa de simular adequadamente o desaguamento efetivo do tubo geotêxtil. O GDT utiliza uma bolsa em forma de almofada que se assemelha à forma de um tubo de escala completa e permite o desaguamento em todas as direções. Koerner e Koerner (2010) relatam a vantagem do GDT em relação ao HBT, por seu menor tamanho (de quantidade menor de material de preenchimento), geometria mais representativa e capacidade de monitorar o comportamento hidráulico do sistema.

Testes em escala real às vezes são realizados na prática antes de grandes projetos de desaguamento. Pesquisas usando testes em escala real, no entanto, são limitadas. Exemplos de testes HBT e GDT são mostrados na Figura 16.

Figura 16: A esquerda teste de bolsa suspensa (HBT). A direita teste de bolsa de pequena dimensão (GDT)



Fonte: Maurer (2011).

Como foi mostrado, existe uma grande variedade de métodos para avaliar o desaguamento de tubos geotêxteis. Para avaliar as diferenças entre os métodos existentes, Grzelak *et al.* (2011) compararam os testes comuns em escala de bancada, e em escala média, usando geotêxteis não-plásticos desaguando material dragado. Os resultados mostraram que: (1) Os testes de bancada por gravidade, são muito pobres, e seu desempenho é ruim, devido à falta de pressão aplicada; (2) O teste de bancada pressurizado, se equiparou aos ensaios de média escala (HBT e GDT), quando se compara os resultados de eficiência de desaguamento e eficiência de filtração. Os autores concluíram que, devido à sua simplicidade, facilidade de uso e custo, o teste pressurizado de bancada, é uma alternativa aos testes GDT e ao HBT.

3.3.5 Uso de condicionantes químicos

Com o objetivo de se maximizar a retenção de sólidos finos/contaminantes, e ao mesmo tempo aumentar as taxas de desaguamento, levou-se a utilização de polímeros no processo de desaguamento por tubos geotêxteis. Polímeros sintéticos, catiônicos ou aniônicos derivados da poliácridamida são usados como condicionantes químicos em aplicações de tubos geotêxteis. Esses condicionantes atuam como floculantes, ligando sedimentos finos através dos mecanismos de neutralização de carga e de pontes (Maurer, 2011). O resíduo com condicionamento químico produz taxas de desaguamento mais rápidas e melhor retenção de sólidos.

Worley *et al.* (2008) desaguaram resíduos de indústria de laticínios usando tubos geotêxteis com e sem polímero, e relataram que o condicionamento químico melhorou a taxa de remoção de fósforo de 79% para 99%. Satyamurthy e Bhatia (2009) estudaram o efeito de um polímero aniônico nas características de desaguamento de sedimentos finos usando o filtro pressurizado de bancada. O uso de condicionador químico limitou a perda de sólidos, e reduziu o tempo de desaguamento em até 85%. Koerner e Koerner (2010) desaguaram argila siltosa usando o GDT de médio porte e um polímero catiônico. Com a dosagem otimizada, o polímero reduziu o tempo de desaguamento de 120 minutos para 40 minutos.

3.4 DESAGUAMENTO DE RETA EM TUBO GEOTÊXTIL

Apesar da grande expansão do desaguamento de RETAs em tubos geotêxteis, ocorrido principalmente no Brasil na última década, existem poucos trabalhos na literatura que

pesquisaram mais detalhadamente critérios de projeto e operação. Para o desaguamento dos RETAs, foram replicados critérios dos primeiros sistemas que já utilizavam a tecnologia, como o desaguamento de resíduos de mineração e dragagem de áreas contaminadas.

Dentre os principais critérios e parâmetros que merecem atenção nas pesquisas sobre os RETAs, temos: o valor mínimo de teor de sólidos que o resíduo deve ter para ser desaguado, e como estimar o teor de sólidos ao final do desaguamento/secagem do material. Os RETAs possuem características específicas, devido principalmente a grande variabilidade da qualidade da água bruta e mudanças nos tipos e quantidade de produtos químicos. Por isso, sem critérios bem definidos na literatura existe muita dificuldade para os projetistas em dimensionar e otimizar sistemas de desaguamento de geotêxtil para estes resíduos. A seguir são apresentados alguns trabalhos na literatura sobre o uso de tubos geotêxteis com resíduos gerados no tratamento de água.

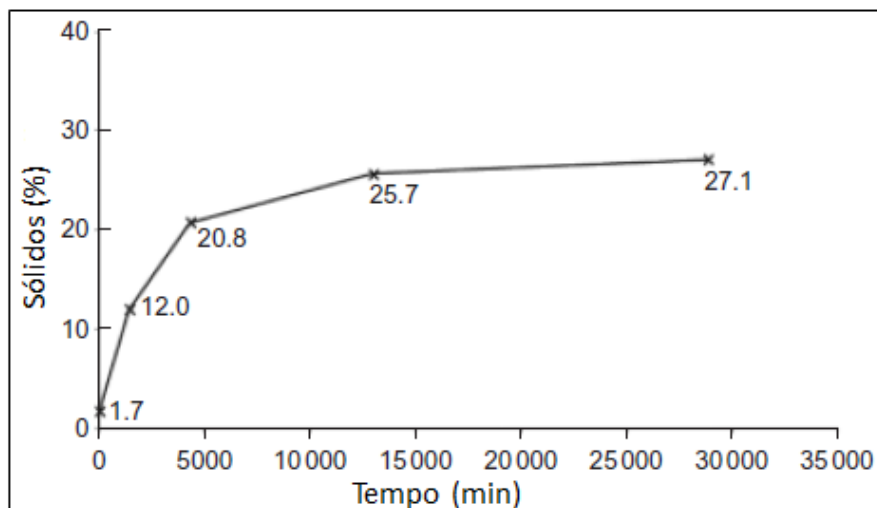
Pieper (2008) estudou o desaguamento do resíduo de decantador de uma ETA de ciclo completo em Gravataí-RS. O trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira com ensaios de BAG suspenso (HBT) para a definição da dosagem do condicionante químico. A segunda etapa foi realizada com um tubo geotêxtil em escala piloto de aproximadamente 20m³ de capacidade. Foram feitos ensaios de batelada para o enchimento do tubo, com a dosagem e tipo de polímero definidos nos ensaios HBT. O percentual de teor de sólidos do resíduo bombeado variou entre 0,10% a 6%, tendo uma média de 1,0 %. O autor relata que não foi possível manter o teor de sólidos homogêneo durante todo o trabalho, fato que pode ter interferido nos resultados do experimento. O trabalho apresenta resultados de teor de sólidos no resíduo desaguamento somente para os ensaios de HBT. Para estes ensaios obteve-se teores de sólidos de 29%. Os dados na unidade piloto de tubo geotêxtil não foram detalhados, onde o autor apresentou somente os valores de volume e vazão do resíduo bombeando. No trabalho não foi investigado a curva de secagem do resíduo, após a enchimento e encerramento do tubo geotêxtil.

Guaaes (2009) estudou o desaguamento de RETA em uma unidade piloto pressurizada em bolsa de pequena dimensão (GDT), com capacidade de 29 L. O resíduo era proveniente de decantadores de uma ETA de ciclo completo, com teor de sólidos de 1,9%. Durante os ensaios na unidade piloto, a pressão na entrada do tubo geotêxtil foi mantida em 20 kpa. A definição do tipo e dosagem de polímero foi feita em ensaios de teste de bancada por gravidade. A eficiência de filtração (EF) durante os ensaios, se manteve entre 95,10% e 99,30%, reduzindo substancialmente os sólidos totais no efluente filtrado. A turbidez média resultou em um patamar relativamente baixo, inferior a 40 UNT. Verificou-se decréscimo

acentuado da vazão em relação ao tempo, devido à formação do *filter cake*, que diminuiu a permeabilidade da manta de geotêxtil. O teor de sólidos no resíduo desaguado obteve valores abaixo de 10%.

Guimaraes *et al.* (2014), utilizando a mesma configuração da unidade piloto de Guanaes (2008), verificaram o desaguamento de resíduo de decantador de uma ETA de ciclo completo, com 1,3% de teor de sólidos. A pressão de entrada do resíduo bombeado foi mantida em 15 kPa. A grande contribuição deste trabalho para a pesquisa de tubos geotêxteis, foi a realização de uma curva de secagem para o teor de sólidos no resíduo desaguado. A Figura 17 apresenta a variação do teor de sólidos ao longo do tempo encontrado pelos pesquisadores. Nota-se que os valores ficaram constantes a partir de 15.000 min (10 dias) após o encerramento do ensaio, até atingir o valor de 27,1% após 20 dias. Deve-se ponderar que os ensaios foram feitos em bolsa de pequena dimensão (com 15 cm de altura), portanto em escala real, esses valores devem sofrer alterações, pois a altura final de um tubo geotêxtil pode chegar a 2,0 m.

Figura 17: Curva de secagem de RETA no tubo geotêxtil



Fonte: Guimaraes *et al.* (2014)

Ferreira e Vianna (2013) estudaram em escala de bancada por meio de testes de gravidade, o desaguamento de RETAs. O diferencial deste trabalho foi a análise separada do desaguamento da água de lavagem de filtros (ALF), com a descarga dos decantadores. Os dois resíduos possuem teor de sólidos muito diferentes, tendo a ALF valores bem baixos (0,02% - 0,035%) e as descargas de decantadores teores mais elevados (1,0% a 4,0%). A principal

conclusão do trabalho foi que a água de lavagem de filtros não deve ser encaminhada diretamente aos tubos geotêxteis, em virtude de seu baixo teor de sólidos; é recomendável decantá-la, eventualmente após receber a aplicação de um condicionante químico; somente o resíduo resultante desse processo deverá ser encaminhado ao geotêxtil. O resíduo retido no geotêxtil, proveniente da descarga do decantador, apresentou teor de sólidos satisfatório (29,65%), sem adição de polímeros. Como a pesquisa utilizou o método de ensaio de bancada por gravidade, os dados não podem ser extrapolados para a escala real. A literatura relata que este método é indicado apenas para a definição do tipo e dosagem de condicionantes químicos, pois não tem a inserção da pressão interna no geotêxtil.

3.5 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS

O Planejamento de experimentos (*Design of Experiments*, DOE) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. É, portanto, uma técnica de extrema importância para a pesquisa pois seu emprego permite resultados mais confiáveis economizando dinheiro e tempo. A sua aplicação no desenvolvimento de novos produtos é muito importante, onde uma maior qualidade dos resultados dos testes pode levar a um projeto com desempenho superior seja em termos de suas características funcionais como também sua robustez.

Dentro do planejamento de experimentos, o método RSM (*Response Surface Methodology*) metodologia de superfície de resposta, consiste em uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para desenvolvimento, melhora e otimização de processos.

No planejamento de experimentos, existem vários tipos de delineamentos fatoriais que podem ser aplicados. O tipo de planejamento depende principalmente do número de fatores (variáveis) a serem estudados, que são denominadas variáveis independentes. Experimentos fatoriais são aqueles que envolvem combinações entre níveis de dois ou mais fatores. Por exemplo, suponha um experimento para estudar a eficiência de um coagulante na remoção de matéria orgânica, tendo 3 fatores estudados: a dosagem do coagulante (fator A) com dois níveis (5 e 20 mg/L), o pH de coagulação (fator B) com dois níveis (6 e 8) e o tempo de mistura rápida (fator C) também com dois níveis (15 e 60 segundos). Diz-se então que o planejamento é um fatorial completo de 2^3 , com 3 variáveis independentes em 2 níveis, totalizando 8 combinações (ensaios).

Se todas as combinações possíveis, entre todos os níveis de cada fator, estão presentes, o esquema é dito fatorial completo. Quando a quantidade de fatores e níveis aumenta, a quantidade de ensaios cresce de forma exponencial, inviabilizando a utilização de esquemas completos para 4 ou mais fatores com 3 níveis.

Segundo Rodrigues e Iemma (2014), quando se quer estudar de 2 ou 3 variáveis independentes, os planejamentos mais indicados são o delineamento do composto central (DCC) e suas variantes, o delineamento do composto central rotacional (DCCR) e o delineamento de face centrada (DFC).

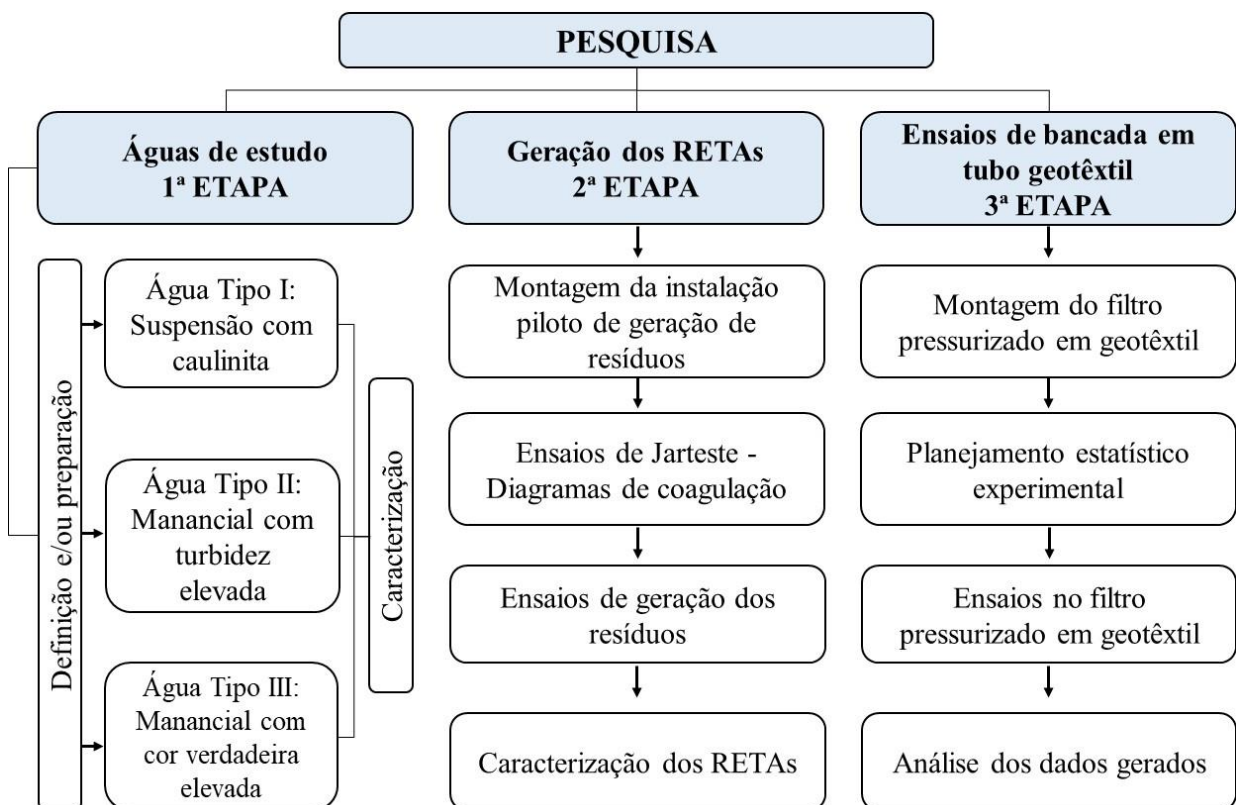
Assim, a utilização de planejamento experimentais em projetos de pesquisas, se torna de fundamental importância, pois além do ganho de tempo com a diminuição dos ensaios realizados, tem-se que a validação dos resultados por meio dos testes estatísticos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os detalhes do trabalho experimental. Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 18 a pesquisa foi dividida em 3 etapas. A primeira etapa consistiu na definição das diferentes águas brutas de estudo e posterior caracterização físico-química. Na segunda etapa efetuou-se a geração de RETAs em escala piloto para cada tipo de água bruta definido na etapa anterior. Na terceira etapa foram realizados os ensaios de bancada de desaguamento em tubo geotêxtil para os resíduos gerados.

No item a seguir, são mostrados os equipamentos, produtos químicos e materiais utilizados na pesquisa. Nos itens subsequentes são descritas as etapas da pesquisa, com o planejamento e análise estatística experimental para ensaios.

Figura 18: Fluxograma com as etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2019)

4.1 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS ANÁLICOS UTILIZADOS

4.1.1 Materiais e Produtos Químicos

Neste item são apresentados a relação dos materiais usados durante as diferentes etapas da pesquisa. Nas tabelas 3 a 7 são apresentadas as características dos materiais e produtos químicos utilizados.

- Caulinita para elevação da turbidez na água de estudo tipo I

Tabela 3: Características da caulinita

Propriedades	Resultados
Nome comercial	Caulim micronizado
Aspecto	Pó fino
Cor	Branca
Massa Específica do grão (g/cm ³)	2,60 + 0,05
Massa Específica Aparente solta (g/cm ³)	0,47 + 0,02
Massa Específica Aparente compactada (g/cm ³)	0,57 + 0,02
Umidade (% máxima)	< 0,2
pH	6,5 a 8,5

Fonte: adaptada de CIA COMERCIAL PROMINÉRIOS (2016)

- Resina XAD-8 para extração de substâncias húmicas aquáticas na água de estudo tipo III

Tabela 4: Características da resina macroporosa XAD-8

Propriedades	Resultados
Origem	éster acrílico
Tamanho das partículas	40-60 mesh
Tamanho dos poros	0,79 mL/g
Área superficial	140 m ² /g
Densidade	1,09 g/mL

Fonte: adaptada de Sigma Aldrich (2016)

- Sulfato de alumínio para a coagulação na geração dos resíduos do tratamento de água

Tabela 5: Características do sulfato de alumínio

Propriedades	Resultados
Estado físico	líquido
Cor	incolor
Composição	7,4% de Al ₂ O ₃
pH	3,5 (solução a 1%)
Densidade	1,31 a 1,33 g/cm ³

Fonte: adaptada de Balminas (2018)

- Geotêxtil usado nos ensaios de bancada em tubo geotêxtil

Tabela 6: Características do geotêxtil

Propriedades	Resultados
Matéria-prima	Polipropileno
Massa por unidade de área	445 g/m ²
Resistência a tração nominal	≥ 105 kN/m
Deformação na Resistência Nominal	≤ 9%
Permeabilidade	25.10 ⁻³ m/s
Tamanho da abertura	200 μm

Fonte: adaptada de Huesker (2018)

- Polímeros sintéticos como condicionantes químicos nos ensaios de bancada em tubo geotêxtil

Tabela 7: Características dos polímeros

Produto Químico	Estado físico
Polímero Sintético Catiônico	Sólido granulado
Polímero Sintético Aniônico	Sólido granulado
Polímero Sintético Não Aniônico	Sólido granulado

Fonte: adaptada de SNF Floeger (2018)

4.1.2 Equipamentos e Métodos Analíticos

A Tabela 8 apresenta os principais equipamentos utilizados durante as diferentes etapas da pesquisa. E a Tabela 9 mostra os parâmetros físico-químicos analisados, bem como os métodos analíticos empregados.

As análises foram realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP em Ribeirão Preto – SP, com exceção dos parâmetros: distribuição de tamanho de partículas, morfologia das partículas e análise qualitativa da fração sólida, que foram feitas no Laboratório de Caracterização de Tecnológica (LCT) na USP em São Paulo - SP. As metodologias para as análises realizadas encontram-se descritas em APHA (2012).

Tabela 8: Equipamentos utilizados na pesquisa

Equipamentos	Função
Jarteste, Nova Ética – modelo LDB 6	Ensaio de coagulação e floculação e sedimentação
Analisador de Carbono Orgânico Total TOC-L – marca SHIMADZU	Análise de carbono orgânico total e dissolvido
Balança eletrônica BL 210 S – marca Sartorius	Pesagem de produtos químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição do tempo
Espectrofotômetro de leitura direta, modelos DR/2000, DR/2500 – marca Hach	Leitura de cor aparente Leitura de cor verdadeira
Espectrofotômetro de absorção atômica, modelo AA – Analyst 700 – marca Perkin Elmer	Análises de metais
Espectrofotômetro Cary 1E UV – marca Varian	Leitura de absorbância a 254 nm
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100P – marca Hach	Leitura da turbidez
Master sizer 2000 - Malvern	Distribuição e tamanho de partículas
Microscópio eletrônico de varredura - Quanta 650 FEG	Morfologia das partículas e Avaliação qualitativa da fração sólida

Fonte: Autor (2019)

Tabela 9: Parâmetros, métodos e limites de detecção utilizados na pesquisa

Parâmetro	Unidades	Método	Limite de detecção
Alumínio	mg/L Al	EAA-Forno de grafite	0,001
Alcalinidade	mg/L	Titulométrico	0,1
Absorbância a 254 nm	-	Espectrofotométrico	0,00001
Carbono orgânico total	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC	0,1
Carbono orgânico dissolvido	mg/L C	Espectrofotométrico infravermelho não dispersivo – NPOC	0,1
Ferro	mg/L Fe	EAA - Chama	0,01
Manganês	mg/L Ma	EAA - Chama	0,001
pH	Adimensional	Potenciométrico	0,01
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Turbidez	uT	Nefelométrico	0,1
Umidade	%	Gravimétrico	1
Distribuição e tamanho de partículas	mm	Espalhamento de partículas	0,002
Morfologia das partículas	µm	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	10
Análise qualitativa da fração sólida	-	EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X	-

Fonte: Autor (2019)

4.2 ÁGUAS DE ESTUDO – 1ª ETAPA

Como o principal objetivo da pesquisa foi avaliar a influência das características da água bruta no desaguamento dos resíduos gerados no tratamento de ETA, a etapa para definição dos tipos de água a serem estudadas foi de suma importância para o trabalho. Na escolha das águas de estudo, buscou-se abranger características encontradas nos principais mananciais utilizados para captação em ETA's. De acordo com Di Bernardo (2003), em cursos d'água correntes com maior turbulência, a turbidez predominante é devida principalmente a partículas em suspensão e em estado coloidal, sendo as mais comumente encontradas: caulinita, bentonita, illita e muscovita. Já em ambientes lânticos (lagos e represas), a maior parte da turbidez é devida à matéria coloidal ou a partículas extremamente pequenas.

Assim, foram definidos três tipos de água bruta a serem utilizadas na pesquisa: Água tipo I – preparada com suspensão de argila (caulinita); Água tipo II - água de manancial corrente com alta turbidez e Água tipo III - água de manancial lântico (represa artificial) com altas concentrações de matéria orgânica natural (MON).

4.2.1 Água Tipo I - Suspensão com Caulinita

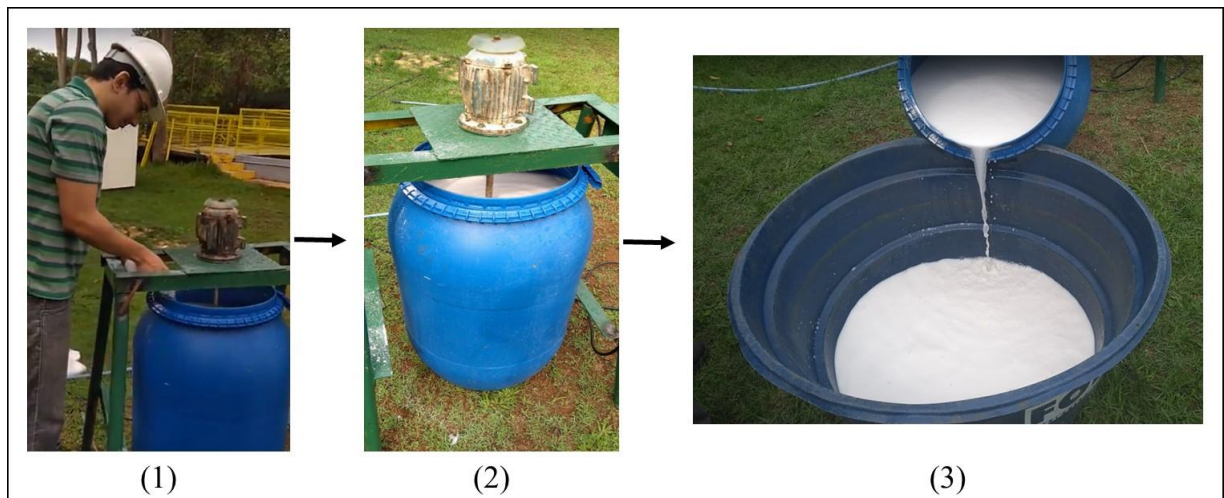
A caulinita foi escolhida para preparação de um tipo de água bruta, pois é uma das principais argilas presentes em águas superficiais. Vários trabalhos encontrados na literatura utilizaram a caulinita para simular águas bruta tratadas em ETA's (Gill e Herrington, 1989; Jones *et al.*, 1999; Dantas, 2004; Nasser e James, 2006; Pritchard *et al.*, 2010). Para preparação desta água de estudo (AE), foi adquirido o produto comercial da argila caulinita, cuja características podem ser vistas no item 4.1 deste capítulo.

Os procedimentos para se obter a água bruta com suspensão de caulinita seguiu o adotado por Dantas (2004). A seguir são apresentados os passos da preparação. A Figura 19 mostra a sequência de realização do preparo.

- ✓ 1 - Adicionou-se 4,3 Kg de caulinita em 200 litros de água filtrada sem cloro, obtendo uma concentração de 21,5 g/L. A água filtrada foi coletada dos filtros rápidos descendentes da ETA 6 na cidade de Palmas-TO;
- ✓ 2 - Em seguida, a solução de 200 litros de caulinita passou por agitação mecânica por cerca de 2 h.

- ✓ 3 – Após agitação, a suspensão ficou em repouso por 10 h. O sobrenadante foi então coletado e armazenado, e denominado de “solução mãe” de caulinita.
- ✓ 4 – A água de estudo tipo I foi preparada com a diluição da “solução mãe” com a água filtrada da ETA, até se obter uma turbidez em torno de 500 uT.

Figura 19: Preparação da água tipo I



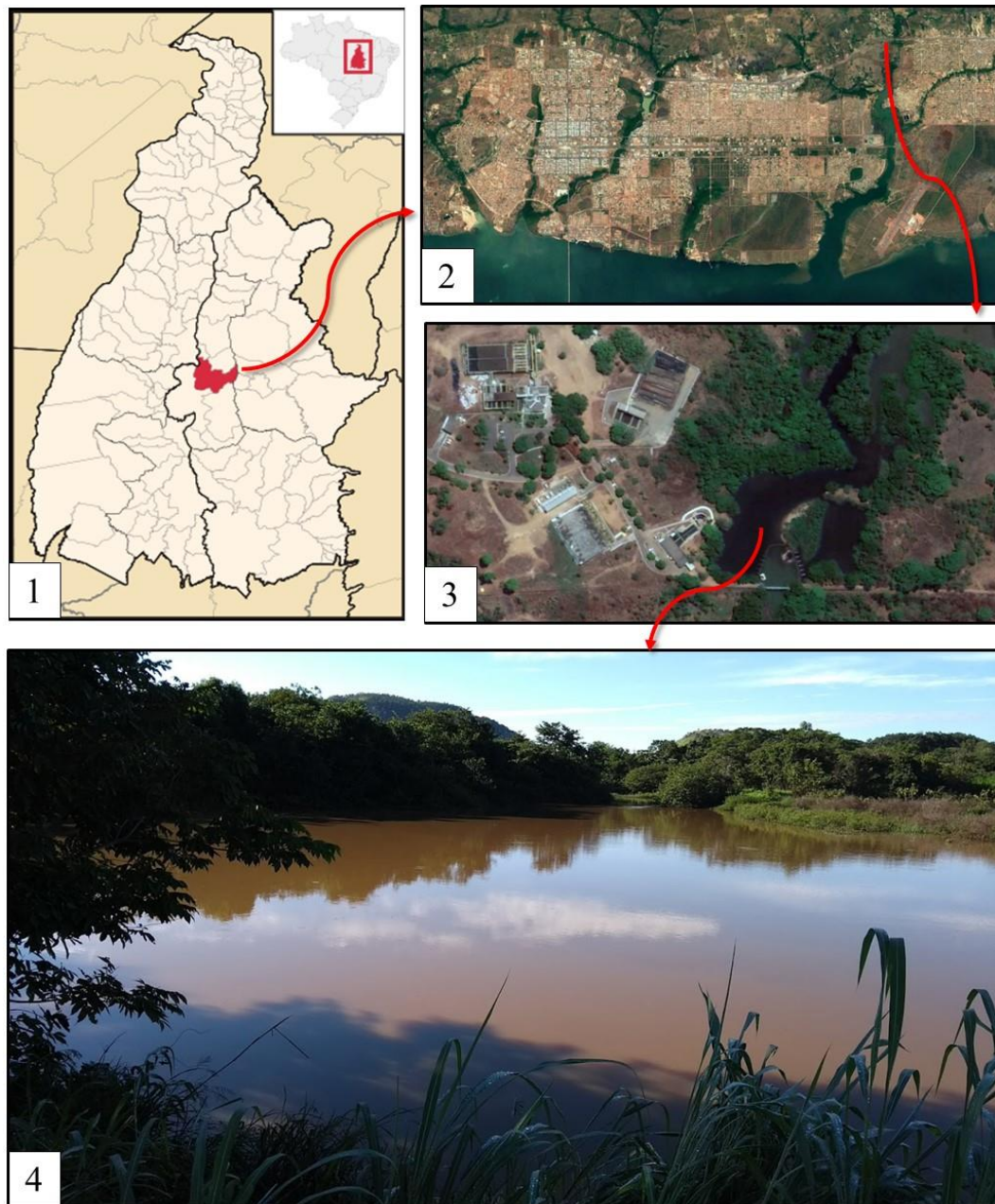
Fonte: Autor (2019)

4.2.2 Água Tipo II – Manancial Superficial com Turbidez Elevada

A água de estudo tipo II teve como objetivo representar um típico manancial de água corrente com altos valores de sólidos em suspensão, e conseqüentemente turbidez elevada. Assim foi escolhido o Ribeirão Taquarussu, principal fonte de abastecimento de água para a cidade de Palmas-TO. A Figura 20 mostra a localização geográfica do referido manancial.

Devido a sazonalidade bem definida no estado Tocantins, tendo o período chuvoso entre os meses de outubro a maio, e o período seco de junho a setembro, o ribeirão Taquarussu apresenta grande variação dos valores de turbidez ao longo do ano. A turbidez no período seco chega a valores abaixo de 15 uT, enquanto no período chuvoso pode atingir valores acima de 500 uT, dependendo da intensidade e quantidade da precipitação. Assim, tanto a caracterização físico-química quanto os ensaios para geração do RETA, foram feitos no período chuvoso.

Figura 20: Localização do manancial utilizado como a água tipo II



1 – Mapa do estado do Tocantins com localização de Palmas; 2 – Imagem aérea da área urbana de Palmas; 3 – Vista da ETA 6; 4 – Local de coleta no manancial Taquarussu.

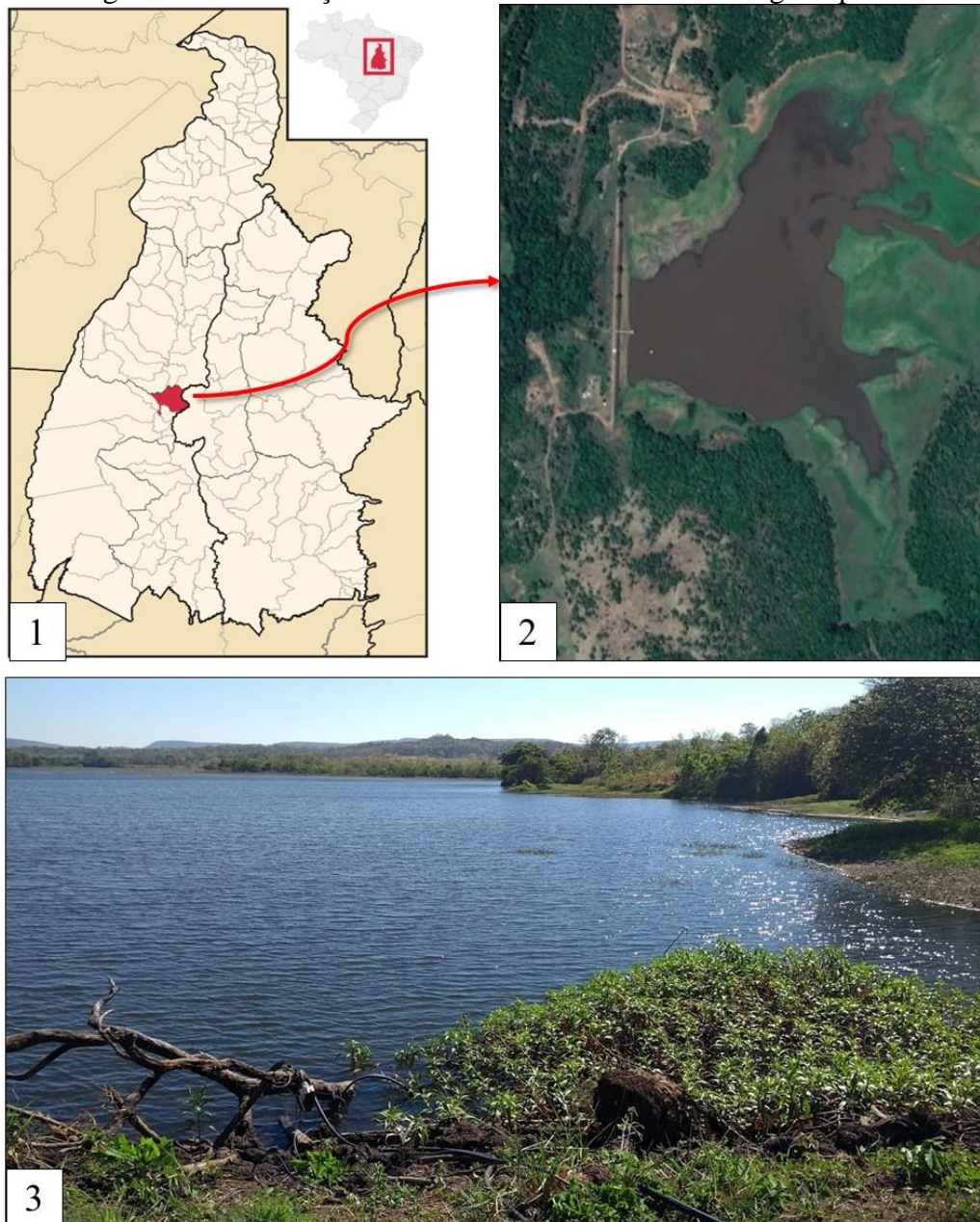
Fonte: Autor (2019)

4.2.3 Água Tipo III – Manancial com MON

Para a água tipo III buscou-se um manancial com características bem diferentes das demais águas de estudo. O manancial deveria possuir altos teores de cor verdadeira e COT, devido principalmente à presença de matéria orgânica natural (MON). Foi selecionada a

represa que fornece água para abastecimento da cidade de Paraíso do Tocantins (Figura 21). A represa foi formada há cerca de 20 anos, por meio de uma barragem de acumulação do Córrego do Coco. De acordo com o histórico de monitoramento da concessionária de água da cidade, a água da represa sempre apresentou baixos valores de turbidez e cor verdadeira elevada, necessitando inclusive da aplicação de carvão ativado pulverizado no tratamento da água.

Figura 21: Localização do manancial utilizado como a água tipo III



1 – Mapa do estado do Tocantins com localização de Paraíso; 2 – Imagem aérea da represa do córrego do Coco; 3 – Local de coleta no manancial.

Fonte: Autor (2019)

4.2.4 Caracterização das águas de estudo

Para cada água de estudo foi feita uma caracterização físico-química com os seguintes parâmetros: pH, cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, carbono orgânico total e carbono orgânico dissolvido. Para uma melhor amostragem, as análises foram feitas em triplicata. Os equipamentos e métodos utilizados nas análises constam nas Tabelas 8 e 9 do item 4.1.

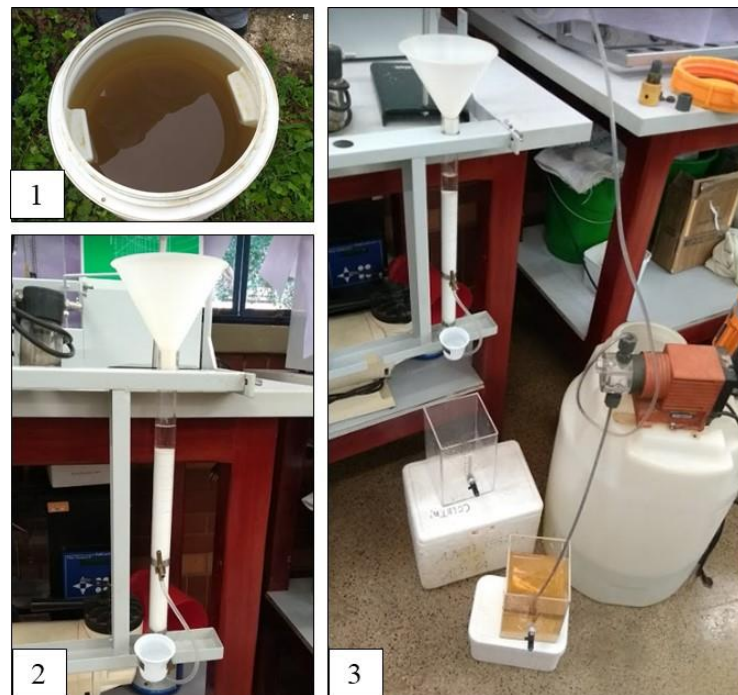
Para a água de estudo tipo III, além das análises físico químicas, foi efetuada também a extração e quantificação das substâncias húmicas aquáticas (SHA), referente a parte hidrofóbica ácida (ácidos húmicos e fúlvicos). Este procedimento visou atestar que a maior parcela do material orgânico existente na água de estudo tipo III, fosse de origem natural. Os procedimentos de coleta e armazenamento das amostras, bem como a extração das SHA foram feitas de acordo com as recomendações da *International Humic Substances Society* descritas em Sloboda (2007).

Coletou-se aproximadamente 100 litros de água na represa do Coko em Paraíso-TO. Após a coleta, acidificou-se a água com ácido clorídrico a pH 2,0, com o propósito de impedir a precipitação de hidróxidos metálicos. A extração das substâncias húmicas foi realizada através do método de adsorção em resina macroporosa XAD-8, desenvolvido por Thurman e Malcolm (1981). O procedimento compreende as etapas de adsorção e eluição. A resina foi mantida sob agitação mecânica em metanol durante 24 h, para que fossem eliminados possíveis grupos hidrofílicos retidos, e em seguida lavada várias vezes com água deionizada (Thurman e Malcolm, 1981).

Foi montado um sistema para a extração de substâncias húmicas aquáticas por adsorção em coluna com fluxo descendente por gravidade com a resina XAD 8. A resina foi adicionada em uma coluna de tubo acrílico, formando um leito trocador de 25 mm de diâmetro e 30 cm de altura. A água bruta era bombeada para a coluna com fluxo descendente por gravidade, com vazão de 22 mL/min. A instalação usada para extração das SHA é mostrada na Figura 22.

O líquido efluente do leito da XAD-8 foi monitorado por leituras de absorvância a 254 nm com o objetivo de estimar a saturação da resina. Quando o valor da absorvância do efluente apresentou aproximadamente metade do valor da absorvância da amostra de água coletada, a extração era interrompida. Após a saturação da resina, era feita a eluição com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ (pH=13), com vazão de 5,0 mL/min. O eluato era recolhido na base da coluna e armazenado em frasco de polietileno e mantido sob refrigeração a 4 °C.

Figura 22: Instalação de extração de SHA



1 – AE tipo III coletada; 2 – Leito trocador da membrana XAD-8; 3 – Vista da instalação de extração de SHA.
Fonte: Autor (2019)

Por fim era feita a medição de carbono orgânico total (COT) da água bruta e do líquido retido na XAD-8. A estimativa da porcentagem das SHA presentes na água de estudo tipo III, foi feito por meio de balanço de massa (volume vezes a concentração de COT). Fez-se a relação entre a massa de COT da água bruta percolada na resina XAD, e a massa de COT retida na resina.

4.3 GERAÇÃO DOS RESÍDUOS – 2ª ETAPA

Assim como a escolha do tipo da água bruta influencia as características finais dos RETA, as condições sob as quais os resíduos são gerados também interferem nestas características. Uma ETA operando em escala real possui inúmeras variáveis na produção dos resíduos do tratamento. Vários tipos de produtos químicos podem ser utilizados nas etapas tratamento. Com isso, a produção dos resíduos, tanto em pesquisas a nível de bancada como a nível piloto, deve seguir condições padrões pré-estabelecidas, para haver uma rota comparável, e atingir os objetivos principais da pesquisa. A partir dos três tipos águas de estudo definidas na etapa anterior, foram gerados resíduos do tratamento de água por meio de

uma instalação piloto de geração de resíduos (IPGR), que simulou as condições operacionais existentes em uma ETA de ciclo completo. O procedimento de geração dos resíduos foi adaptado dos trabalhos realizados por Verrelli (2010) e Silva (2017).

4.3.1 Montagem da Instalação Piloto de Geração de Resíduos

A IPGR foi concebida para operar em batelada. Na mesma unidade, ocorriam as etapas de mistura rápida, floculação e decantação. A Tabela 10 mostra os detalhes e dimensões da unidade. O dimensionamento da IPGR seguiu os critérios de projeto para unidades mecanizadas de mistura rápida e floculação recomendadas por Di Bernardo e Dantas (2005). O tanque era provido com um agitador tipo turbina, com inversor de frequência para promover alterações no gradiente de velocidade (Figura 23). Segue os critérios do dimensionamento da IPGR:

Parâmetros do dimensionamento:

- ✓ Tempo de mistura rápida: 30 segundos
- ✓ Gradiente de mistura rápida: 200 s^{-1}
- ✓ Tempo de Floculação: 25 minutos
- ✓ Gradiente de floculação: máximo = 60 s^{-1} mínimo: 25 s^{-1}

Dimensionamento:

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2 \quad \text{Equação 4}$$

em que:

P: potência útil (N.m/s);

μ : viscosidade absoluta ($1,005 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ para 20°C);

V: volume útil da câmara de floculação (m^3); e

G: gradiente de velocidade (s^{-1}).

$$N = \frac{P \cdot 60}{(\rho \cdot K_{Tb} \cdot D^5)^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Equação 5}$$

N: número de rotações (rpm); P: potência útil (N.m/s); ρ : massa específica da água ($998,2 \text{ kg/m}^3$ para 20°C); K_{Tb} : coeficiente do tipo de rotor e da inclinação das paletas (1,2 para turbina com paletas inclinadas a 32°);

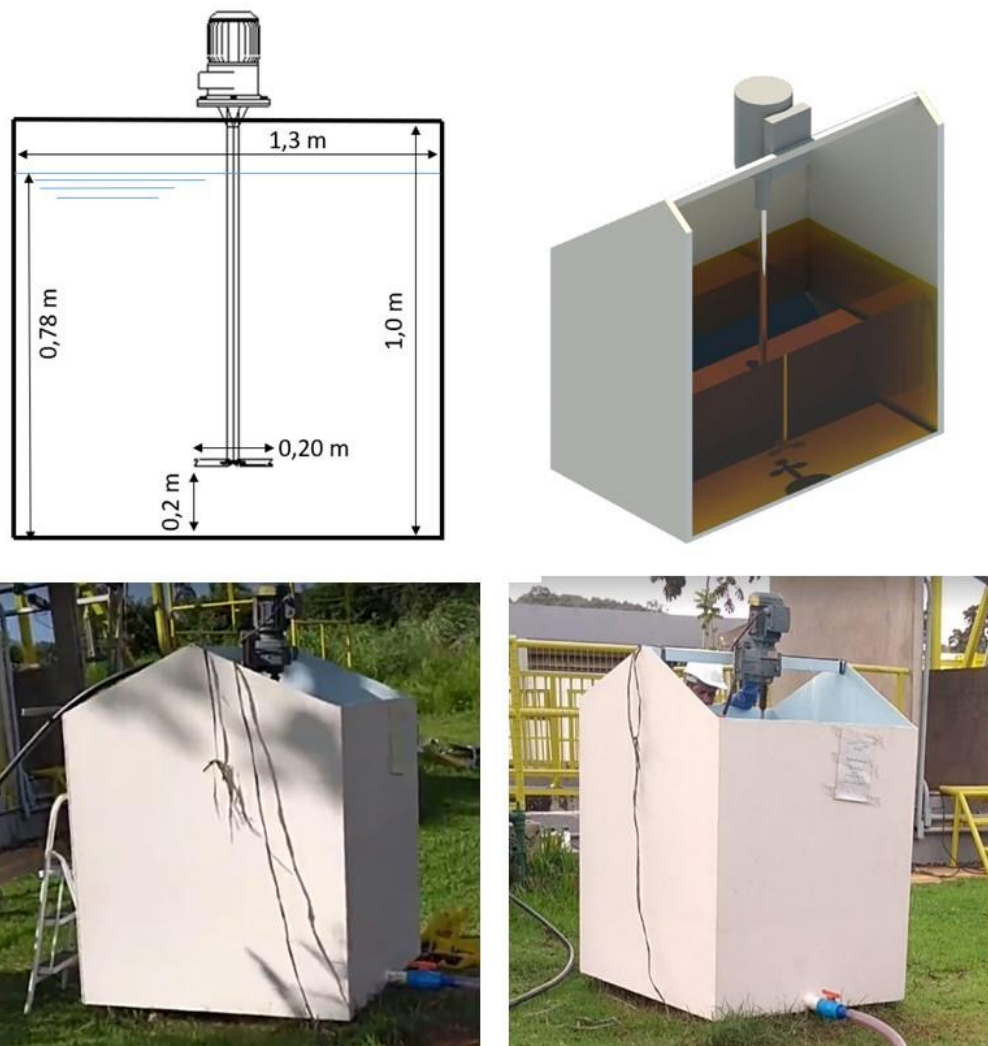
A partir das equações 4 e 5, a IPGR ficou com as características apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Características técnicas da IPGR

Lado da câmara: 1,30 m	Profundidade útil: 0,78 m	Profundidade total: 1,00 m
Volume útil: 1,32 m ³	Potência do motor: 0,144 cv	D: diâmetro do rotor (0,20 m).
Rotação do motor para mistura rápida: 290 rpm		
Rotação do motor para gradiente floculação máximo: 166 rpm		
Rotação do motor para gradiente floculação mínimo: 87 rpm		

Fonte: Autor (2019)

Figura 23: Instalação piloto de geração de resíduos



Fonte: Autor (2019)

4.3.2 Ensaios de Jarteste – Diagrama de Coagulação

Antes de iniciar a geração dos resíduos na instalação piloto, foram realizados para cada água de estudo, ensaios de bancada utilizando equipamento jarteste (ver Figura 24). Os ensaios de jarteste visaram a obtenção do diagrama de coagulação, e conseqüentemente os

valores otimizados da dosagem do coagulante e pH de coagulação, para serem aplicadas na IPGR.

O coagulante utilizado em toda a pesquisa foi o sulfato de alumínio líquido comercial com 7,4 % de Al_2O_3 . Foi preparada uma solução diluída do sulfato de alumínio, adicionando 2 g do produto em 1 L de água destilada, sendo as dosagens expressas em mg/L sempre referentes ao produto comercial. Para variação do pH de coagulação foi utilizado como alcalinizante a cal hidratada. Era preparada uma solução de suspensão de cal hidratada a partir da adição de 1 g do produto em 1 L de água destilada.

Figura 24: Equipamento de jarteste utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2019)

As condições utilizadas nos ensaios de jarteste foram as seguintes:

- ✓ Tempo de mistura do alcalinizante: 20 s
- ✓ Gradiente de velocidade: 100 s^{-1}
- ✓ Tempo de mistura rápida: 30 s
- ✓ Gradiente de mistura rápida: 200 s^{-1}
- ✓ Tempo de floculação: 25 min

- ✓ Gradiente de floculação: 40 s^{-1}
- ✓ Velocidade de sedimentação: $V_{s1} = 1,5 \text{ cm/min}$, $V_{s2} = 1,0 \text{ cm/min}$, $V_{s3} = 0,5 \text{ cm/min}$.
- ✓ Parâmetros monitorados: pH da água coagulada, turbidez e cor aparente da água decantada;

Como critério, adotou-se que o par de valores no diagrama (dosagem x pH) ideal, seria aquele que se alcançasse uma turbidez da água decantada inferior a 5 uT, com a menor dosagem de coagulante possível. Nesta etapa, também foi feita a escolha da melhor velocidade de sedimentação, usando o mesmo critério da turbidez decantada abaixo de 5 uT. Foram avaliadas três velocidades de sedimentação, 3,0, 1,5 e 0,5 cm/min.

4.3.3 Ensaio de Geração dos Resíduos

Os parâmetros de maior atenção nos ensaios da IPGR foram os gradientes de velocidade (mistura rápida e floculação) e a velocidade de sedimentação. Os valores dos gradientes de velocidade foram fixados tanto para o jarteste como para IPGR para os três tipos de água de estudo. Em relação a velocidade de sedimentação, para cada tipo de AE, adotou-se na IPGR o valor otimizado nos ensaios de jarteste.

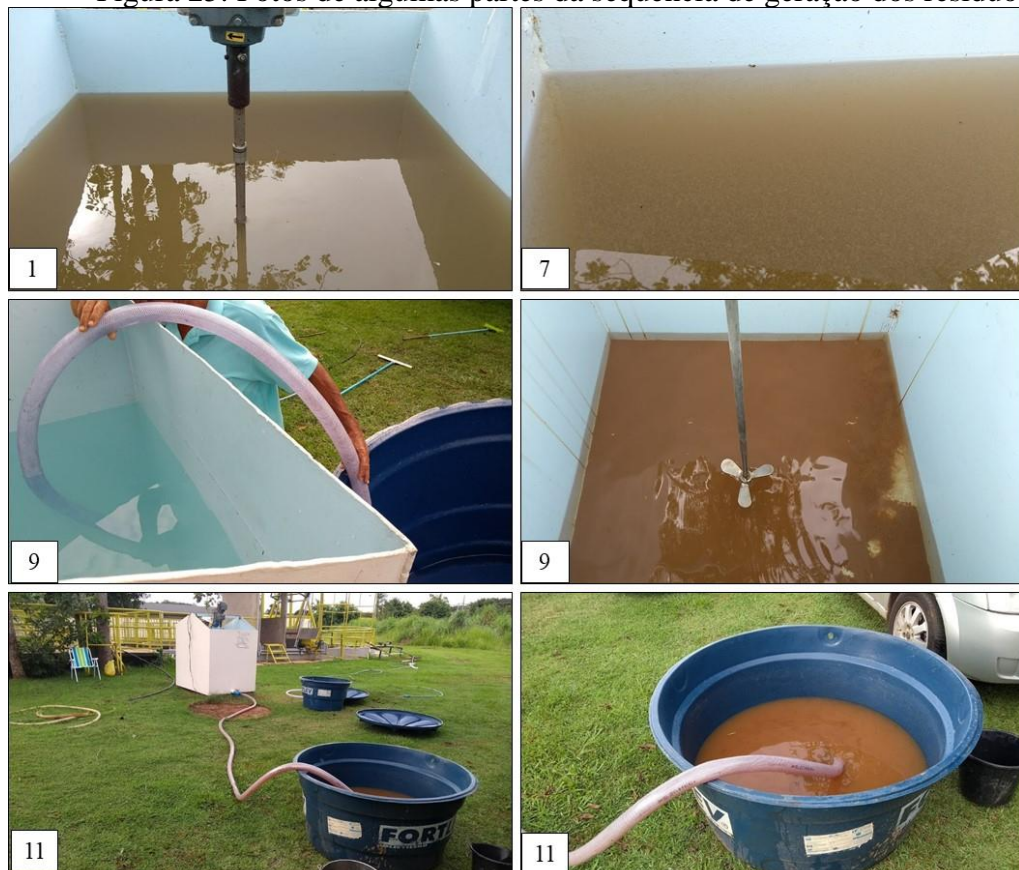
Para cada água de estudo realizou-se o seguinte roteiro de geração dos resíduos:

- 1) Enchimento da IPGR com água bruta (aproximadamente 1.300 L);
- 2) Foram pesadas as massas de alcalinizante (cal hidratada) e coagulante (sulfato de alumínio) definidos nos ensaios de jarteste;
- 3) Foi ligado o agitador mecânico da IPGR e ajustado a rotação do inversor de frequência para o gradiente de velocidade do alcalinizante (100 s^{-1});
- 4) Adicionou-se o alcalinizante (cal hidratada) na IPGR mantendo o gradiente de velocidade por 20 segundos;
- 5) Ajustou-se o gradiente de velocidade para a mistura rápida (300 s^{-1});
- 6) Foi adicionado o sulfato de alumínio na IPGR mantendo-se o gradiente de 300 s^{-1} por 30 segundos;
- 7) Decorrido o tempo de mistura rápida, foi ajustado o gradiente de velocidade para a floculação (40 s^{-1}) e aguardado o tempo de floculação de 25 min;
- 8) Após a floculação, desligou-se o agitador da IPGR, e foi aguardado o tempo de sedimentação definido nos ensaios de jarteste;

- 9) Após o término da sedimentação, o sobrenadante (água decantada) era retirado por sifonamento com auxílio de uma mangueira;
- 10) Parte da água decantada era armazenada para uso posterior na preparação/diluição dos resíduos de estudo;
- 11) Os resíduos sedimentados no fundo da unidade eram retirados pela abertura de um registro, e transferidos para um reservatório de armazenamento. A Figura 25 apresenta fotos de alguns passos na realização dos ensaios de geração dos resíduos.

Após a retirada dos resíduos, o ensaio era finalizado com a lavagem do tanque e iniciava-se novamente o processo. Foi estimado que seria necessário obter no mínimo 1.400 gramas de SST de resíduos para cada água de estudo para a realização dos ensaios de desaguamento em geotêxtil (3ª etapa). Essa etapa de geração de resíduos foi a que mais consumiu tempo na pesquisa, pois pela grande quantidade de água bruta necessária para gerar os resíduos, a IPGR teve que ser instalada ao lado de cada manancial, dificultando assim a logística da pesquisa.

Figura 25: Fotos de algumas partes da sequência de geração dos resíduos



Fonte: Autor (2019)

4.3.4 Caracterização dos RETAs

Os três resíduos gerados foram devidamente caracterizados pelos parâmetros físico-químicos: pH, cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, carbono orgânico total e carbono orgânico dissolvido, teor de sólidos e umidade.

A fração sólida de cada RETA também foi caracterizada nos seguintes parâmetros: análise qualitativa dos elementos químicos constituintes do resíduo, tamanho e distribuição das partículas e morfologia das partículas. Os equipamentos e métodos utilizados nas análises constam nas Tabelas 8 e 9 do item 4.1.

4.4 ENSAIOS DE BANCADA EM TUBO GEOTÊXTIL – 3ª ETAPA

Conforme relatado na revisão de literatura, existem vários métodos não padronizados, que são usados pelos pesquisadores para avaliar a eficiência do desaguamento em tubo geotêxtil. Devido à sua simplicidade, facilidade de uso e custo, a presente pesquisa definiu utilizar o teste do filtro pressurizado em geotêxtil (FPG). Este teste foi usado por diferentes autores, com pequenas mudanças na configuração (Moo-Young *et al.*, 2002; Kutay e Aydilek, 2004; Muthukumaran e Ilamparuthi, 2006; Satyamurthy e Bhatia, 2009; Grzelak *et al.*, 2011; Khachan *et al.*, 2014; Khachan e Bhatia, 2016). A seguir seguem os detalhes dos ensaios de bancada realizados, bem como o planejamento estatístico experimental.

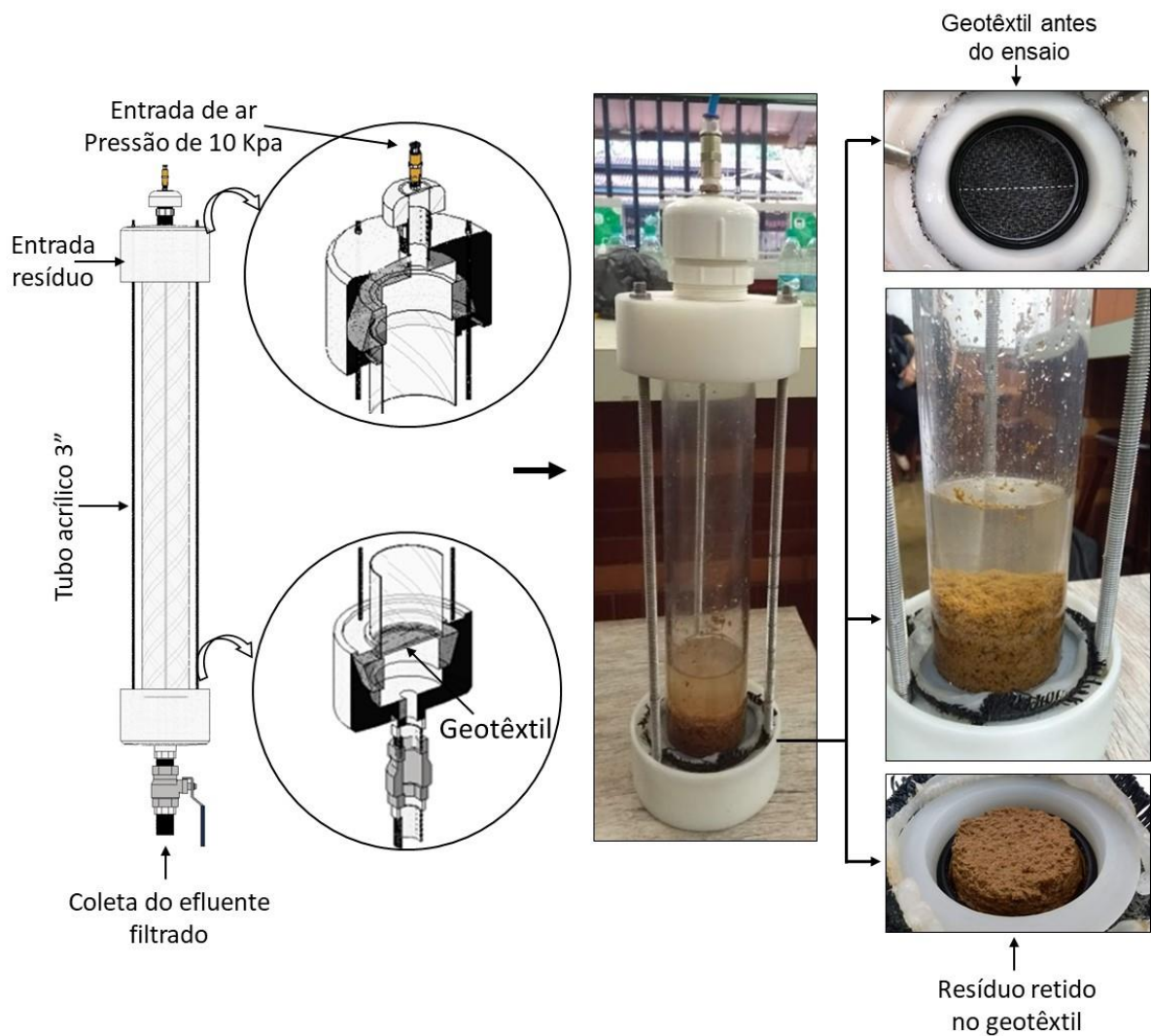
4.4.1 Montagem do Filtro Pressurizado em Geotêxtil

O modelo empregado na pesquisa foi adaptado do trabalho de Khachan e Bhatia (2016). Os detalhes do filtro utilizado na presente pesquisa podem ser vistos na Figura 26. Os testes de filtração sob pressão em geotêxtil foram conduzidos utilizando um tubo de acrílico (diâmetro de 7,6 cm e altura de 50 cm) entre dois flanges de tecnil nylon. Um disco de geotêxtil foi fixado na base de um dos flanges juntamente com o tubo de acrílico, sendo acoplado um anel de borracha para formar uma vedação completa. Na parte superior do FPG tinha uma abertura roscável, a qual era introduzido o resíduo a ser desaguado. A pressão aplicada por cima do filtro (10 kPa) era fornecida através de uma mangueira de ar

comprimido. A pressão foi estabelecida para simular as condições operacionais em escala real (Maurer, 2011).

A escolha do tipo de geotêxtil aplicado na pesquisa se deu por meio das opções encontradas nas maiores empresas fornecedoras de tubos geotêxtil para saneamento. Verificou-se que não há muita variação dos geotêxteis usados no desaguamento de RETA. No item 4.1 estão as características do material geotêxtil utilizado.

Figura 26: Filtro pressurizado em geotêxtil utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2019)

4.4.2 Planejamento Estatístico Experimental

Antes de iniciar os ensaios de bancada no FPG, foi realizado um amplo planejamento experimental na definição da melhor ferramenta estatística a ser utilizada para interpretação dos dados gerados.

Para o planejamento dos ensaios de desaguamento no FPG foi escolhido a metodologia de superfície de resposta (RSM) por meio do delineamento de face centrada (DFC). Seguindo os objetivos principais da pesquisa, buscou-se na elaboração do planejamento dos ensaios avaliar a influência de quatro fatores no desaguamento de RETA em tubo geotêxtil: (1) tipo do RETA (água bruta); (2) tipo do condicionante químico (polímero sintético); (3) dosagem do condicionante químico e (4) concentração inicial de SST do resíduo.

Na estrutura do delineamento de face centrada é necessária a inserção de níveis numéricos para o planejamento dos ensaios. Com isso, dos quatro fatores a serem estudados, somente dois deles poderiam ser inseridos níveis numéricos (a dosagem de polímero e a concentração inicial de SST do resíduo), pois os outros dois fatores (tipo do RETA e o tipo de polímero) são fatores qualitativos.

Assim, definiu-se que os delineamentos de face centradas (DFC) seriam de duas variáveis independentes: concentração inicial de SST do resíduo (X_1) e dosagem de polímero (X_2). Os níveis fixados nos DFC estão descritos na Tabela 11. Como havia três tipos de RETAs e seriam testados três tipos de polímeros (catiônico, aniônico e não iônico), foi feito um DFC para cada tipo de resíduo e tipo de polímero. A Figura 27 apresenta o fluxograma com quantidade de tratamentos (tipo de RETA e tipo de polímero) dos DFC realizados.

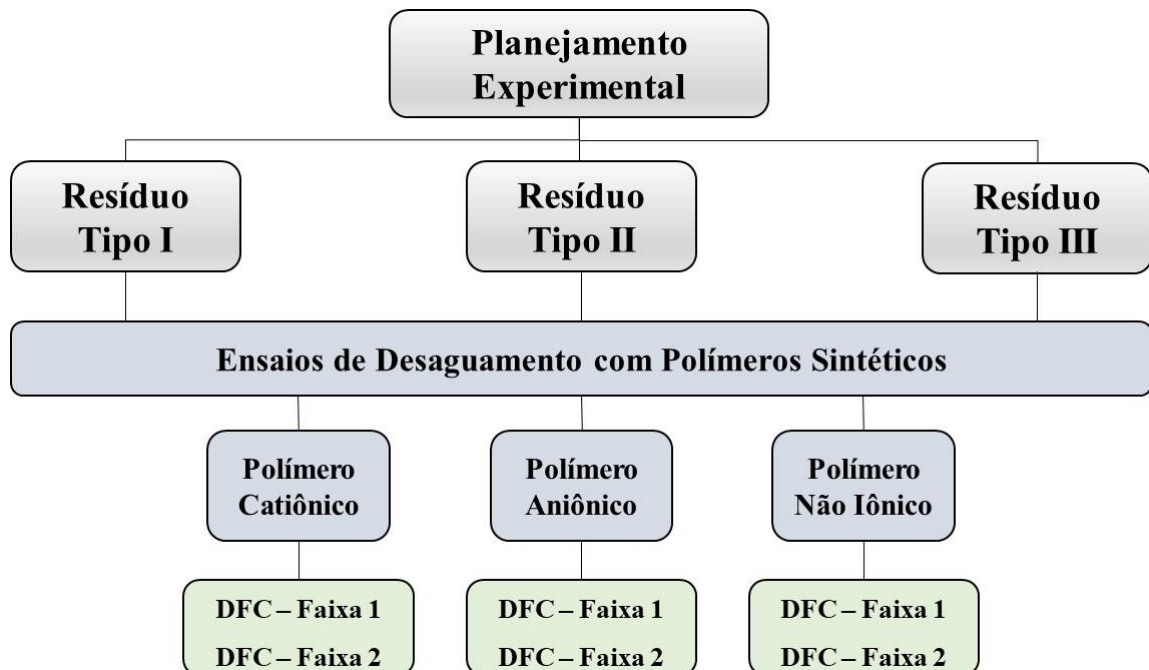
Para a variável X_1 , concentração inicial de SST do resíduo, o nível máximo adotado (+1) foi de 20 g/L, sendo estabelecido como um valor característico das descargas de decantadores, e o nível médio (0) de 12,5 g/L, como sendo típico de um tanque de mistura do sedimento da água de lavagem de filtros e das descargas de decantadores. O nível mínimo (-1) resultou em 5 g/L.

Os valores de níveis para a variável X_2 , dosagem do polímero, foram baseados na literatura. Foi constatada grande variação de dosagens de polímeros em trabalhos com desaguamento de RETA (0,5 a 8 mg/gSST). Assim, para abranger estas dosagens, foram feitas duas faixas de DFC, sendo a primeira (DFC 1) variando de 0,5 (-1), 2,25 (0) e 4,0 (+1) mg/gSST, e a segunda (DFC 2) com dosagens de 4,0 (-1), 6,0 (0) e 8,0 (+1) mg/gSST. A Tabela 11 apresenta os níveis estudados para cada DFC. As Tabelas 12 e 13 mostram como

ficaram os ensaios para os delineamentos. Cada DFC foi composto por onze ensaios, sendo três ensaios repetições no ponto central (0), para se avaliar o erro amostral.

Uma vez estabelecidas as variáveis independentes (X_1 e X_2), buscou-se definir as variáveis dependentes (Y). Uma variável dependente (ou resposta) é aquela cujo o valor depende da forma como a variável independente é modificada. No caso dos ensaios com o FPG, as variáveis dependentes foram os índices de desempenho do desaguamento, sendo eles: Eficiência de filtração (EF), perda de partículas (PP), turbidez do filtrado, teor de sólidos do resíduo desaguado, percentual de desaguamento (PD) e tempo de desaguamento.

Figura 27: Fluxograma do planejamento experimental estatístico



Fonte: Autor (2019)

Tabela 11: Níveis das variáveis estudados nos planejamentos de face centradas (DFC) para os ensaios de FPG; X_1 (concentração inicial de SST no resíduo); X_2 (dosagem de polímero)

Níveis	DFC – Faixa 1		DFC – Faixa 2	
	X_1 (g/L)	X_2 (mg/gSST)	X_1 (g/L)	X_2 (mg/gSST)
- 1	5,0	0,5	5,0	4,0
0	12,5	2,25	12,5	6,0
+ 1	20,0	4,0	20,0	8,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 12: Planejamento dos ensaios realizados para o DFC faixa 1

Ensaio	Fatores - DFC 1	
	X ₁ : Concentração inicial de SST do resíduo (g/L)	X ₂ : Dosagem de Polímero (mg/gSST)
1	5,0 (-1)	0,5 (-1)
2	20 (+1)	0,5 (-1)
3	5,0 (-1)	4,0 (+1)
4	20 (+1)	4,0 (+1)
5	5,0 (-1)	2,0 (0)
6	20 (+1)	2,0 (0)
7	12,5 (0)	0,5 (-1)
8	12,5 (0)	4,0 (+1)
9	12,5 (0)	2,0 (0)
10	12,5 (0)	2,0 (0)
11	12,5 (0)	2,0 (0)

Fonte: Autor (2019)

Tabela 13: Planejamento dos ensaios realizados para o DFC faixa 2

Ensaio	Fatores – DFC 2	
	X ₁ : Concentração de inicial de SST do resíduo (g/L)	X ₂ : Dosagem de Polímero (mg/gSST)
1	5,0 (-1)	4,0 (-1)
2	20 (+1)	4,0 (-1)
3	5,0 (-1)	8,0 (+1)
4	20 (+1)	8,0 (+1)
5	5,0 (-1)	6,0 (0)
6	20 (+1)	6,0 (0)
7	12,5 (0)	4,0 (-1)
8	12,5 (0)	8,0 (+1)
9	12,5 (0)	6,0 (0)
10	12,5 (0)	6,0 (0)
11	12,5 (0)	6,0 (0)

Fonte: Autor (2019)

4.4.3 Ensaio no Filtro Pressurizado em Geotêxtil

Com o planejamento estatístico finalizado, partiu-se para os principais testes da pesquisa, com o filtro pressurizado em geotêxtil (FPG).

Os ensaios no FPG seguiram a seguinte sequência para cada um dos três tipos de resíduos e polímeros:

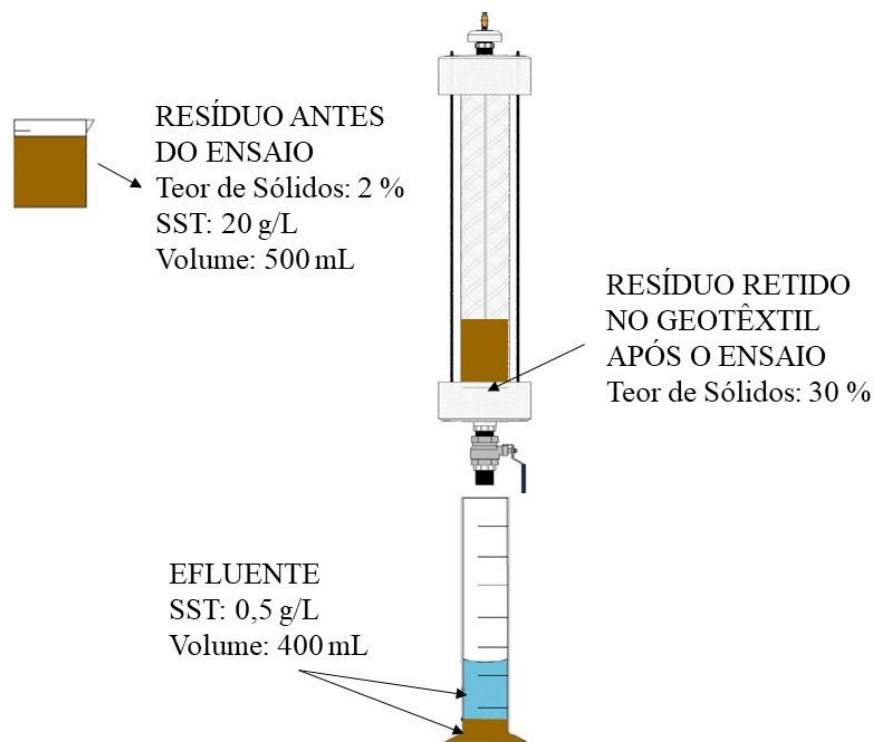
- 1) A partir do resíduo gerado na 2ª etapa, foram preparados os três níveis de concentração inicial de SST no resíduo (5, 12,5 e 20 g/L) definidos no planejamento experimental. A preparação foi feita diluindo-se o RETA gerado, com o sobrenadante que foi armazenado, até se obter a concentração de sólidos desejada;
- 2) Obedecendo a sequência planejada de onze ensaios para cada DFC, era coletada uma alíquota de 0,5 L do RETA, e armazenado em um jarro do equipamento de jarteste;
- 3) No equipamento jarteste, realizou-se o condicionamento químico com a dosagem específica do polímero a ser testado. As condições de mistura rápida foram: tempo de mistura (30 segundos) e rotação da paleta (141 rpm);
- 4) Após o condicionamento químico, despejou-se manualmente o RETA dentro do filtro pressurizado em geotêxtil. O registro de saída do FPG ficou fechado, impedindo o início do processo de filtração;
- 5) Ao término do enchimento, a tampa superior do FPG era fechada, a pressão de ar inserida (10 KPa), o registro de saída foi aberto, permitindo a drenagem do efluente filtrado;
- 6) Durante o desaguamento, eram feitas leituras de volume do filtrado, a cada 10 segundos no primeiro minuto, e depois a cada 5 minutos.
- 7) O teste era finalizado quando a vazão de desaguamento ficava inferior a 0,0025 mL/segundo (inferior a 1 gota a cada 20 segundos).
- 8) Após o ensaio terminado, eram feitas análises dos seguintes parâmetros: turbidez e sólidos suspensos totais no efluente filtrado, e teor de sólidos e umidade no resíduo retido dentro do filtro de geotêxtil.

A partir dos parâmetros analisados, foram calculados os índices de desempenho do processo de desaguamento. Conforme relatado no item anterior, os índices utilizados (Y resposta) para os ensaios foram: Eficiência de filtração (EF), perda de partículas (PP), turbidez, teor de sólidos, percentual de desaguamento (PD) e vazão de desaguamento.

Um exemplo de cálculo dos índices de desempenho (EF, PP e PD) para os ensaios no FPG é apresentado na Figura 28. Para o exemplo, foram utilizadas as equações 1, 2 e 3 do item 3.3.3, e considerado os seguintes dados fictícios:

- Dados do resíduo antes do ensaio: Teor de sólidos (2%); Sólidos suspensos Totais (20 g/L); Volume (500 mL).
- Dados do resíduo após o ensaio: Teor de sólidos (30%); Sólidos suspensos Totais no efluente filtrado (0,5 g/L).

Figura 28: Esquema com um exemplo de cálculo dos índices de desempenho no ensaio de desaguamento no FPG



Fonte: Adaptado de Satyamurthy e Bhatia (2009)

Cálculos do exemplo:

- Percentual de Desaguamento:

$$PD = \frac{TS_f - TS_i}{TS_f} * 100 = \frac{(30\% - 2\%)}{30\%} * 100 = 93\%$$

- Eficiência de Filtração:

$$EF = \frac{SST_i - SST_f}{SST_i} * 100 = \left\{ \frac{20g - 0,5g}{20g} \right\} * 100 = 97,5\%$$

➤ Perda de partículas (PP):

$$PP = \frac{\text{Massa solidos no filtrado}}{A} = \frac{0,5 \text{ g/L} * 0,4 \text{ L}}{0,00441\text{m}^2} = 45,35 \text{ g/m}^2$$

4.4.4 Análise dos Dados Gerados

Com a utilização da metodologia de superfície de resposta pôde-se verificar estatisticamente a influência no desaguamento dos RETAs para os dois fatores testados: concentração inicial de SST no RETA, e a dosagem do polímero. Já para investigar a influência dos outros dois fatores objetos da pesquisa (tipo da água bruta e tipo do polímero) usou-se a análise de variância ANOVA juntamente com o teste de Tukey. Para o tratamento dos dados pela metodologia de superfície de resposta, e o planejamento dos delineamentos de face centrada, foi utilizado o software estatístico *Protimiza Experimental Design*. Nos testes da ANOVA e Turkey, usou-se o software *Statística 10*.

O tratamento estatístico dos dados gerados nos ensaios de bancada no FPG, e a forma de avaliação e validação dos resultados, tiveram o seguinte roteiro:

- 1) Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais, passaram pelo tratamento estatístico no software *Protimiza Experimental Design*, sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor);
- 2) Havendo significância estatística para alguma variável, o software elaborou um modelo matemático, com os coeficientes das variáveis sobre as respostas (índices de desempenho);
- 3) Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), onde verificou-se sua adequacidade dos valores previstos com os valores experimentais;
- 4) Validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de reposta para cada índice de desempenho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados na pesquisa. São expostos os dados de caracterização das águas de estudo (1ª etapa) e dos resíduos gerados (2ª etapa). Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios de desaguamento no filtro pressurizado em geotêxtil (3ª etapa) para os três tipos de RETA e de polímeros avaliados.

5.1 ÁGUAS DE ESTUDO

5.1.1 Caracterização

A Tabela 14 apresenta os resultados da caracterização físico-química das três águas de estudo. Cada tipo de água teve características bem distintas.

As águas tipo I e tipo II apresentaram altos valores de turbidez e baixos valores de cor verdadeira. Em contraste, a água tipo III, teve a menor turbidez (11,7 uT) e cor verdadeira elevada (107 uH). Estes valores observados de turbidez e cor verdadeira já eram esperados.

A presença de matéria orgânica na água tipo III é muito superior à encontrada nas demais águas de estudo. Enquanto que nas águas I e II os valores de carbono orgânico total e dissolvido estavam próximos de 2 mg/L, na água tipo III os valores de COT ficaram em torno de 10 mg/L.

Devido à presença da suspensão de caulinita, a série de sólidos para água tipo I resultou em concentração de sólidos suspensos muito maior do que sólidos dissolvidos.

A presença de metais (alumínio, ferro e manganês) ocorreu de forma mais significativa nas águas tipo II e tipo III, sendo que a presença destes elementos na água tipo I foi irrisória.

De maneira geral, as características encontradas para cada tipo de água foram ao encontro dos objetivos esperados nesta etapa da pesquisa. Pois, a partir dessa matéria-prima (água bruta), foram gerados diferentes resíduos de tratamento de água na 2ª etapa da pesquisa.

Tabela 14: Caracterização físico-química dos três tipos de água de estudo

PARÂMETROS	Água Tipo I	Água Tipo II	Água Tipo III
pH	6,9	6,3	6,7
Cor Verdadeira (uH)	10	15	107
Turbidez (uT)	510	251	11,7
Alumínio Total (mg/L)	0,01	0,098	0,002
Ferro Total (mg/L)	0,02	0,63	2,16
Manganês Total (mg/L)	<0,01	0,032	0,02
Sólidos Totais (mg/L)	585	390	108
Sólidos Suspensos (mg/L)	545	296	24
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	40	94	84
COD (mg/L)	2,04	2,1	8,5
COT (mg/L)	2,23	3,7	10,6

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 15 mostra o resultado da estimativa das substâncias húmicas aquáticas presentes na água de estudo tipo III. O resultado indicou que 48,1% dos valores de carbono orgânico dissolvido presente na água de estudo são provenientes de SHA (ácidos húmicos e fúlvicos). Este resultado está de acordo com dados encontrados por outros pesquisadores, em mananciais com altas concentrações de matéria orgânica natural (Chow *et al.*, 2005; Croué *et al.*, 1999).

Tabela 15: Resultados da extração de SH da água de estudo tipo II

COD Água bruta	COD Extraído na XAD	MASSA COD Extraída	MASSA COD de água bruta utilizada	Substâncias Húmicas no COD
8,5 mg/L	38,8 mg/L	15,5 mg	32,3 mg	48,1 %

Fonte: Autor (2019)

5.2 GERAÇÃO DOS RESÍDUOS

5.2.1 Ensaios de Jarteste – Diagrama de Coagulação

As Figuras 29 e 30 mostram os diagramas de coagulação com os dados de turbidez da água decantada para as águas tipo I e II. Para água tipo III, além do diagrama da turbidez da água decantada (Figura 31), é apresentado também o diagrama da cor aparente (Figura 32). Como a água tipo III apresentou baixos valores de turbidez e altos de cor verdadeira, decidiu-se usar também o parâmetro cor aparente da água decantada.

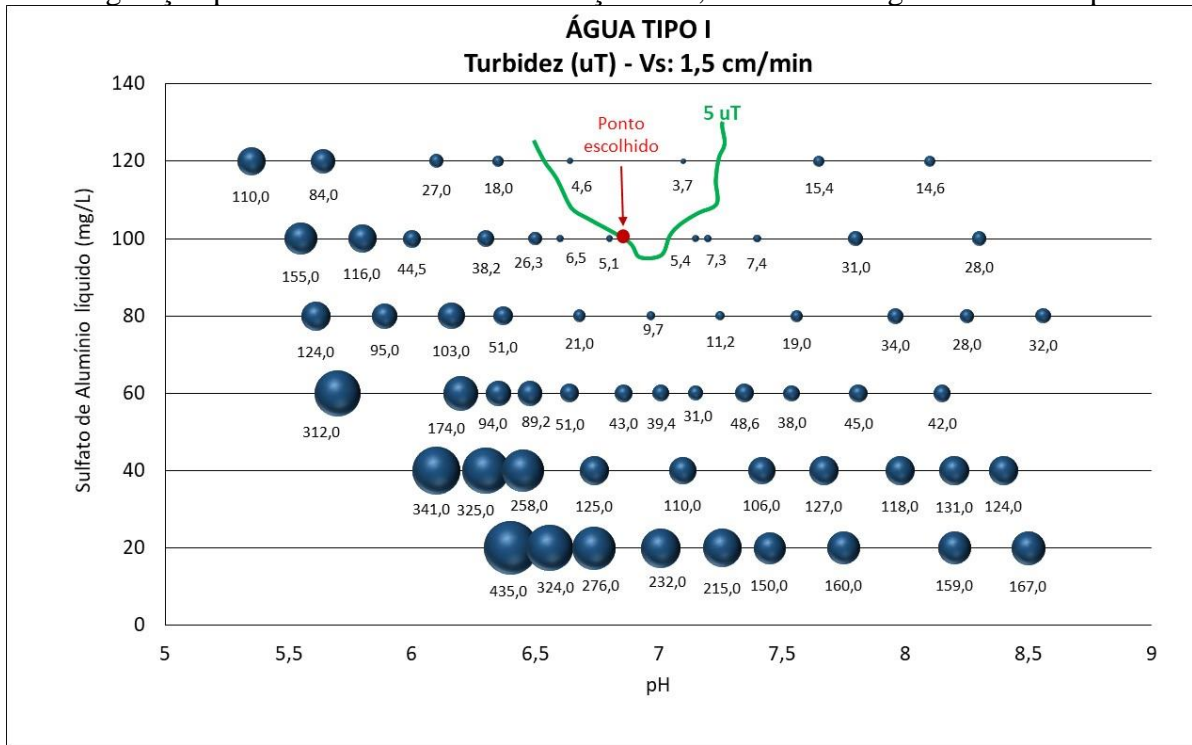
A Tabela 16 apresenta um resumo dos valores otimizados dos ensaios de jarteste para cada tipo de AE, e que foram utilizados posteriormente nos ensaios da IPGR. Observa-se que a maior dosagem de sulfato de alumínio (100 mg/L) resultou para água tipo I, devido principalmente à maior quantidade de sólidos presentes nesta água. A água tipo III também necessitou de uma dosagem alta de coagulante (80 mg/L), para possibilitar uma boa remoção de cor verdadeira.

Tabela 16: Valores otimizados encontrados nos ensaios de jarteste para os três tipos de água de estudo

Água de estudo	Sulfato de alumínio	pH de coagulação	Velocidade de Sedimentação
Tipo I	100 mg/L	6,82	1,5 cm/min
Tipo II	60 mg/L	6,95	1,5 cm/min
Tipo III	80 mg/L	6,92	0,5 cm/min

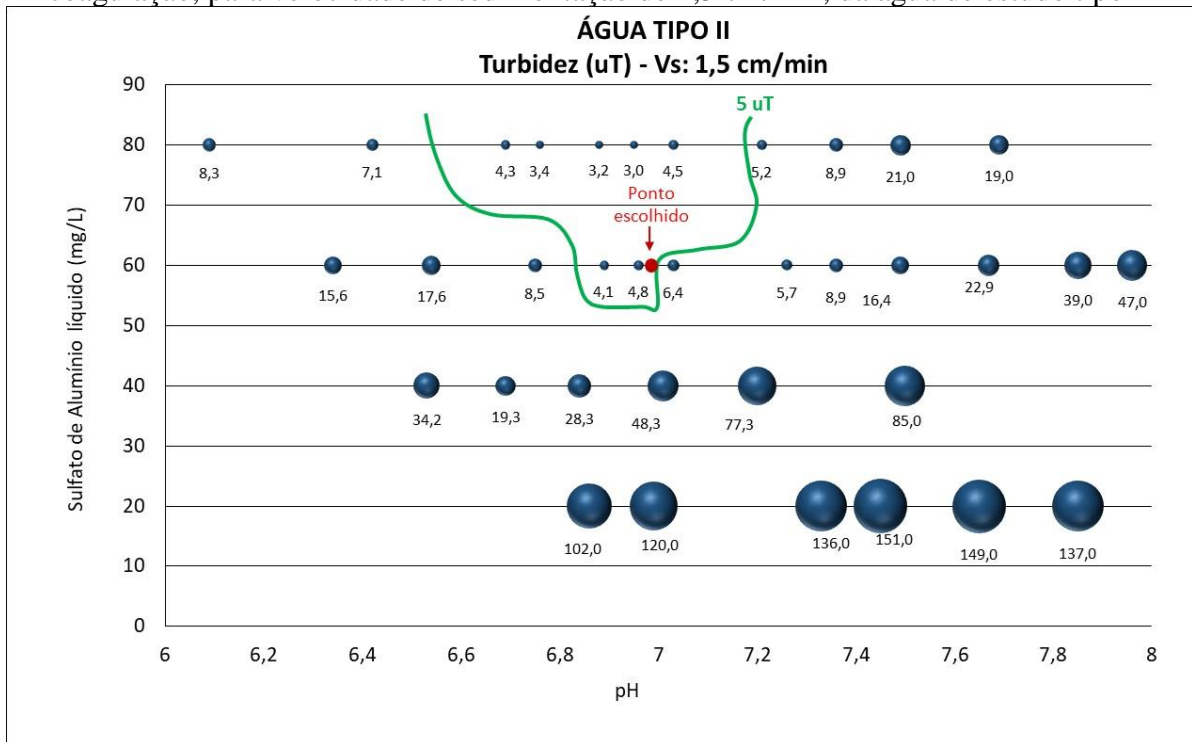
Fonte: Autor (2019)

Figura 29: Turbidez da água decantada em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação para velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min da água de estudo tipo I



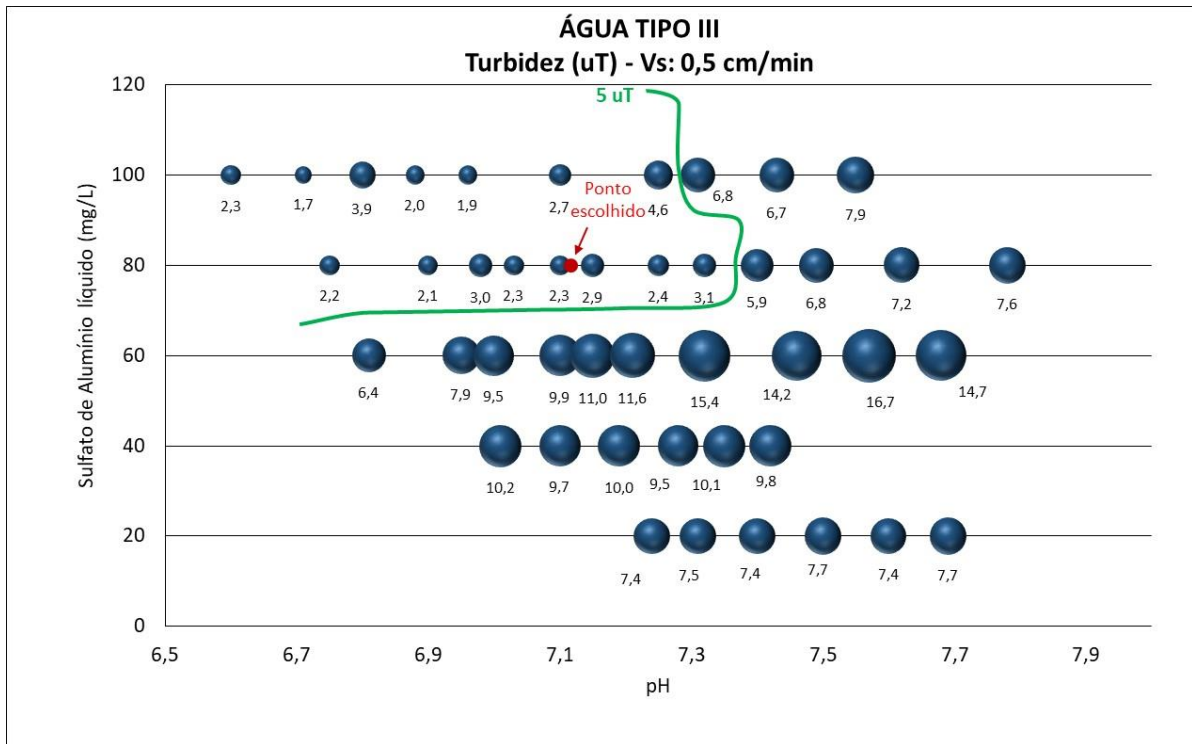
Fonte: Autor (2019)

Figura 30: Turbidez da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min, da água de estudo tipo II



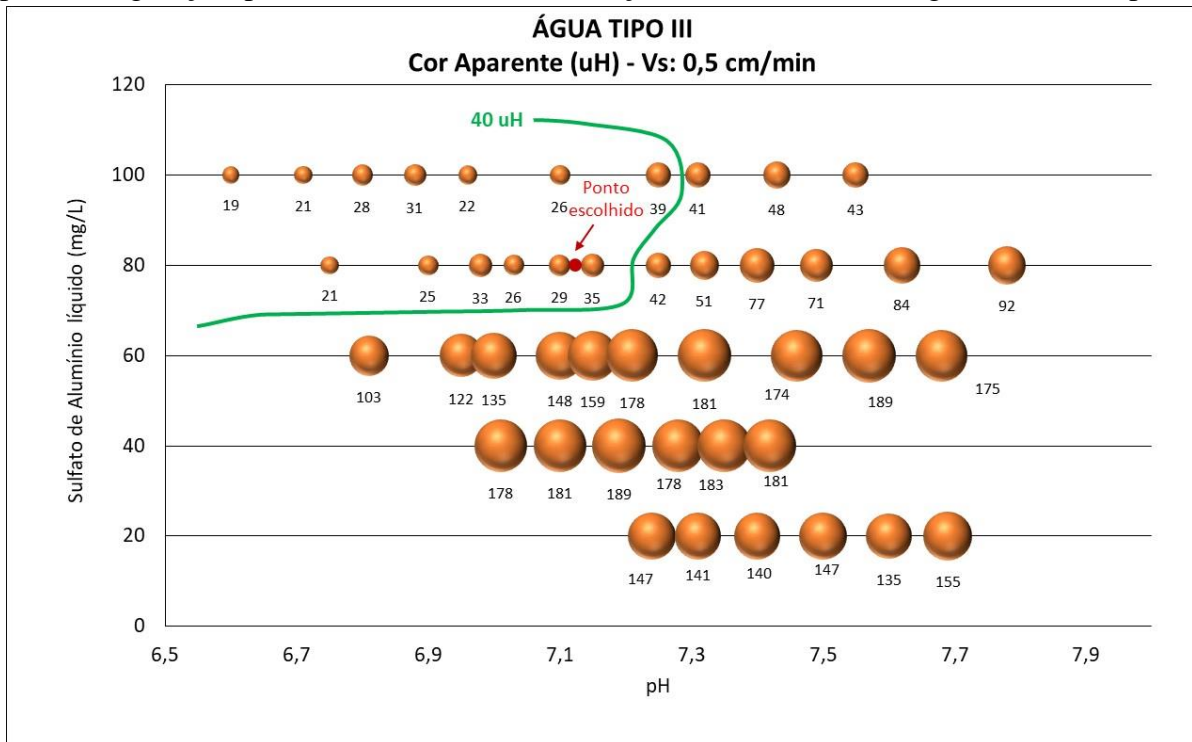
Fonte: Autor (2019)

Figura 31: Turbidez da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, da água de estudo tipo III



Fonte: Autor (2019)

Figura 32: Cor aparente da água decantada, em função da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação, para velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min, da água de estudo tipo III



Fonte: Autor (2019)

5.2.2 Ensaios de Geração e Caracterização dos RETAs

Após a definição das condições de coagulação, foram feitos os ensaios na IPGR. A Tabela 17 apresenta um resumo do quantitativo de ensaios realizados. Foi estimada a necessidade de se produzir um volume de massa seca de resíduos maior que 1.400 g para a realização dos testes de bancada no FPG (3ª etapa). Nota-se que, devido à água tipo III ter a característica de possuir baixos valores de sólidos suspensos, houve necessidade de se realizar uma quantidade muito maior de ensaios para atingir a massa de RETA desejada. Já para a água tipo I, o número de ensaios foi bastante reduzido, decorrente da maior concentração de SST presente na água. A Figura 33 mostra o aspecto visual de cada RETA produzido. Nota-se uma composição bem distinta para cada tipo de resíduo.

Tabela 17: Relação do quantitativo de ensaios realizados na IPGR para as águas de estudo

Água de estudo	Massa de resíduo gerada por ensaio	Quantidade de ensaios realizados	Massa total de resíduo gerada
Tipo I	390 g	5	1.950 g
Tipo II	195 g	9	1.755 g
Tipo III	32 g	52	1.622 g

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 18 apresenta a caracterização físico-química dos três resíduos preparados, com concentrações iniciais de SST do resíduo de 5, 12,5 e 20 g/L para cada tipo de RETA, conforme estabelecido no planejamento experimental. A Tabela 19 mostra os dados da análise qualitativa realizada na fração sólida de cada RETA.

Pela caracterização físico-química dos RETAs, nota-se similaridades com as características observadas nas águas de estudo. Uma característica importante a ser observada nos estudos de desaguamento de RETAs é o teor de umidade. Os valores elevados de umidade encontrados para os três tipos de RETAs, e suas concentrações diluídas, são similares aos encontrados por outros autores que também caracterizaram RETA em ETAs de ciclo completo (Guanaes, 2009; Tominaga, 2010; Guimarães *et al.*, 2014).

Tabela 18: Caracterização físico-química das três concentrações de SST preparadas para cada tipo de RETA

PARÂMETROS	RETA TIPO I			RETA TIPO II			RETA TIPO III		
	5 g/L	12,5 g/L	20 g/L	5 g/L	12,5 g/L	20 g/L	5 g/L	12,5 g/L	20 g/L
Alcalinidade (mg/L)	60,05	80,61	97,10	40,00	38,37	36,13	47,63	64,30	84,30
pH	7,4	7,68	7,76	6,59	6,26	6,29	6,27	6,73	6,81
Cor Verdadeira (uH)	12	17	21	14	13	17	21	24	18
Turbidez (uT)	6.280	10.780	18.950	10.450	17.800	28.600	5.400	9.853	18.698
Sólidos Totais (mg/L)	5.277	13.161	20.853	5.009	12.338	20.473	5.327	12.611	20.037
Sólidos Suspensos (mg/L)	5.100	12.980	20.598	4.873	12.183	20.257	5.092	12.367	19.783
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	177	181	255	136	155	216	235	244	254
Teor de Sólidos (%)	0,46	1,23	2,05	0,53	1,30	2,02	0,51	1,15	1,95
Umidade (%)	21.846	7.708	4.821	18.612	7.134	4.843	19.530	7.514	5.149

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 19 apresenta os constituintes químicos encontrados na fração sólida dos três tipos de RETA. A presença de oxigênio encontrada em todos os resíduos se deve a possíveis substâncias (compostos oxigenados) formados com os elementos químicos alumínio (Al), silício (Si), carbono (C) e ferro (Fe). Como exemplos de compostos oxigenados, pode-se esperar a presença de sílica (SiO₂), que pode estar associada à presença de areia na água bruta (encontrados em minerais, areias e silicatos), o óxido de alumínio (Al₂O₃), também conhecido como alumina, que pode estar relacionado ao uso de coagulante do tipo sulfato de alumínio no processo de tratamento.

Nos três tipos de RETA, as concentrações de alumínio resultaram elevadas, com valores similares entre os resíduos. O RETA tipo I apresentou grande prevalência de minerais, principalmente a sílica (34,9%), em razão da suspensão de caulinita. O RETA tipo III se diferenciou muito dos demais resíduos, pela sua característica predominantemente orgânica (28,6% de carbono) e baixos teores de minerais.

Tabela 19: Análise qualitativa dos elementos químicos constituintes na parte sólida dos três tipos de resíduo, usando o método EDS da microscopia eletrônica

PARÂMETROS	RETA		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Carbono	-	1,2 %	28,6 %
Alumínio	24,3 %	27,8 %	24,1 %
Ferro	10,5 %	21,3 %	7,8 %
Manganês	3,0 %	4,0 %	2,4 %
Sílica	34,9 %	23,9 %	10,0 %
Potássio	3,1 %	1,4 %	0,9 %
Oxigênio	20,0 %	18,3 %	26,2 %
Cálcio	0,2 %	1,0 %	-
Sódio	0,4 %	-	-
Nióbio	3,0 %	-	-
Molibdênio	0,7 %	-	-
Titânio	-	1,20%	-

Fonte: Autor (2019)

Figura 33: Imagens dos três tipos de resíduos de tratamento de água (RETA) gerados para cada tipo de água de estudo



Fonte: Autor (2019)

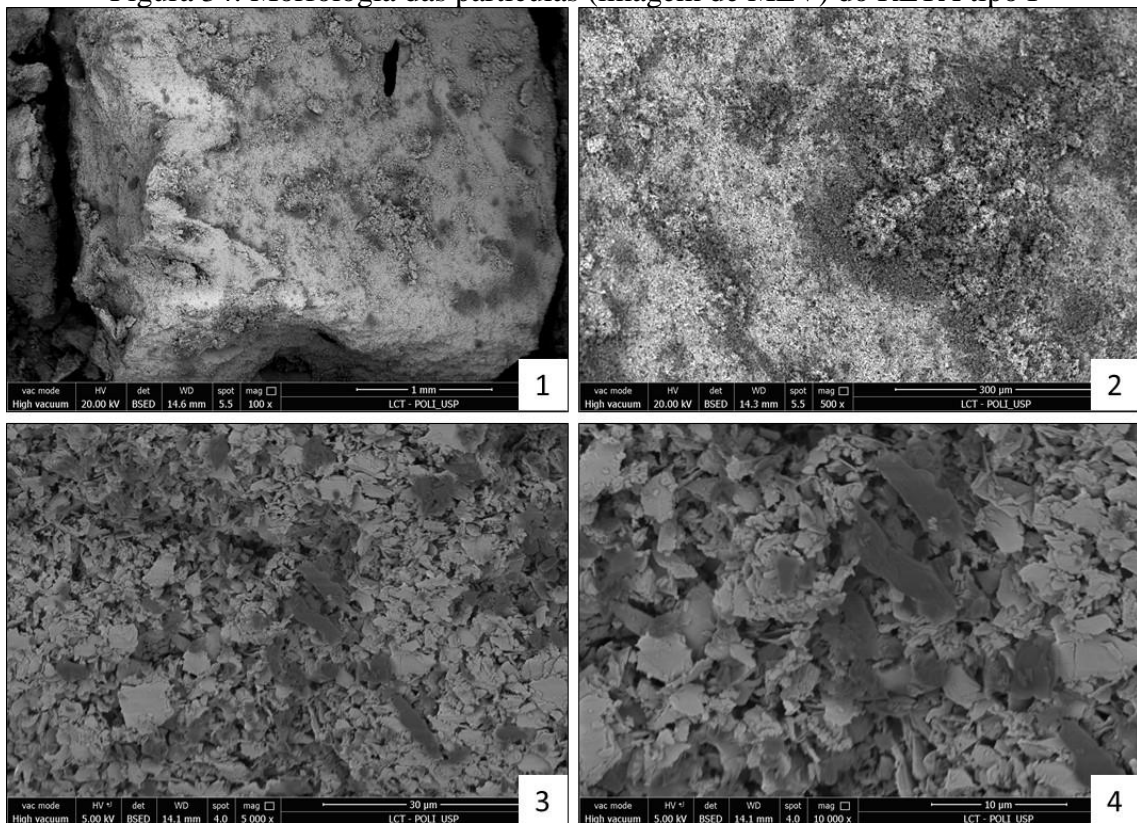
As Figuras 34, 35 e 36 mostram as imagens de microscopia eletrônica de varredura, realizadas nos RETAs tipo I, tipo II e tipo III respectivamente. Por meio dessas imagens, pode-se avaliar a morfologia das partículas que constituem os resíduos. Para Barroso (2007),

o conhecimento da morfologia de RETAs é de fundamental importância pois tais características influenciam nos mecanismos de desaguamento e secagem dos resíduos.

Para cada tipo de RETA são apresentadas quatro imagens com níveis de detalhamento diferentes, de 100, 500, 5.000 e 10.000 vezes do tamanho real. Comparando as imagens, são verificadas diferenças nítidas em relação aos três resíduos. O RETA tipo I possui estruturas mais uniformes e lineares, indicando a forte presença de minerais (caulinita). O RETA tipo II é o que possui a forma mais heterogênea dos resíduos analisados, com uma mistura de materiais minerais e orgânicos. O RETA tipo III, devido à menor quantidade de minerais, possui uma forma mais homogênea, formada basicamente dos flocos de alumínio e matéria orgânica.

A Figura 37 apresenta o gráfico com a distribuição do tamanho das partículas para cada RETA. O RETA tipo I obteve os menores tamanhos de partículas, e o RETA tipo III apresentou os maiores valores. Os resultados mostram que o tipo da água bruta interfere diretamente no tamanho final das partículas do RETA.

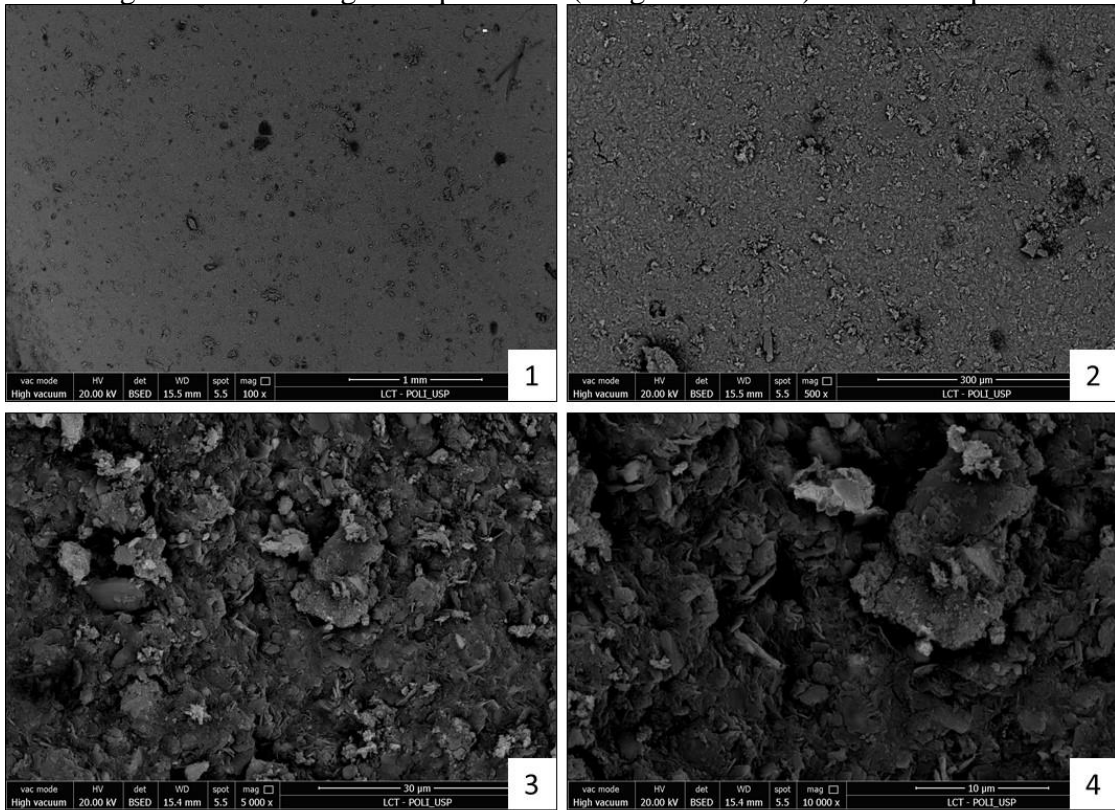
Figura 34: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo I



(1) aumento de 100x; (2) aumento de 500x; (3) aumento de 5.000x; (4) aumento de 10.000x

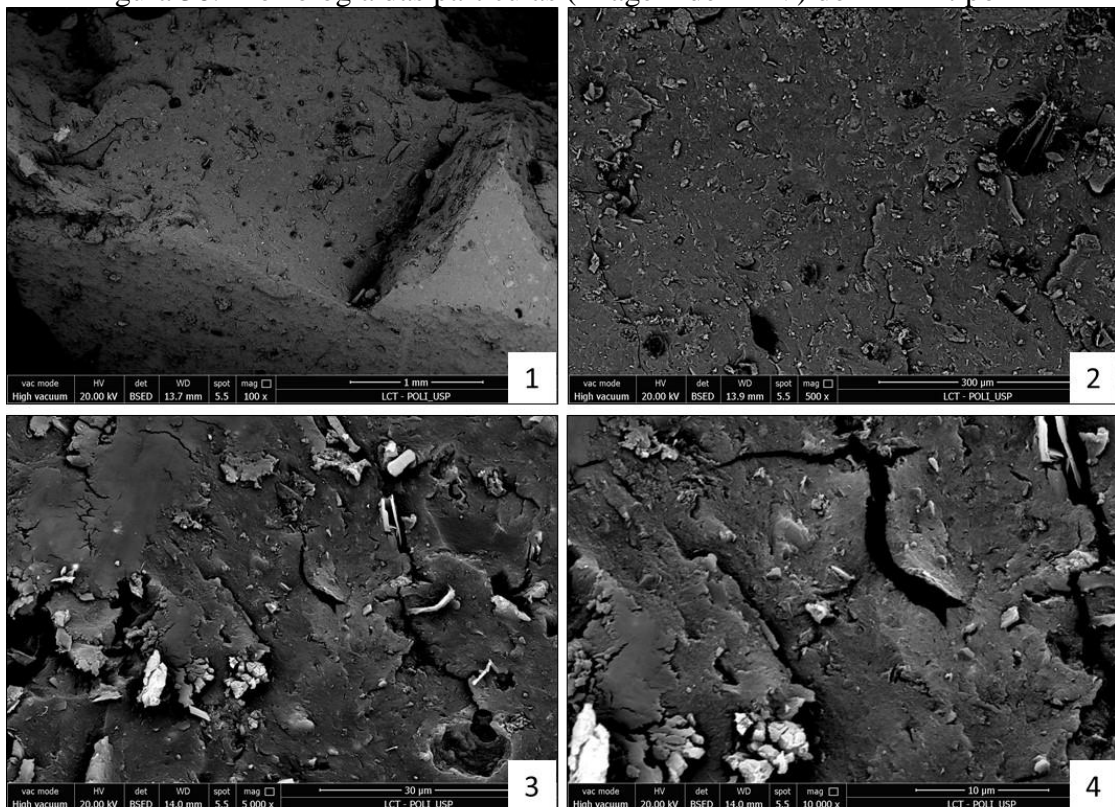
Fonte: Autor (2019)

Figura 35: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo II



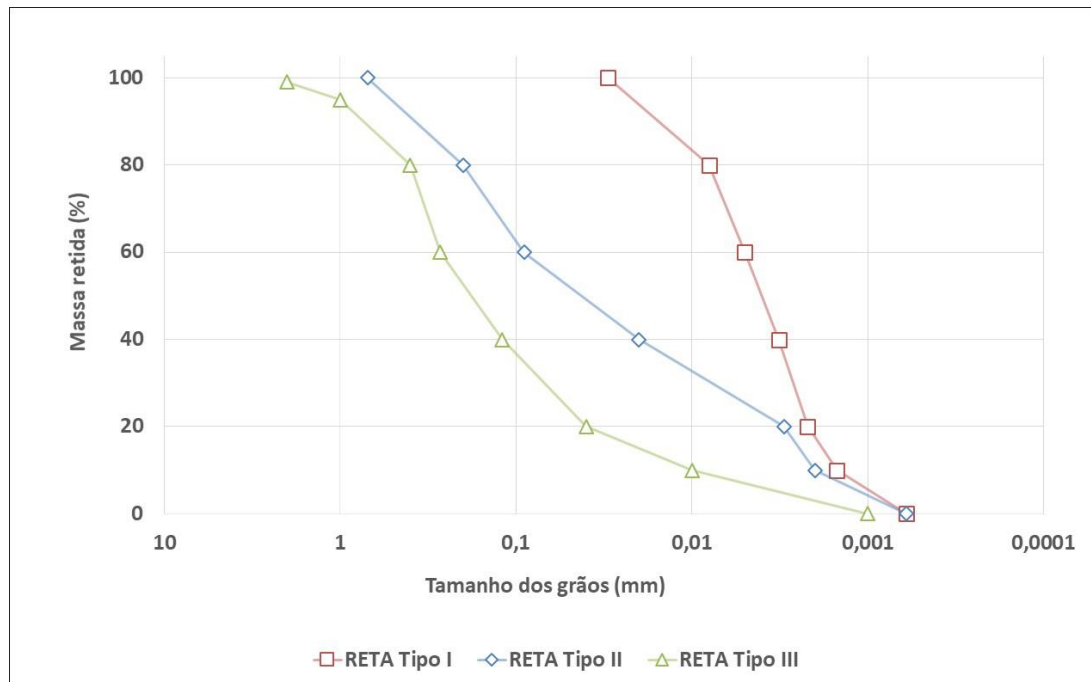
(1) aumento de 100x; (2) aumento de 500x; (3) aumento de 5.000x; (4) aumento de 10.000x
Fonte: Autor (2019)

Figura 36: Morfologia das partículas (imagem de MEV) do RETA tipo III



(1) aumento de 100x; (2) aumento de 500x; (3) aumento de 5.000x; (4) aumento de 10.000x
Fonte: Autor (2019)

Figura 37: Distribuição do tamanho das partículas presentes nos RETAs



Fonte: Autor (2019)

5.3 ENSAIOS DE BANCADA EM TUBO GEOTÊXTIL

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de bancada com o filtro pressurizado em geotêxtil para os diferentes tipos de RETA e polímeros estudados. Os dados são abordados com o devido tratamento estatístico segundo os objetivos traçados pelo trabalho. Assim, para uma melhor apresentação e discussão dos resultados, este capítulo foi dividido em duas partes. A primeira refere-se ao tratamento estatístico por meio da metodologia de superfície de resposta (RSM), que permitiu avaliar individualmente o efeito da concentração inicial de SST do resíduo e da dosagem de polímero para os três tipos de RETAs e três polímeros pesquisados. Já a segunda parte refere-se ao tratamento dos dados pelo método de comparação de médias Anova/Tukey, que permitiu avaliar estatisticamente o efeito do tipo de RETA e do tipo de polímero na filtração em tubo geotêxtil.

5.3.1 Resultados da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM)

Os resultados exibidos e discutidos neste item referem-se aos índices de desempenho medidos durante os ensaios. Os índices foram agrupados de acordo com suas características, assim sendo:

- Índices de retenção de partículas: eficiência de filtração (EF), perda de partículas (PP) e turbidez do filtrado;
- Índices de desaguamento do resíduo: teor de sólidos do resíduo desaguado, percentual de desaguamento (PD) e tempo total de desaguamento.

Como premissa no tratamento estatístico dos dados, adotou-se um nível de significância de 10%, ou seja, todos os valores de regressão com p-valor abaixo de 0,10 foram considerados estatisticamente significantes na resposta, com nível de confiança de 90%.

Cabe ressaltar também que a diferença básica dos delineamentos experimentais DFC 1 para o DFC 2, foi a variação dos níveis testados da variável X_2 (dosagem de polímero), sendo que no DFC 1 foram exploradas dosagens de 0,5, 2,25 e 4,0 mg/gSST, e no DFC 2 a faixa foi ampliada para 4,0, 6,0 e 8,0 mg/gSST. Os níveis da variável X_1 (concentração de SST no resíduo) foram mantidos nos dois delineamentos (5, 12,5 e 20 g/L).

5.3.1.1 Índices de Retenção de Partículas

Serão apresentados e discutidos aqui os dados dos delineamentos de face centrada para os índices de EF e PP. Como o tratamento estatístico pela RSM para o índice turbidez do filtrado resultou similar ao obtido no índice perda de partículas, decidiu-se por não o incluir aqui, estando o mesmo disponível no item Apêndice, no final da tese. Os resultados de turbidez do filtrado serão discutidos com mais detalhes na segunda parte do capítulo, no teste de comparação de médias Anova/Tukey.

As tabelas 20 e 21 mostram os dados encontrados nas duas faixas do delineamento de face centrada para os índices de eficiência de filtração e perda de partículas para os três tipos de resíduos e polímeros.

Tabela 20: Resultados de eficiência de filtração (EF) e perda de partículas (PP) nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de resíduos

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – FAIXA 1																				
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I						RESÍDUO TIPO II						RESÍDUO TIPO III					
			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)		
	X ₁	X ₂	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO
1	5,0	0,5	19,4	41,1	11,0	916	669	1011	19,7	10,8	9,0	913	1013	1035	34,2	42,1	30,2	748	658	793
2	20,0	0,5	33,4	100,0	22,6	3029	0,4	3516	41,0	17,5	39,6	2682	3752	2747	99,9	63,1	58,2	5	1258	1424
3	5,0	4,0	25,9	27,6	14,8	842	822,3	968	71,3	49,3	16,3	326	576	951	99,8	93,1	86,6	2	79	152
4	20,0	4,0	99,9	99,7	78,7	6	11,7	968	100,0	91,5	91,6	2	386	384	99,9	100	99,9	3	1	2
5	5,0	2,0	9,8	15,0	13,1	1025	966,4	987	38,9	28,4	13,3	694	814	985	75,9	70,0	66,6	274	341	379
6	20,0	2,0	87,4	100,0	30,7	574	0,5	3152	100,0	83,5	53,3	1	750	2125	99,9	99,8	92,6	3	8	254
7	12,5	0,5	14,2	20,9	12,0	2437	2248	2499	15,0	10,0	10,0	2416	2557	2557	88,7	1,5	2,1	258	2239	2225
8	12,5	4,0	66,0	72,5	73,5	967	782,1	754	97,8	90,1	23,0	61	282	2187	99,9	99,4	99,6	2	13	9
9	12,5	2,0	32,5	22,1	30,5	1919	2213	1975	92,6	48,8	17,8	210	1454	2337	98,9	99,0	81,1	25	23	429
10	12,5	2,0	32,0	23,60	31,00	1932	2170	1955	92,8	48,7	17,1	206	1457	2354	98,8	99,1	82,1	27	22	408
11	12,5	2,0	32,8	22,68	31,20	1910	2196	1977	92,4	47,9	19,6	216	1480	2285	98,9	98,9	81,6	26	25	417

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico); EF (Eficiência de filtração)

Fonte: Autor (2019)

Tabela 21: Resultados de eficiência de filtração (EF) e perda de partículas (PP) nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – FAIXA 2																							
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I						RESÍDUO TIPO II						RESÍDUO TIPO III								
			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)			Eficiência de Filtração (%)			Perda de Partículas (g/m ²)					
	X ₁	X ₂	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO
1	5,0	4,0	25,9	27,6	14,8	841	822,3	967	71,3	49,3	16,3	325,8	575,8	951	99,8	93,1	86,6	1,83	78,9	152,3			
2	20,0	4,0	99,9	99,7	78,7	5,9	11,73	967	100,0	91,5	91,6	1,8	386,4	384	99,9	100,0	99,9	2,73	1,4	2,3			
3	5,0	8,0	45,9	66,3	84,1	615	383,3	180	95,7	76,1	53,7	48,6	271,8	526	99,9	94,8	95,6	1,59	58,8	49,6			
4	20,0	8,0	99,8	99,8	100,0	9,7	7,58	0,5	100,0	99,7	100,0	1,4	15,9	2	100,0	100,0	100,0	0,68	0,9	0,5			
5	5,0	6,0	36,8	18,5	48,9	718	925	581	84,6	59,6	39,8	175,3	459,6	684	99,9	94,0	98,5	1,68	68,7	16,7			
6	20,0	6,0	99,5	99,9	100,0	21,7	3,64	0,5	100,0	99,5	97,5	2,0	22,7	114	100,0	100,0	100,0	0,91	1,1	0,5			
7	12,5	4,0	66,0	72,5	73,5	967	782	754	97,8	90,1	23,0	61,4	282,1	2187	99,9	99,4	99,6	1,82	12,7	9,4			
8	12,5	8,0	99,9	93,1	92,8	3,0	196	203	99,9	94,4	88,4	3,4	159,1	329	99,9	99,7	100,0	2,27	7,7	1,1			
9	12,5	6,0	88,5	80,4	60,9	326	555	1109	98,1	90,4	62,7	53,0	272,7	1059	99,9	99,7	100,0	1,59	8,0	1,1			
10	12,5	6,0	89,2	81,20	60,5	306	534	1106	98,1	90,7	63,9	54,8	263,4	1026	99,9	99,7	100,0	2,05	7,5	1,1			
11	12,5	6,0	87,9	80,72	60,4	343	547	1102	98,1	91,3	65,7	54,1	247,0	975	99,9	99,7	100,0	2,50	7,0	1,1			

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico); EF (Eficiência de filtração)

Fonte: Autor (2019)

5.3.1.1.1 Eficiência de Filtração

A eficiência de filtração é o índice de desempenho mais utilizado na literatura para avaliar o grau de retenção de partículas sólidas pelos tubos geotêxteis. A tabela 22 mostra o tratamento estatístico para os dados de eficiência de filtração (EF) para todos os tipos de RETA e de polímeros pesquisados. Valores de p-valor abaixo de 0,10 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X_1 ou X_2) sobre a resposta estudada (EF), com nível de confiança de 90%. Nota-se, pelos valores de p-valor, que a variável X_1 (concentração inicial de SST do resíduo) possui efeito significativo em quase todos os tipos de tratamentos (tipo de RETA e tipo de polímero), com exceção feita ao RETA tipo III para o polímero aniônico na faixa de dosagens de 0,5 a 4,0 mgP/gSST (DFC 1). Já a variável X_2 (dosagem do polímero) também teve influência na variável resposta na maioria dos delineamentos, não tendo efeito estatístico somente no DFC 1 para o RETA tipo I com o polímero aniônico. Contudo, no DFC 2 (dosagens de 4,0 a 8,0 mgP/gSST) a variável passou a ter significância estatística para a EF.

Tabela 22: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta eficiência de filtração (EF) para todos os tipos de RETA e polímeros estudados

P-VALOR – EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (EF)						
Variáveis	RETA TIPO I					
	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_{1-(L)}$	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,012*	0,002*
$X_{1-(Q)}$	<0,001*	<0,001*	0,016*	0,066*	0,1602	0,9317
$X_{2-(L)}$	0,1814	<0,001*	0,3984	0,044*	0,003*	0,006*
$X_{2-(Q)}$	<0,001*	0,5215	0,1798	0,1787	0,1361	0,3450
$X_1 \cdot X_2$	0,8264	0,1847	0,7093	0,089*	0,055*	0,074*
RETA TIPO II						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_{1-(L)}$	0,013*	<0,001*	0,006*	<0,001*	<0,001*
$X_{1-(Q)}$	0,3218	0,004*	0,9419	0,001*	0,001*	0,3490
$X_{2-(L)}$	<0,001*	0,004*	<0,001*	0,004*	0,002*	0,003*
$X_{2-(Q)}$	0,018*	0,9680	0,4093	0,8558	0,5795	0,4555
$X_1 \cdot X_2$	0,8106	0,002*	0,1803	0,041*	0,008*	0,2518
RETA TIPO III						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_{1-(L)}$	0,001*	0,004*	0,2893	<0,001*	0,081*
$X_{1-(Q)}$	0,018*	0,2915	0,6498	<0,001*	0,3936	0,100*
$X_{2-(L)}$	0,002*	0,029*	0,003*	0,001*	<0,001*	0,1844
$X_{2-(Q)}$	0,2887	0,2472	0,041*	0,4413	0,063*	0,2541
$X_1 \cdot X_2$	0,001*	1,000	0,7373	0,001*	0,6323	0,091*

*p-valor $\leq 0,10$; L - termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor (2019)

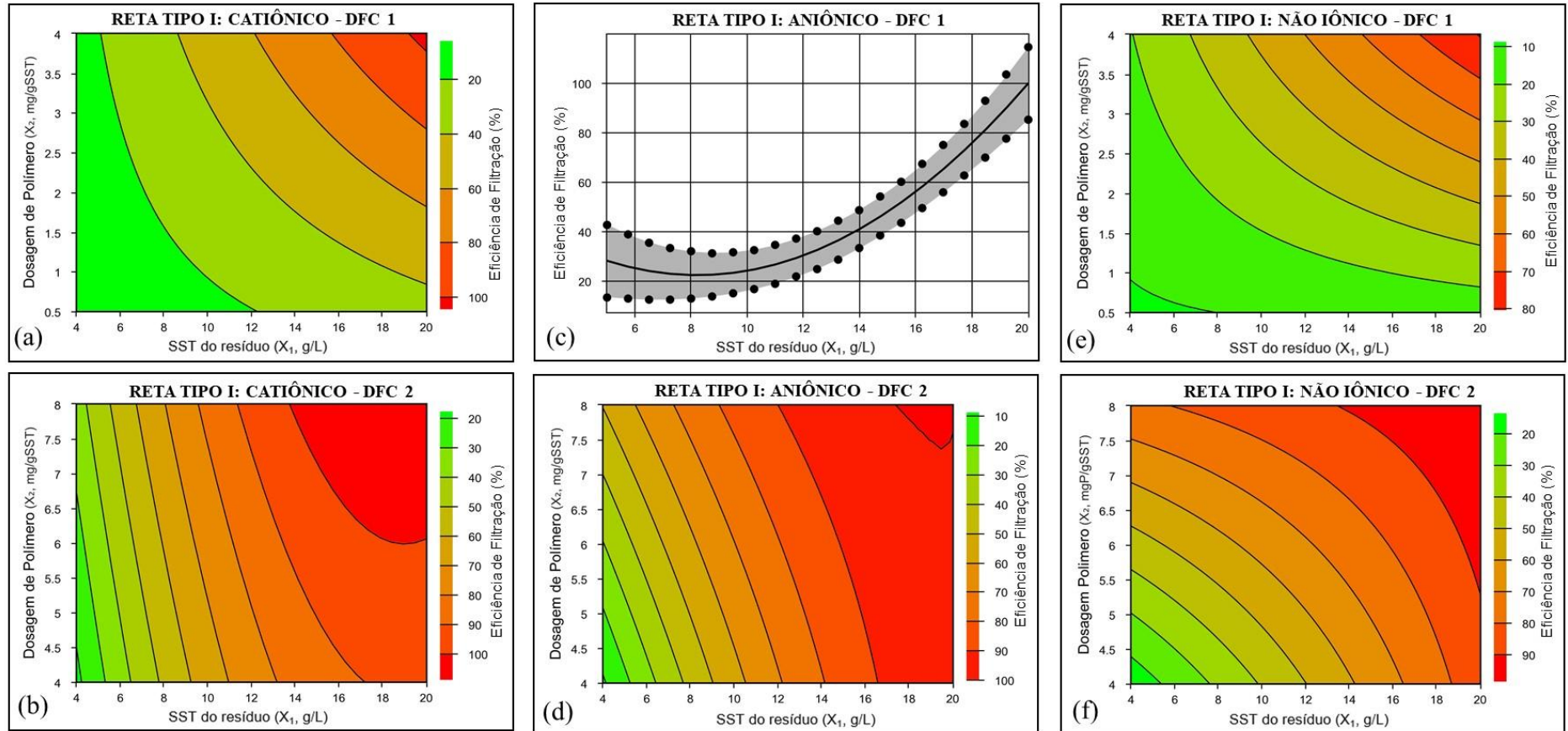
Considerando somente os parâmetros com significância estatística (p -valor $\leq 0,10$), foram elaborados os modelos matemáticos que expressam a correlação entre as variáveis dependentes (X_1 e X_2) com a resposta avaliada (EF). Após a validação estatística dos modelos matemáticos por meio da análise de variância (ANOVA), os gráficos de superfície de resposta para cada índice pesquisado foram gerados. Devido ao grande volume de informações produzidas na obtenção e validação dos modelos matemáticos, esses dados são apresentados ao final da tese, no apêndice A.

Os gráficos das figuras 38, 39 e 40 mostram as superfícies de resposta para os polímeros catiônico, aniônico e não iônico, respectivamente. Todos os gráficos gerados estão com os valores da eficiência de filtração em função da concentração inicial de SST do resíduo (variável X_1 no eixo das abcissas) e a dosagem de polímero (variável X_2 no eixo das ordenadas). Exceção feita para o DFC 1 do polímero aniônico RETA tipo I, que está em função apenas da variável X_1 , e do DFC 1 do polímero aniônico para o RETA tipo III que está em função somente para variável X_2 .

Analisando as superfícies de resposta dos gráficos para o RETA tipo I (figura 38), nota-se nitidamente a elevação dos valores de eficiência de filtração à medida que se aumentam associadamente as variáveis X_1 e X_2 . Observa-se, nos delineamentos com dosagens de polímero na faixa de 0,5 a 4,0 mgP/gSST (figuras 38a, 38c e 38e), que valores de EF acima de 90% somente foram alcançados na região de máximo valor de X_1 (20 g/L) e máximo valor de X_2 (4,0 mgP/gSST). Para concentrações de X_1 menores que 10 g/L, a eficiência de filtração diminuiu e não alcançou valores de 50% de remoção.

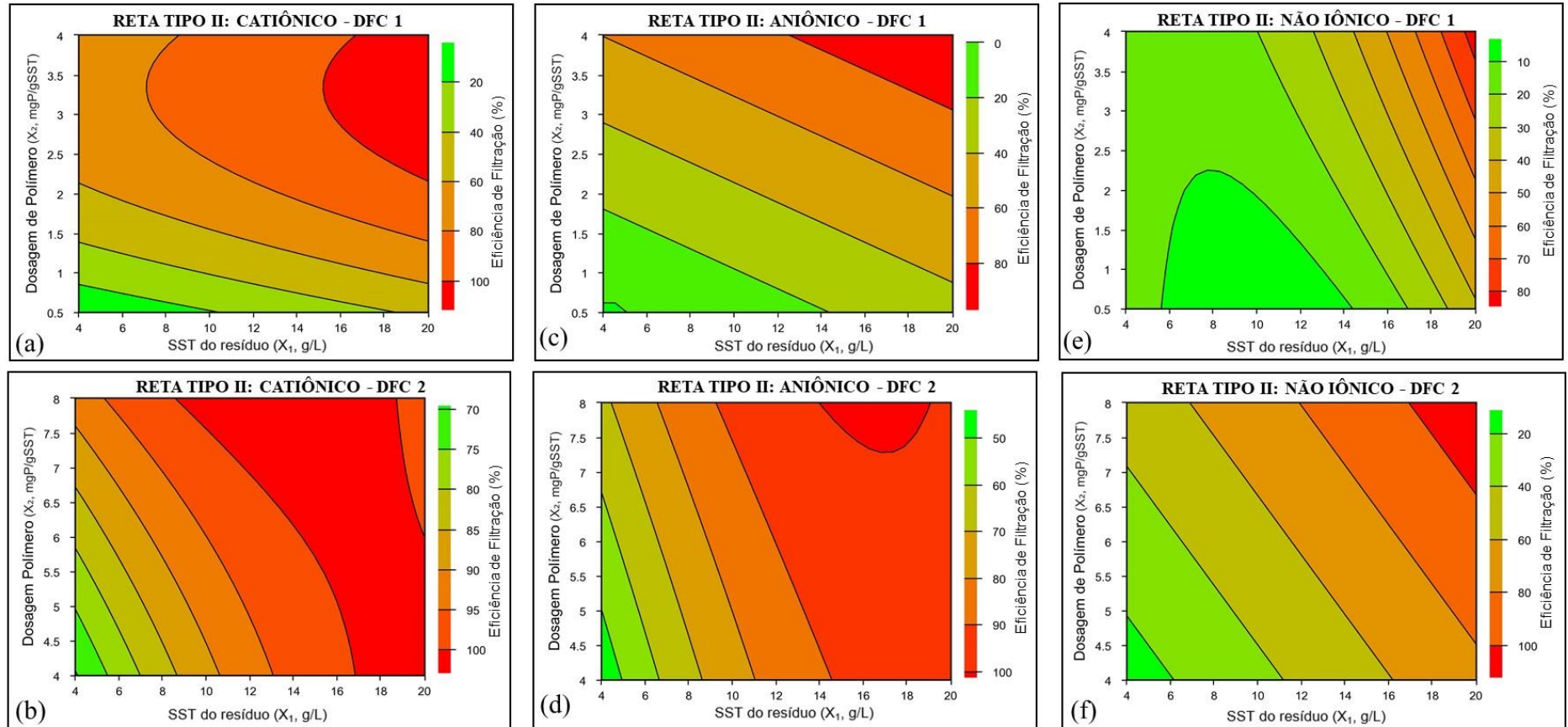
Assim como nos resultados do RETA tipo I, nos RETAs tipo II e tipo III (figuras 39 e 40) também ocorreu um aumento da EF à medida que se elevou a concentração inicial de SST do resíduo. O que se verifica é que a variável X_1 exerce grande influência no processo de retenção dos sólidos nos tubos geotêxteis. A dosagem de polímero também exerceu papel fundamental nos resultados de EF. Verifica-se, pelas superfícies de resposta, que o alcance de valores de EF acima de 90% nas regiões onde a concentração inicial de SST no resíduo é menor (< 5 g/L) só foi possível com dosagens de polímero mais elevadas ($> 7,0$ mgP/gSST). Entretanto, para alguns tipos de RETA e polímeros, mesmo com altas dosagens dos condicionantes químicos nas regiões de X_1 abaixo de 5 g/L, os valores de EF não alcançaram 80% de remoção, como pode ser visto para o polímero não iônico no RETA tipo II (figura 39f) e para o polímero não iônico no RETA tipo I (figura 38f).

Figura 38: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



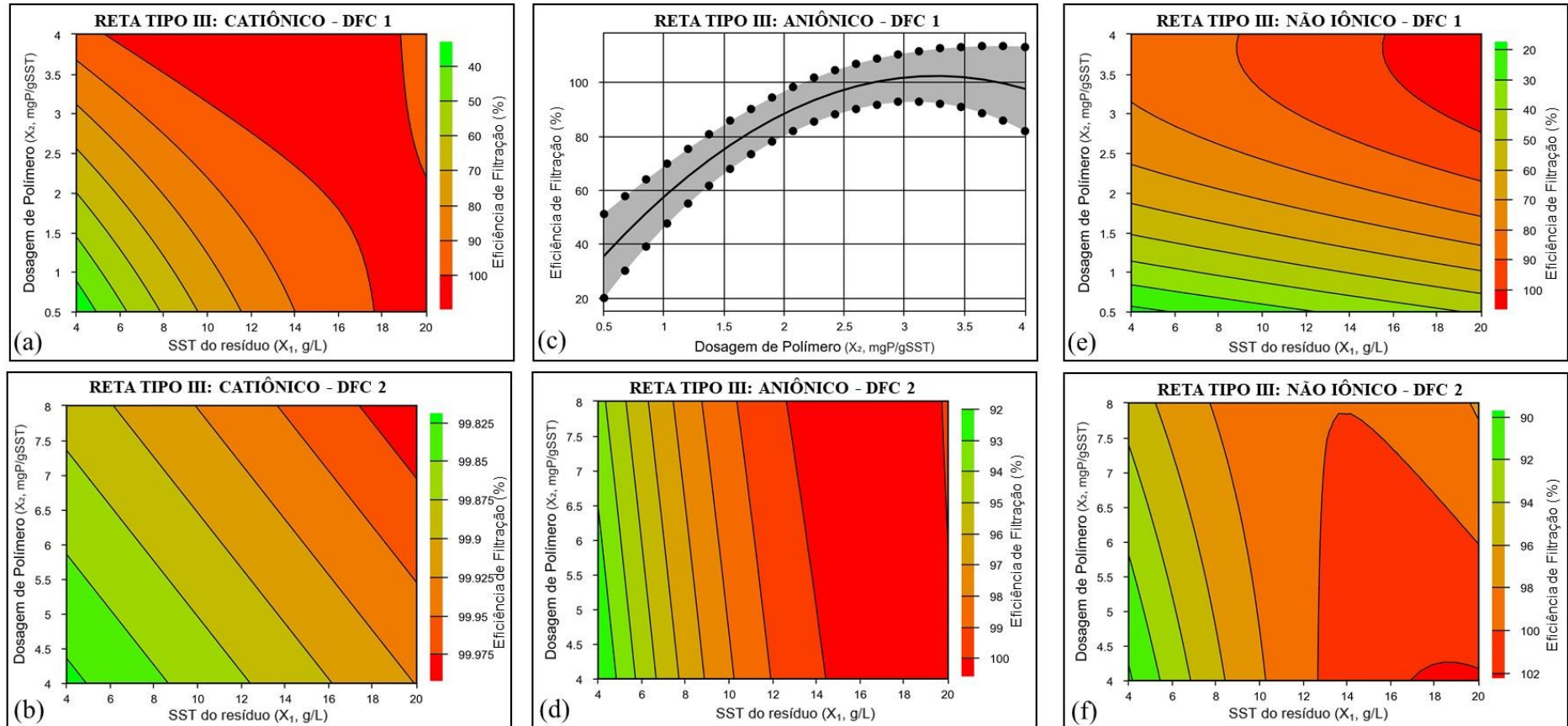
Fonte: Autor (2019)

Figura 39: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

Figura 40: Superfícies de resposta do índice eficiência de filtração para o RETA tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

5.3.1.1.2 Perda de partículas

A tabela 23 mostra o tratamento estatístico dos dados obtidos para o índice perda de partículas (PP) nos três tipos de RETA e polímeros estudados. Os valores para este índice indicam similaridade das significâncias estatísticas das variáveis concentração inicial de SST do resíduo (X_1) e da dosagem de polímero (X_2), com o encontrado para o índice eficiência de filtração. Novamente a variável X_1 não teve efeito estatístico para o RETA tipo III com polímero aniônico DFC 1, e a variável X_2 também não obteve efeito para o RETA tipo I DFC 1, sendo que as demais combinações de tipo de resíduo e polímero foram estatisticamente significantes para as duas variáveis (X_1 e X_2), com nível de confiança de 90%.

Tabela 23: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta perda de partículas (PP) para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados

P-VALOR – PERDA DE PARTÍCULAS (PP)						
RESÍDUO TIPO I						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_1 - (L)$	0,3887	<0,001*	0,060*	0,001*	<0,001*	0,4071
$X_1 - (Q)$	<0,001*	0,7898	0,006*	0,5134	0,8116	0,062*
$X_2 - (L)$	<0,001*	<0,034*	0,2928	0,002*	<0,001*	<0,016*
$X_2 - (Q)$	0,6554	0,6247	0,2411	0,7538	0,038*	0,4624
$X_1 \cdot X_2$	<0,001*	0,6348	0,8817	0,7215	0,022*	0,8037
RESÍDUO TIPO II						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_1 - (L)$	0,5106	<0,001*	0,054*	0,001*	0,014*	0,082*
$X_1 - (Q)$	0,8045	0,011*	0,2997	0,5134	<0,001*	0,012*
$X_2 - (L)$	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,002*	0,005*	0,014*
$X_2 - (Q)$	0,011*	0,6419	0,2932	0,7538	0,5282	0,5638
$X_1 \cdot X_2$	0,030*	<0,001*	0,012*	0,7215	0,006*	0,9573
RESÍDUO TIPO III						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_1 - (L)$	0,001*	0,004*	0,8737	<0,001*	0,6986	0,031*
$X_1 - (Q)$	0,028*	0,2915	0,4149	<0,001*	0,093*	0,100*
$X_2 - (L)$	0,001*	0,029*	0,003*	0,001*	<0,001*	0,1844
$X_2 - (Q)$	0,041	0,2472	0,062*	0,2657	0,075*	0,2541
$X_1 \cdot X_2$	0,001*	1,000	0,4968	0,001*	0,3198	0,084*

*p-valor $\leq 0,10$; L - termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor (2019)

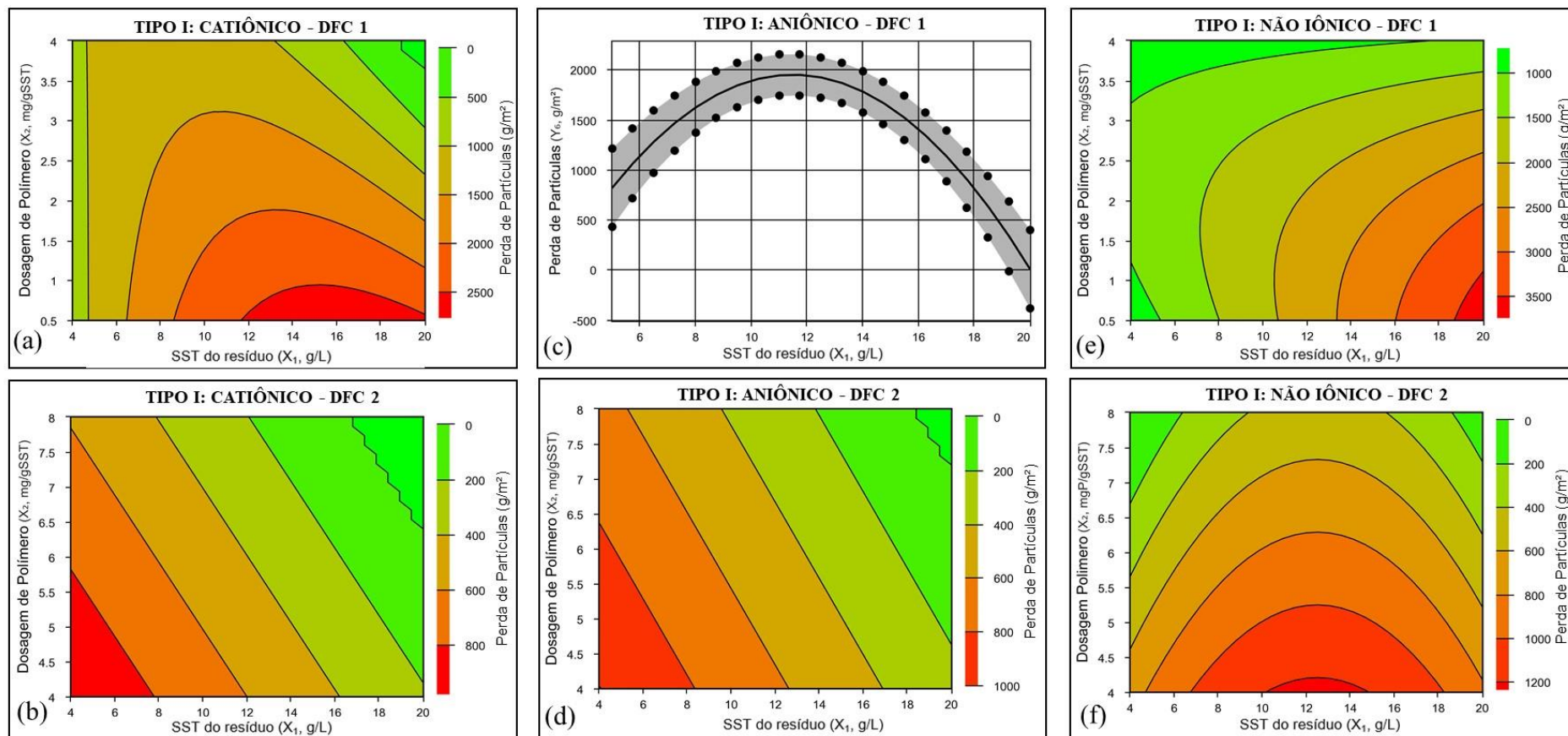
O índice PP mede a quantidade de sólidos (g) carreados em relação à área efetiva (m^2) do geotecido. Foi um índice adotado na literatura para comparar resultados de diferentes tipos de materiais finos a serem desaguados em tubos geotêxteis. As figuras 41, 42 e 43 apresentam os gráficos com as superfícies de resposta para a perda de partículas para todos os resíduos e polímeros pesquisados.

Aydilek e Edil (2002) propuseram um limite de PP para desempenho bem-sucedido de 1.900 g/m^2 em sistemas de desaguamento em tubo geotêxtil. Usando este valor como referência, visualiza-se, nos gráficos de superfície de resposta, que todas as condições de RETA e dosagens de polímeros conseguiram atingir essa perda de partículas, com dosagens de até $4,0 \text{ mg/gSST}$. Bhatia *et al.* (2013) relatam que atualmente, com a utilização do condicionamento químico no desaguamento de resíduos, o limite de perda de partículas proposto por Aydilek e Edil (2002) se torna muito permissivo. Segundo os autores, com a utilização do condicionamento químico, permite-se uma retenção muito maior das partículas, pois se formam flocos significativamente maiores que o tamanho natural das partículas iniciais do resíduo.

Guimarães *et al.* (2014) verificaram o desaguamento de RETA (11 g/L SST) em uma unidade piloto pressurizada de tubo geotêxtil. Os autores conseguiram valores de PP entre $0,4$ e $0,6 \text{ g/m}^2$, utilizando polímero catiônico com dosagem de 9 mg/gSST . Estes resultados corroboram as afirmações de Bhatia *et al.* (2013), segundo as quais, com a utilização de polímeros, a retenção de partículas finas se torna muito mais eficiente.

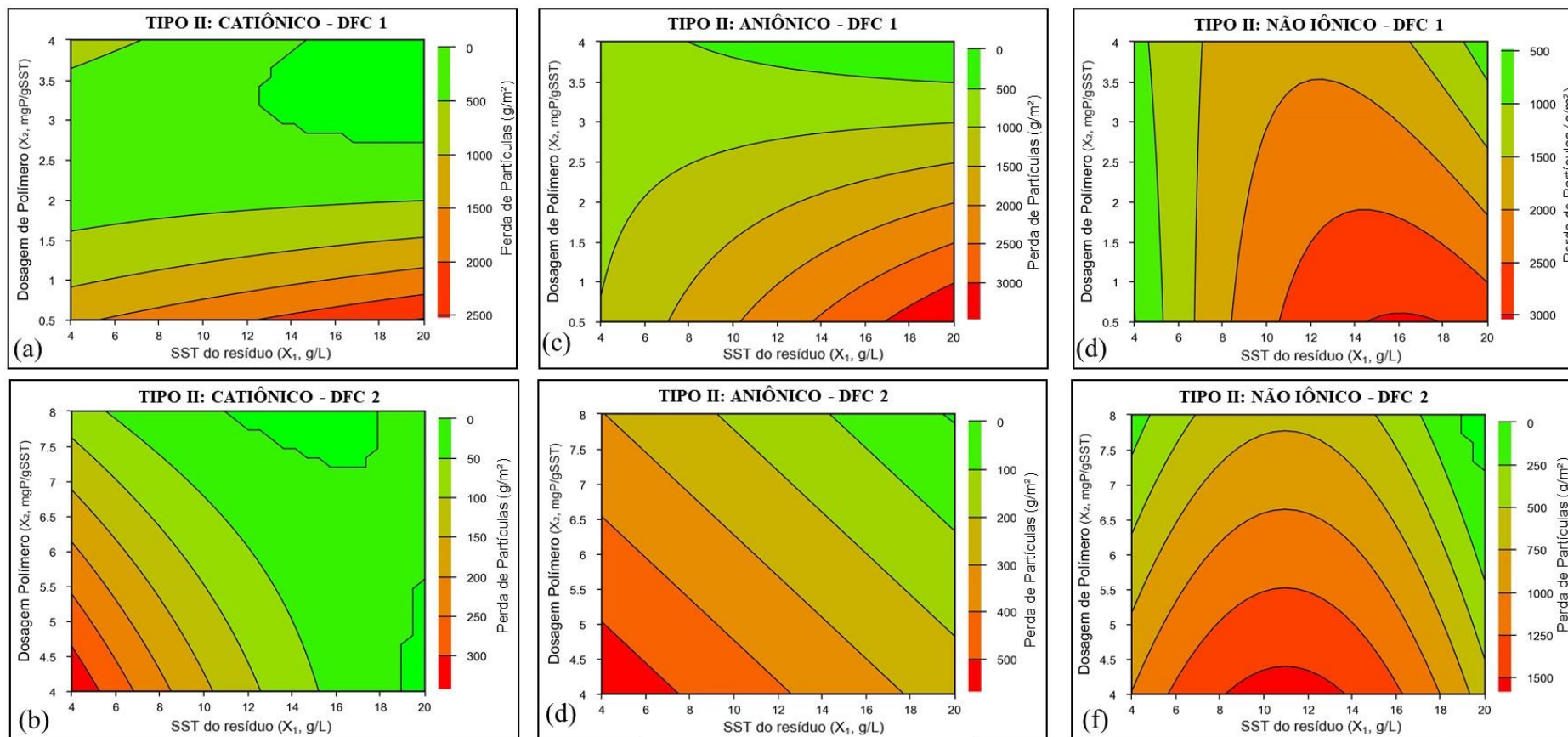
Quando são comparados os resultados da superfície de resposta do presente trabalho, com os valores de PP encontrados por Guimarães *et al.* (2014), nota-se similaridade. Verifica-se que quanto maiores os valores das variáveis X_1 e X_2 menores foram os valores de perda de partículas. Para os três tipos de RETA, valores de PP abaixo de 1 g/m^2 estão situados na região de 20 g/L (X_1), com dosagem de polímero (X_2) de $8,0 \text{ mg/gSST}$. Para concentrações de SST inicial do resíduo abaixo de 10 g/L , somente o RETA tipo III com polímero catiônico (figura 43b) conseguiu alcançar valores de perda de partículas semelhante ao encontrado na região de 20 g/L de SST do resíduo.

Figura 41: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



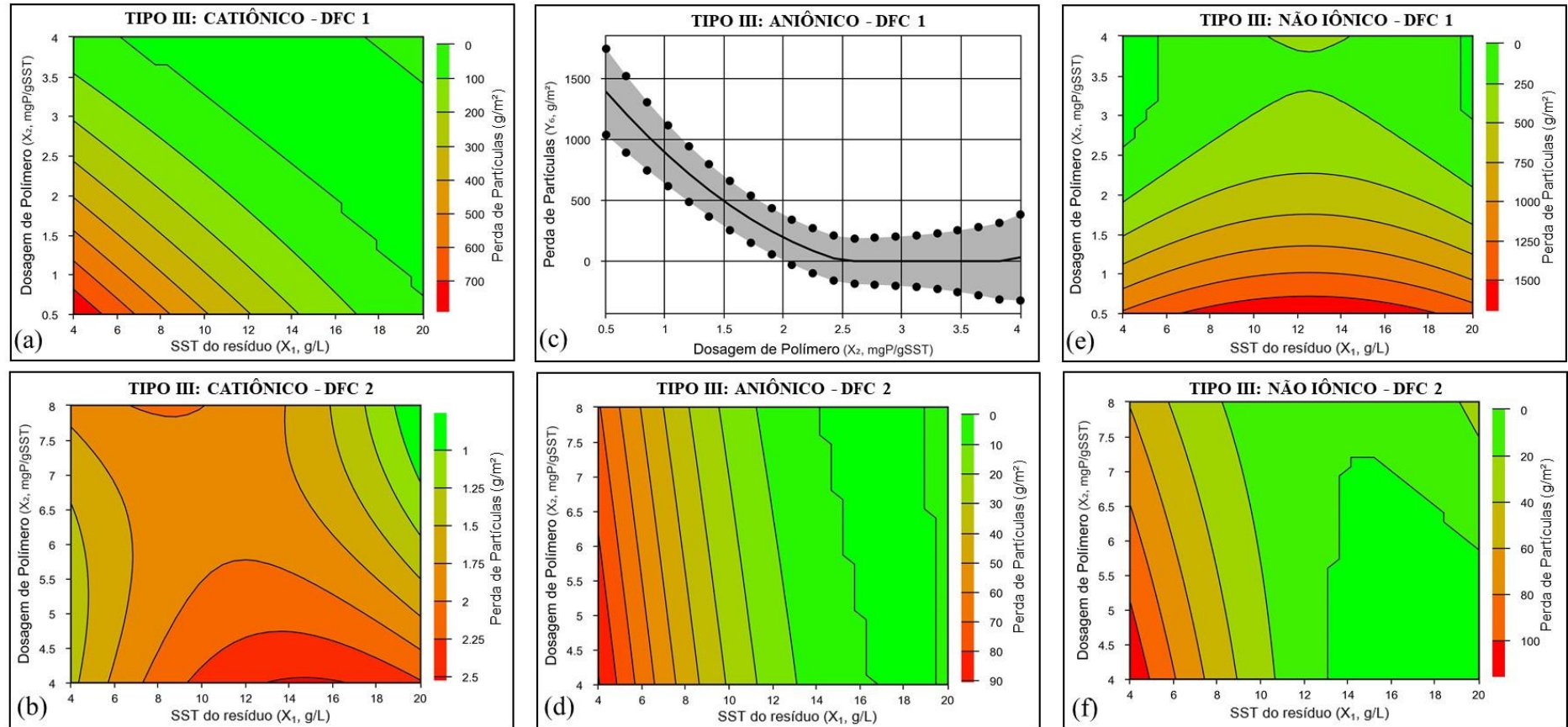
Fonte: Autor (2019)

Figura 42: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

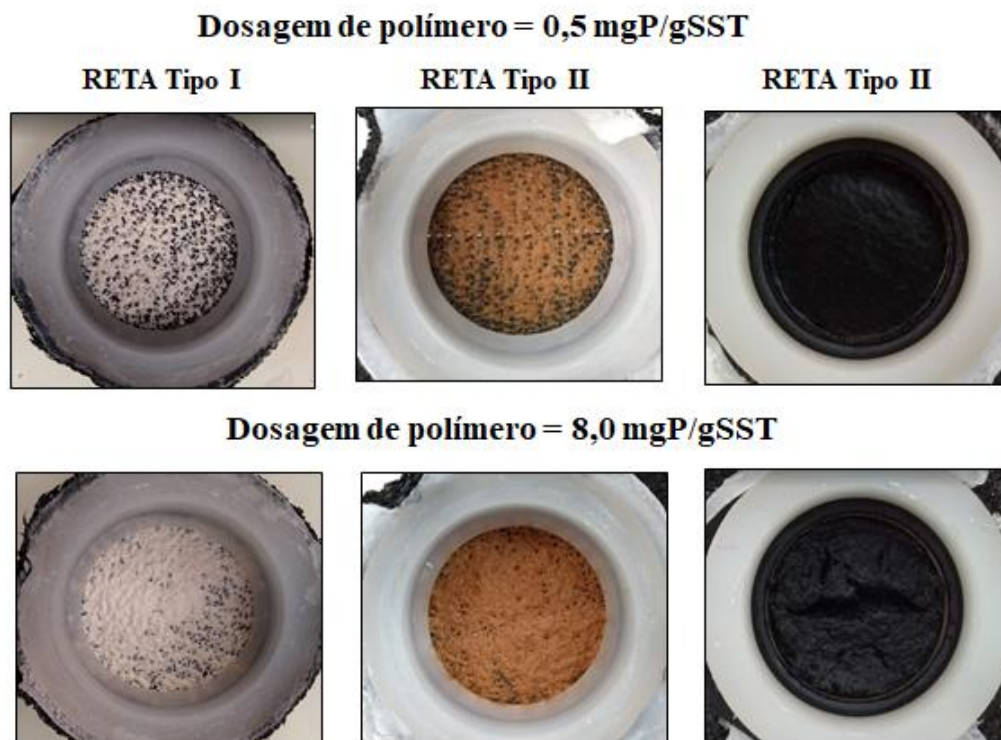
Figura 43: Superfícies de resposta do índice perda de partículas para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

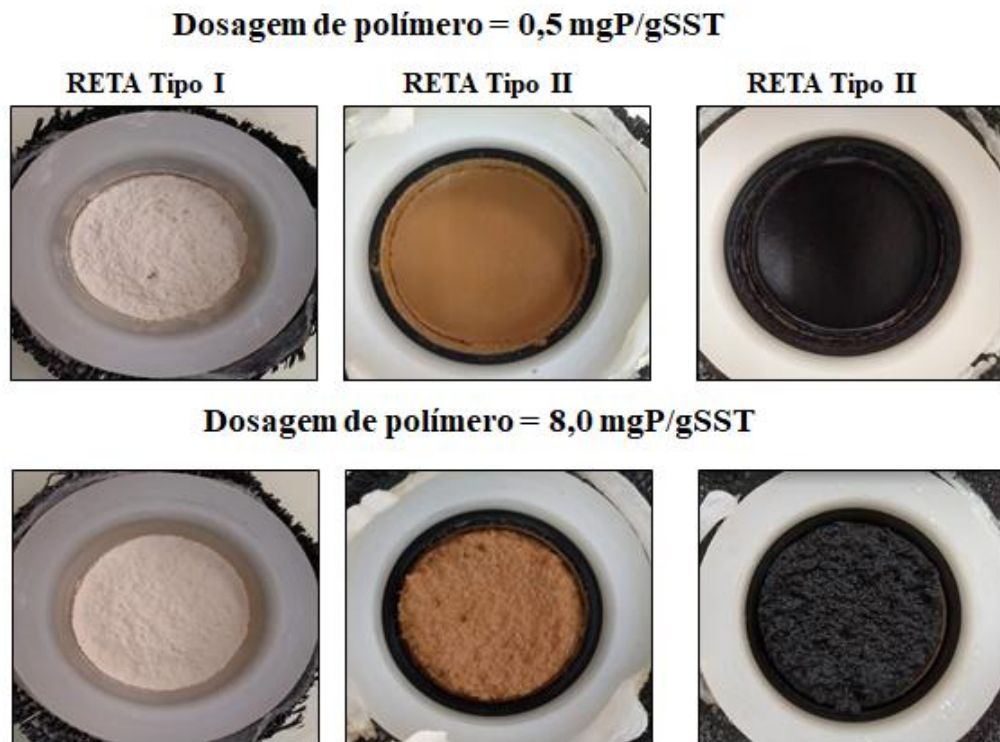
Kutay e Aydilek (2004) afirmam que resíduos a serem desaguados que possuem menores concentrações de sólidos têm pouca capacidade de retenção de partículas finas durante a filtração em geotêxtil. As figuras 44 e 45 mostram as fotos no final dos ensaios do filtro pressurizado em geotêxtil para o polímero catiônico com resíduos de 5 g/L e 20 g/L de concentração inicial de SST. Observa-se claramente a menor retenção de sólidos nos ensaios com o resíduo de 5 g/L de SST (figura 44) que, mesmo com dosagem maior de polímero (8,0 mgP/gSST), ainda foram observados espaços vazios no geotêxtil para o RETA tipo I e tipo II. Já nos ensaios com concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L (figura 45), apenas 0,5 mg/gSST de polímero foram suficientes para que o material ficasse completamente retido no geotêxtil.

Figura 44: Aspecto do filtro geotêxtil ao final dos ensaios - polímero catiônico com os três tipos de RETA e para concentração inicial de SST do resíduo de 5 g/L



Fonte: Autor (2019)

Figura 45: Aspecto do filtro geotêxtil ao final dos ensaios - para o polímero catiônico com os três tipos de RETA e para concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L



Fonte: Autor (2019)

5.3.1.2 Índices de Desaguamento do Resíduo

A capacidade de remoção da alta umidade contida nos RETAs é um dos principais objetivos dos sistemas que utilizam a filtração em tubo geotêxtil. Os índices usados na pesquisa para medir essa remoção de umidade foram o percentual de desaguamento (PD), o teor de sólidos no resíduo desaguado e o tempo total de desaguamento. Assim como a eficiência de filtração é um índice de remoção de sólidos pelo geotêxtil, o percentual de desaguamento é um índice que mensura a remoção de umidade do RETA. O teor de sólidos no resíduo desaguado é um índice muito prático e de ampla utilização na rotina operacional de sistemas de desaguamento, pois é a partir dele que se tomam decisões sobre a melhor forma de destinação final do resíduo.

As Tabelas 24 e 25 apresentam os resultados de PD e teor de sólidos obtidos nos delineamentos de faces centradas para os três tipos de RETA e polímeros estudados.

Tabela 24: Resultados do teor de sólidos do resíduo desaguado e percentual de desaguamento (PD) nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de resíduos

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – FAIXA 1																					
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I						RESÍDUO TIPO II						RESÍDUO TIPO III						
			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)			
	X ₁	X ₂	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	
1	5,0	0,5	32,4	42,4	33,1	99	99	99,1	14,3	10,3	10,9	96,8	95,5	95,6	6,0	7,6	8,9	91,9	93,7	94,7	
2	20,0	0,5	34,6	41,2	37,7	96	97	96,6	18,7	16,5	20,6	91,0	89,5	92,0	4,1	4,3	6,5	63,5	65,5	77,7	
3	5,0	4,0	33,5	33,2	35,1	99	99	99,2	14,8	12,4	12,3	96,9	96,2	96,2	5,9	6,7	8,2	91,7	92,7	94,2	
4	20,0	4,0	40,7	38,4	42,9	97	97	97,2	12,8	12,4	16,6	86,0	85,4	89,6	6,2	5,6	6,1	76,4	74,0	76,0	
5	5,0	2,0	33,2	35,6	33,3	99	99	99,1	12,4	10,4	12,3	96,2	95,4	96,2	8,3	7,2	7,2	94,3	93,3	93,3	
6	20,0	2,0	41,3	41,2	40,1	97	97	96,9	13,2	14,1	19,7	86,4	87,4	91,6	5,9	5,7	6,0	75,2	74,1	75,6	
7	12,5	0,5	31,7	41,3	32,9	97	97	97,4	17,0	15,4	13,5	94,3	93,3	92,4	5,5	4,1	7,3	82,3	75,8	86,8	
8	12,5	4,0	34,8	40,3	40,3	98	98	98,1	14,7	14,9	13,6	93,2	93,3	92,5	5,5	5,4	4,9	82,3	82,0	80,0	
9	12,5	2,0	32,2	40,9	36,9	97	97	97,8	19,5	15,2	13,9	95,2	93,5	92,8	5,9	5,5	5,6	83,4	82,3	82,5	
10	12,5	2,0	31,0	40,2	37,2	97,4	96,6	97,9	19,2	15,0	14,3	94,8	93,3	92,9	5,6	5,6	5,5	83,4	82,1	82,1	
11	12,5	2,0	31,8	40,6	36,5	97,3	96,7	97,6	19,3	15,2	13,5	95,0	93,5	92,5	5,8	5,7	5,6	83,1	82,5	82,6	

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico).

Fonte: Autor (2019)

Tabela 25: Resultados do teor de sólidos do resíduo desaguado e percentual de desaguamento (PD) nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – FAIXA 2																				
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I						RESÍDUO TIPO II						RESÍDUO TIPO III					
			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)			Teor de Sólidos (%)			Percentual de Desaguamento (%)		
	X ₁	X ₂	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO
1	5,0	4,0	33,5	33,2	35,1	99,1	99	99,2	14,8	12,4	12,3	96,9	96,2	96,2	5,9	6,7	8,2	91,7	92,7	94,2
2	20,0	4,0	40,7	38,4	42,9	97,0	97	97,2	12,8	12,4	16,6	86,0	85,4	89,6	6,2	5,6	6,1	76,4	74,0	76,0
3	5,0	8,0	31,9	29,1	40,5	99,3	99	99,3	18,9	15,8	14,3	97,7	97,2	96,8	5,6	6,5	7,3	91,3	92,5	93,4
4	20,0	8,0	40,3	28,3	42,5	96,9	95	97,2	11,7	11,5	15,5	84,4	84,1	88,7	5,4	5,5	5,9	72,8	73,4	75,3
5	5,0	6,0	32,4	32,2	38,0	99,0	99	99,3	19,0	12,8	13,6	97,7	96,4	96,6	6,6	6,7	6,9	92,7	92,7	93,0
6	20,0	6,0	40,6	38,4	43,0	97,0	97	97,3	12,9	12,3	15,8	86,1	85,2	89,0	6,0	5,6	6,2	75,9	73,6	76,4
7	12,5	4,0	34,8	40,3	40,3	97,6	98	98,1	14,7	14,9	13,6	93,2	93,3	92,5	5,5	5,4	4,9	82,3	82,0	80,0
8	12,5	8,0	39,6	33,0	42,5	98,0	98	98,2	16,5	13,5	17,6	94,1	92,5	94,5	5,5	5,1	5,5	82,1	80,6	82,3
9	12,5	6,0	40,2	34,3	42,0	98,1	98	98,2	16,0	14,1	18,6	93,8	92,8	94,8	5,7	5,1	5,2	82,9	80,7	81,0
10	12,5	6,0	40,0	34,8	41,5	97,9	98,1	98,2	15,8	14,3	17,9	93,5	93,0	94,6	5,6	4,9	5,1	82,5	80,2	80,4
11	12,5	6,0	39,8	34,7	42,3	97,7	98,1	98,2	15,2	14,0	18,5	93,6	92,9	94,8	5,8	5,0	5,2	83,3	80,5	81,1

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico).

Fonte: Autor (2019)

5.3.1.2.1 Percentual de Desaguamento (PD)

A tabela 26 expõe o tratamento estatístico para os dados do percentual de desaguamento nos três tipos de RETA e polímeros. Analisando os valores de p-valor da tabela, o que se verifica para este índice de desempenho é a maior influência que a variável X_1 (concentração inicial de SST do resíduo) possui sobre a resposta (PD), em comparação com a variável X_2 (dosagem de polímero). A variável X_1 obteve efeito estatístico em todas as combinações de RETAs e polímeros. A variável X_2 não obteve efeito nos seguintes tratamentos: RETA tipo I com os polímeros catiônico (DFC 2) e aniônico (DFC 1), e RETA tipo I, II e III especificamente para o polímero não iônico (DFC 2). Detalhe importante é que em alguns casos a falta de efeito estatístico aconteceu devido a menor dosagem de polímero (0,5 a 4,0 mgP/gSST) DFC 1, e em outros pela dosagem elevada de polímero (4,0 a 8,0 mgP/gSST) DFC 2.

Tabela 26: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta percentual de desaguamento (PD) para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados

P-VALOR – PERCENTUAL DE DESAGUAMENTO (PD)						
Variáveis	RESÍDUO TIPO I					
	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_1 - (L)$	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$X_1 - (Q)$	<0,001*	0,0912	0,004*	0,2915	0,013	0,1648
$X_2 - (L)$	<0,001*	0,3057	0,3429	0,110*	0,003	0,1262
$X_2 - (Q)$	0,9764	0,9437	0,2153	0,2915	0,9525	0,1297
$X_1 \cdot X_2$	<0,001*	0,4416	1,0000	0,060*	0,087	0,2124
RESÍDUO TIPO II						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_1 - (L)$	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$X_1 - (Q)$	0,008*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,004*	0,012*
$X_2 - (L)$	0,046*	0,8990	0,019*	0,100*	0,090*	0,3835
$X_2 - (Q)$	0,8431	0,2425	0,8120	0,7490	0,100*	0,2607
$X_1 \cdot X_2$	0,040*	0,027*	0,001*	0,004*	0,006*	0,3329
RESÍDUO TIPO III						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_1 - (L)$	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$X_1 - (Q)$	0,9593	0,026*	0,062*	<0,001*	0,025*	<0,001*
$X_2 - (L)$	0,033*	0,030*	0,008*	0,083*	0,037*	0,7675
$X_2 - (Q)$	0,067*	0,039*	0,021*	0,2443	0,2875	0,7955
$X_1 \cdot X_2$	0,013*	0,034*	0,016*	0,7238	0,7025	0,9412

*p-valor $\leq 0,10$; L - termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor (2019)

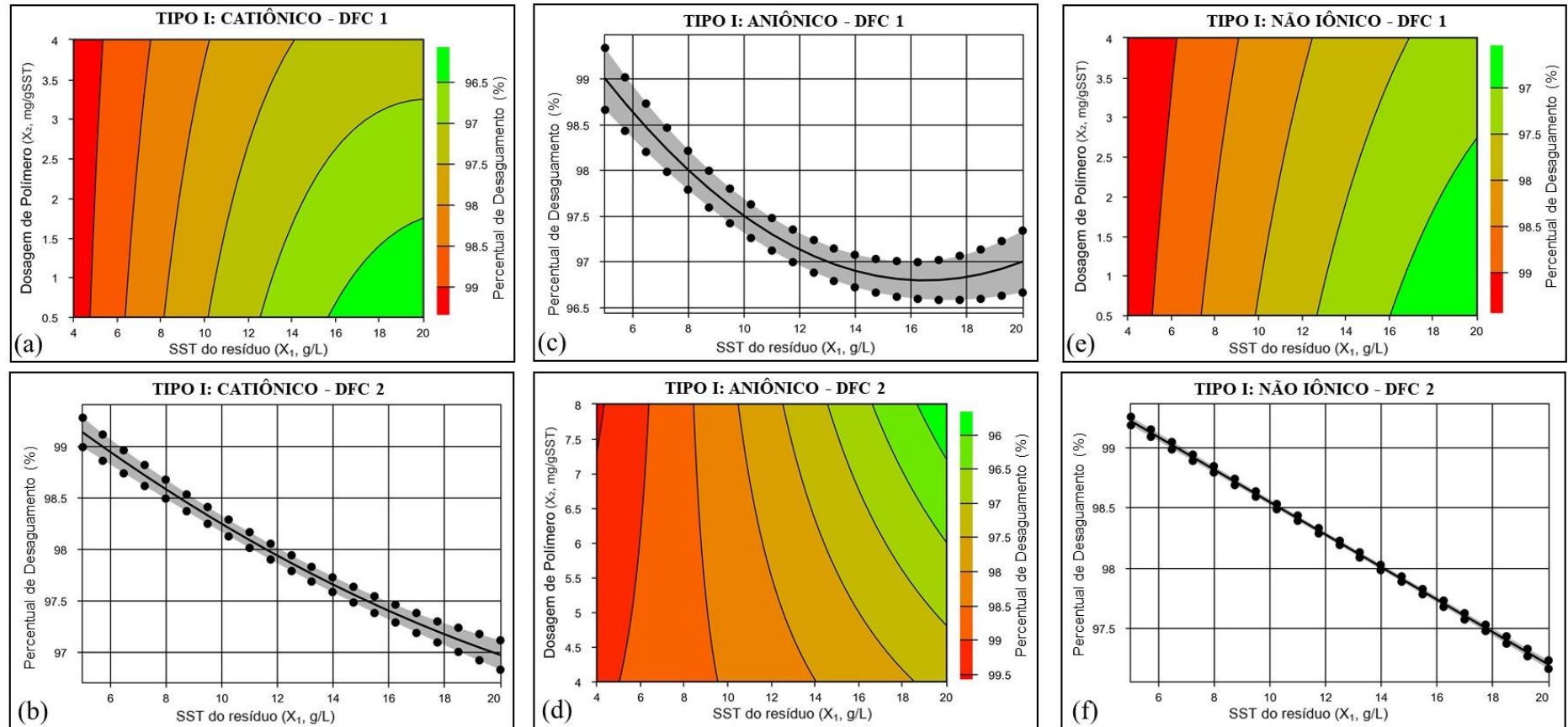
As figuras 46, 47 e 48 mostram os gráficos com a superfície de resposta para o índice percentual de desaguamento em função das variáveis X_1 e X_2 para os RETAs tipos I, II e III respectivamente. Analisando inicialmente os resultados do RETA tipo I (figura 46), verifica-se que o PD resultou valores acima de 96% para todos os polímeros testados. Outro detalhe a ser observado é que o percentual de desaguamento aumentou à medida que se diminuiu a concentração inicial de SST do resíduo, sendo que os maiores valores de PD ficaram na região da 5 g/L de X_1 , fato este verificado em todos os polímeros. Apesar da variável X_2 possuir efeito estatístico sobre a resposta, os valores de PD não se alteraram de forma expressiva com o aumento da dosagem de polímero. Isso pode ser observado na figura 46a, onde para o par de valores de $X_1 = 18$ g/L e $X_2 = 1,0$ mgP/gSST o PD correspondeu a 96,5%, e, quando se elevou a variável X_2 para 4,0 mgP/gSST, o valor de PD aumentou só 1%, indo para 97,5%.

Os resultados do percentual de desaguamento para os RETAs tipo II e III (figuras 47 e 48) indicam uma similaridade dos efeitos das variáveis para com o RETA tipo I. A concentração inicial de SST do resíduo continua sendo a principal influência na resposta, com um efeito negativo sobre os valores de PD, ou seja, à medida que se diminui os valores de X_1 , tem-se um aumento nos valores de PD. Contudo, para variável X_2 , houve uma pequena diferença do RETA tipo I para os outros dois tipos de resíduos, especificamente no polímero não iônico (figuras 47e, 48e), pois houve uma diminuição do percentual de desaguamento com o aumento das dosagens do polímero.

O efeito da concentração inicial de SST do resíduo sobre a resposta PD se mostrou mais expressivo nos RETAs tipo II e III. Enquanto no RETA tipo I a amplitude dos valores de PD foi pequena, máximo de 99% ($X_1 \cong 5$ g/L) e mínima de 96% ($X_1 \cong 20$ g/L), nos RETAs II e III a diferença provocada pela variável foi maior. Para o RETA tipo II o maior valor encontrado foi de 96,8% ($X_1 \cong 5$ g/L) e o menor de 84,1% ($X_1 \cong 20$ g/L). O RETA tipo III obteve as maiores diferenças de valores de PD, com um máximo de 94% ($X_1 \cong 5$ g/L) e um mínimo de 63,5% ($X_1 \cong 20$ g/L).

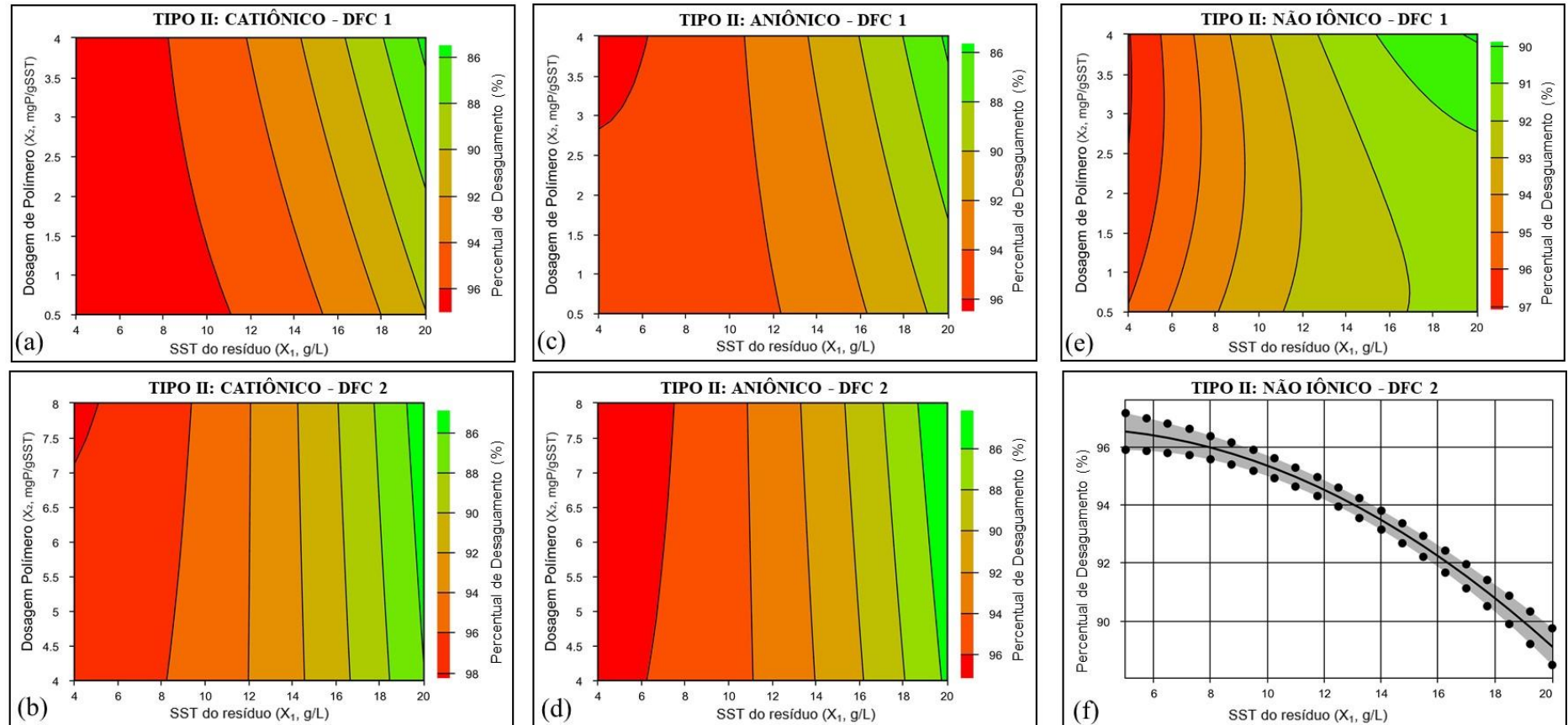
De forma geral, para os três tipos de RETA, apesar de a dosagem de polímero (variável X_1) ter apresentado significância estatística em determinadas condições, esta não proporcionou um efeito considerável nas mudanças dos valores do percentual de desaguamento, sendo o efeito causado pela variável X_2 muito mais expressivo.

Figura 46: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



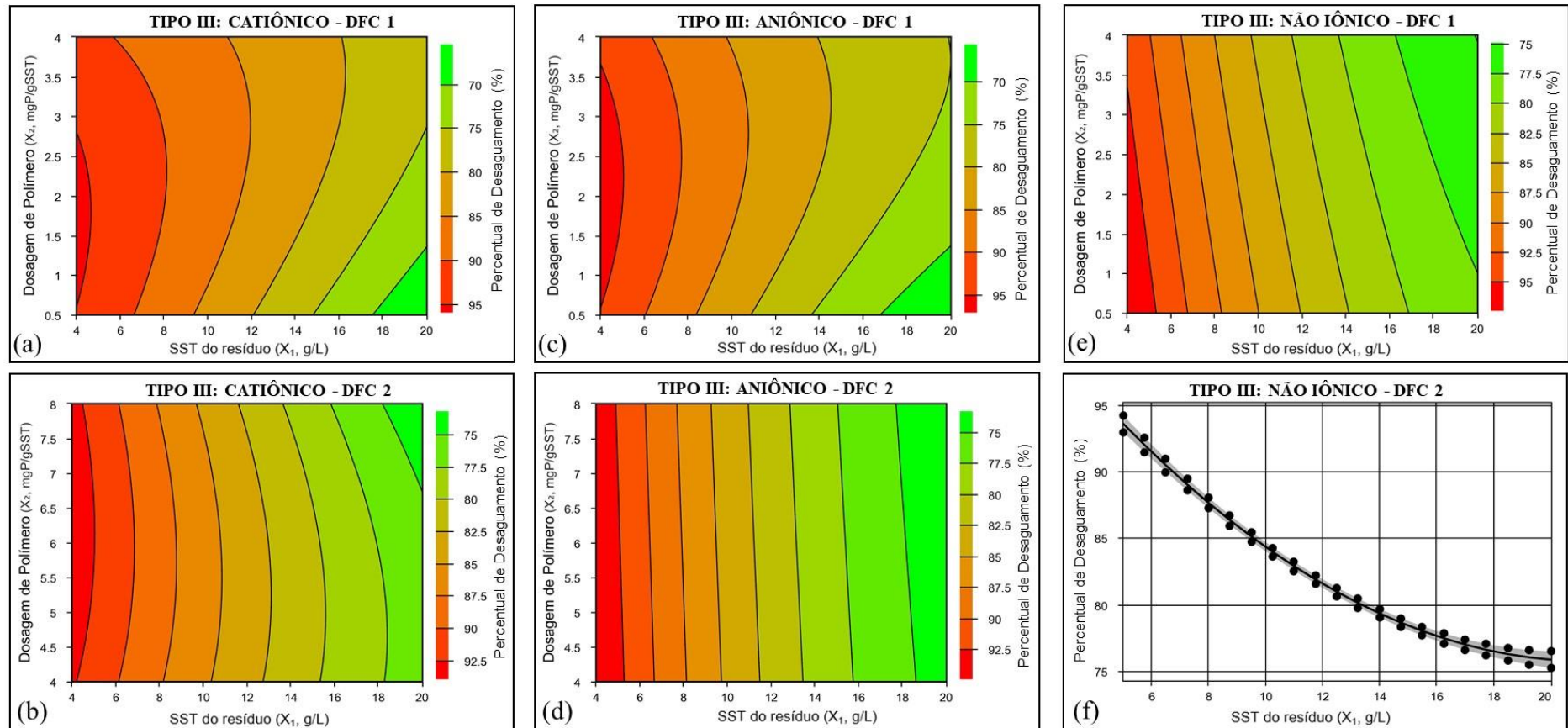
Fonte: Autor (2019)

Figura 47: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

Figura 48: Superfícies de resposta do índice percentual de desaguamento para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

5.3.1.2.2 Teor de Sólidos do Resíduo Desaguado

A tabela 27 apresenta o tratamento estatístico para os dados do índice teor de sólidos nos três tipos de RETAs e polímeros pesquisados. Verifica-se que a variável X_1 obteve efeito estatístico (no termo linear ou no termo quadrático) em todos os delineamentos realizados. Já a variável X_2 não influenciou os resultados de teor de sólidos do resíduo desaguado em diversos tratamentos, sendo o polímero catiônico para os três tipos de RETA, e o polímero não iônico para os RETAs tipo II e tipo III.

Tabela 27: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta teor de sólidos do resíduo desaguado para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados

P-VALOR – TEOR DE SÓLIDOS						
Variáveis	RESÍDUO TIPO I					
	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
$X_{1-(L)}$	0,0104*	<0,001*	0,0383*	0,100*	<0,001*	<0,001*
$X_{1-(Q)}$	0,0110*	0,052*	0,0681*	0,1918	0,7351	0,001*
$X_{2-(L)}$	0,0170*	0,5586	0,0116*	0,005*	<0,001*	<0,001*
$X_{2-(Q)}$	0,7967	0,3173	0,7634	0,6500	0,8444	0,086*
$X_1 \cdot X_2$	0,1847	0,7557	0,0742*	0,2113	0,1894	<0,001*
RESÍDUO TIPO II						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_{1-(L)}$	0,5576	<0,001*	<0,001*	0,032*	<0,001*
$X_{1-(Q)}$	0,025*	0,3663	<0,001*	0,023*	0,002*	0,028*
$X_{2-(L)}$	0,1912	0,026*	0,030*	0,6095	0,093*	0,2007
$X_{2-(Q)}$	0,7647	0,073*	0,1332	0,6102	0,094*	0,1859
$X_1 \cdot X_2$	0,1847	0,008*	<0,001*	0,022*	0,002*	0,3054
RESÍDUO TIPO III						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	$X_{1-(L)}$	0,060*	0,462	0,001*	<0,001*	0,004*
$X_{1-(Q)}$	0,181	0,045*	0,008*	<0,001*	0,010*	<0,001*
$X_{2-(L)}$	0,280	0,140	0,1258	0,095*	0,032*	0,6451
$X_{2-(Q)}$	0,147	0,069*	0,071*	0,4039	0,078*	0,5075
$X_1 \cdot X_2$	0,164	0,374	0,049*	0,7317	0,7996	0,4394

*p-valor $\leq 0,10$; L - termos lineares; Q- termos quadráticos.

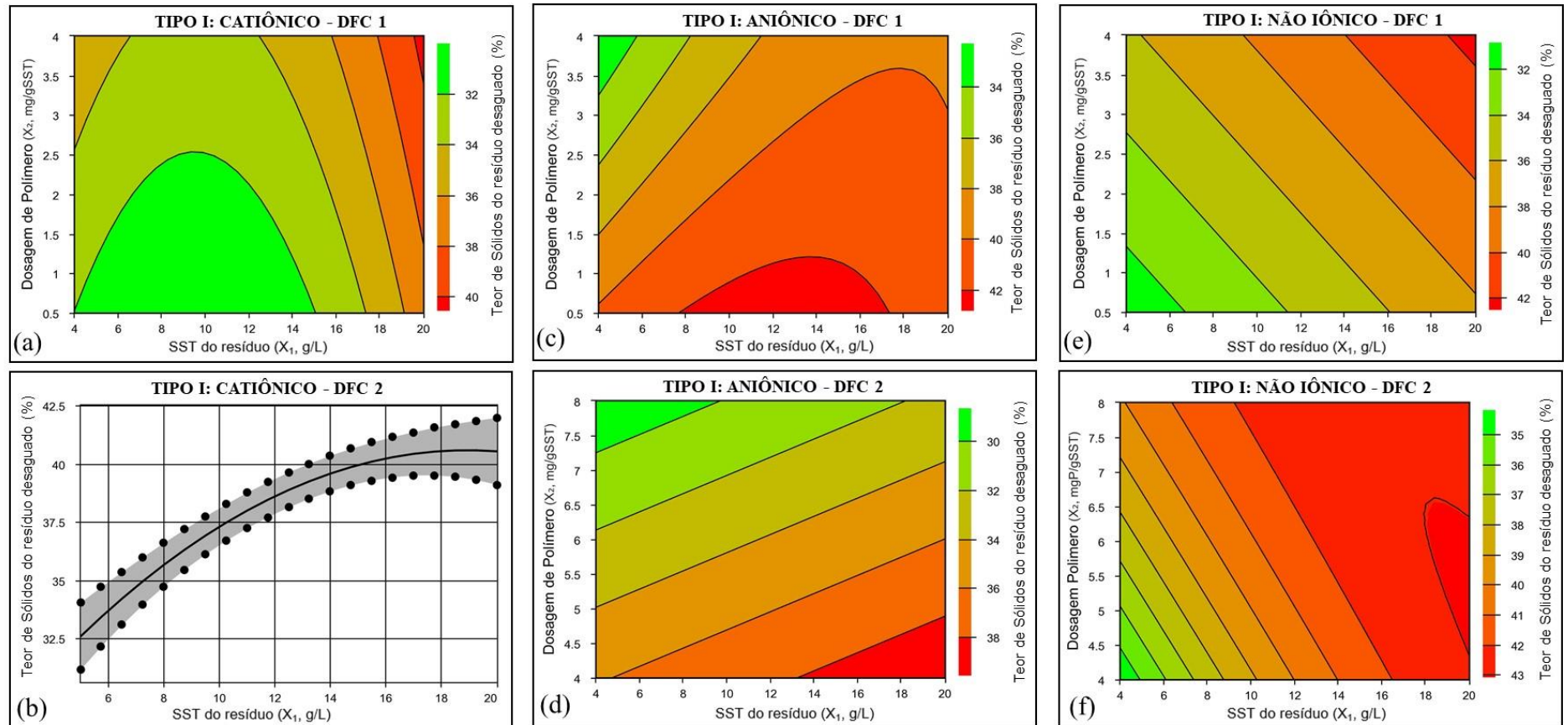
Fonte: Autor (2019)

As figuras 49, 50 e 51 mostram os gráficos com a superfície de resposta para o índice teor de sólidos do resíduo desaguado em função das variáveis X_1 e X_2 para os diferentes tratamentos de RETA e polímeros. Em relação ao RETA tipo I (figura 49), constata-se nos gráficos que houve um efeito positivo das variáveis X_1 e X_2 (para os polímeros catiônico e não iônico) nos valores de teor de sólidos do resíduo desaguado. Para estes dois polímeros quando houve aumento da concentração inicial de SST do RETA e da dosagem do polímero, o teor de sólidos no resíduo desaguado também aumentou. Nos ensaios com o polímero aniônico foi verificado a mesma situação para a variável X_1 , contudo para a variável X_2 aconteceu o oposto, ou seja, o aumento da dosagem de polímero provocou a diminuição do teor de sólidos no resíduo. Vários trabalhos (Worley *et al.*, 2007, Myers e Elton, 2010, Khachan *et al.*, 2011) encontraram resultados semelhantes ao ocorrido com o teor de sólidos para o polímero aniônico. Uma explicação possível para esta tendência é o fato de que os polímeros são muitas vezes hidrofílicos, fazendo com que os flocos tenham a umidade aumentada (Bhatia *et al.*, 2013). Para o polímero não iônico foi observada que a influência da concentração de SST no resíduo, sobre o teor de sólidos final é muito forte. Isso pode ser observado no gráfico da figura 49f, onde para as mesmas dosagens de polímero (X_2), há grande diferenças no teor de sólidos para diferentes valores de X_1 .

O RETA tipo II (figura 50) teve comportamento diferente em relação ao RETA tipo I. O polímero catiônico na faixa de dosagens DFC 1 (figura 50a) não apresentou efeito estatístico, ficando os valores de teor de sólidos em função apenas da variável X_1 . Ao mudar a faixa de dosagem do catiônico para o DFC 2 (figura 50b), a variável X_2 obteve significância estatística, e a variável X_1 apresentou efeito negativo sobre a resposta, resultando em menores valores de teor de sólidos do resíduo desaguado na região de alta concentração inicial de SST do resíduo (20 g/L). O polímero aniônico exibiu desempenhos diferentes entre as faixas DFC 1 e DFC 2 sobre a variável resposta. Enquanto que no DFC 1 (figura 50c) os maiores teores de sólidos no resíduo desaguado estiveram na região de altos valores de X_1 (18 g/L) e baixos valores de X_2 (1,0 mgP/gSST), no DFC 2 (figura 50d) a situação se inverteu, com o maiores valores de teor de sólidos ficando na região X_1 (8 g/L) e X_2 (7,5 mgP/gSST).

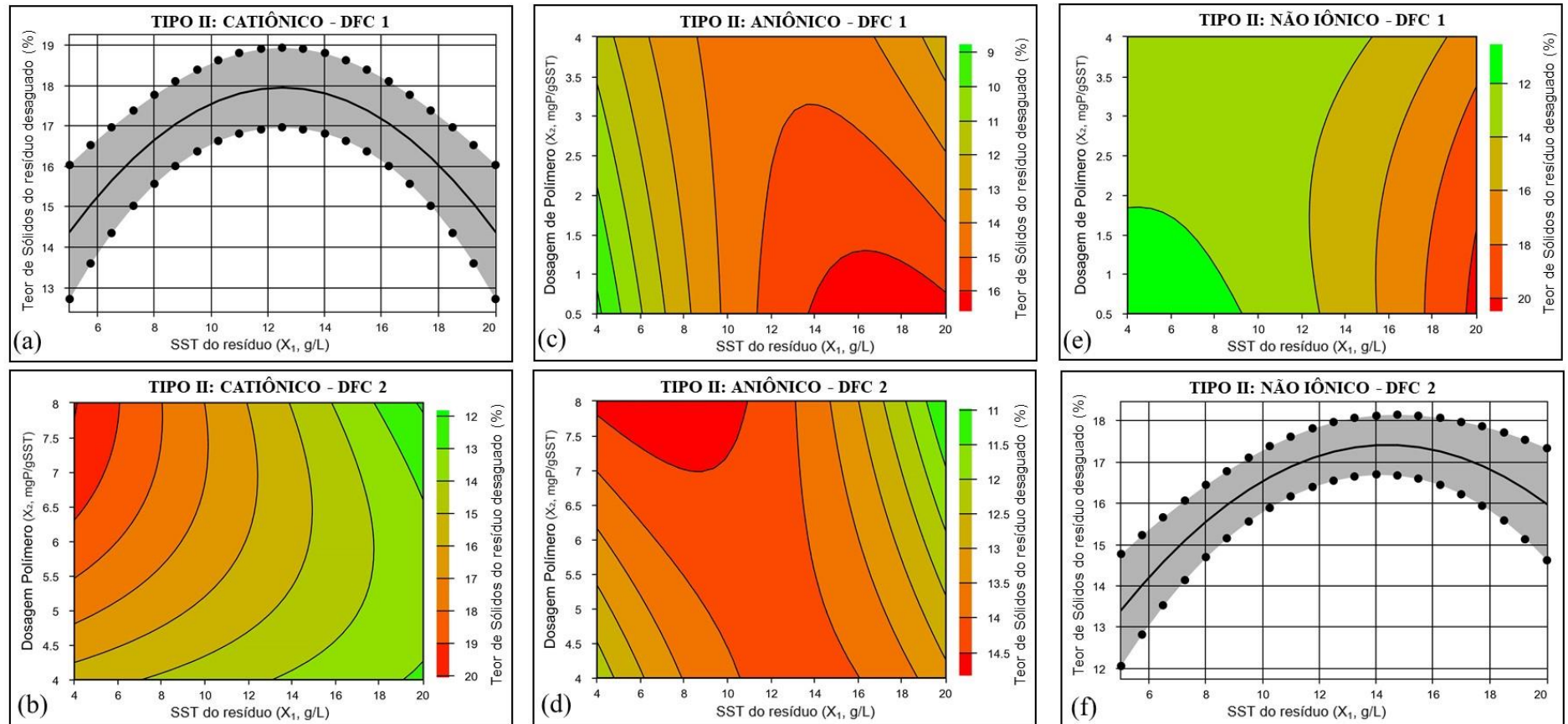
Os ensaios do RETA tipo III (figura 51) foram os que tiveram os menores valores de teor de sólidos no resíduo desaguado. Assim como nos demais RETAs a variável X_1 se mostrou mais influente nos resultados de teor de sólidos do que a variável X_2 . Apesar da variável X_1 ter tido pouco efeito nos resultados da variável resposta, nos três tipos de polímeros o aumento da dosagem proporcionou uma redução dos valores de teor de sólidos no resíduo desaguado.

Figura 49: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



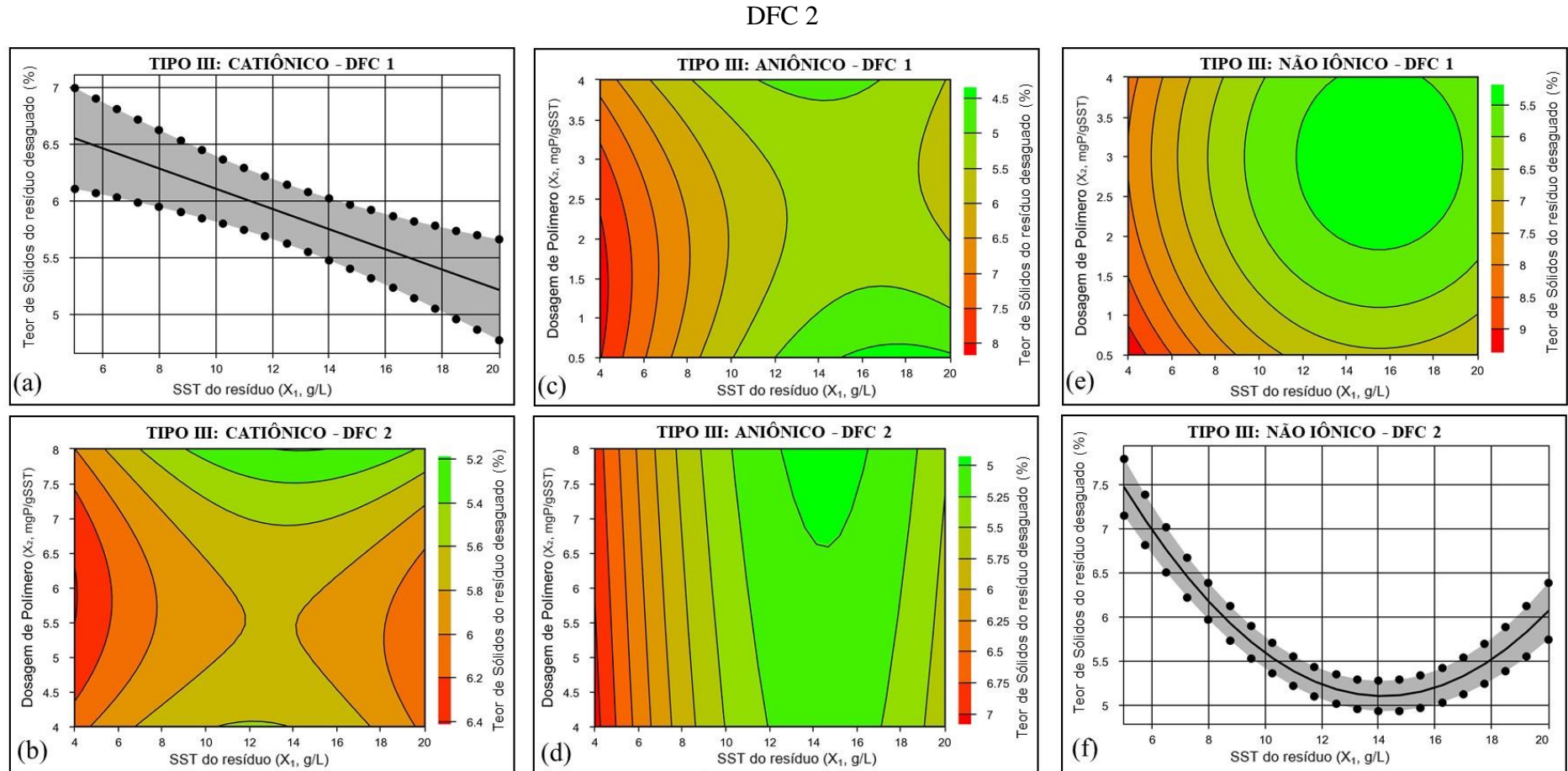
Fonte: Autor (2019)

Figura 50: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

Figura 51: Superfícies de resposta do índice teor de sólidos do resíduo desaguado para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

5.3.1.2.3 Tempo Total de Desaguamento

O bom funcionamento dos sistemas de tubos geotêxteis no desaguamento de resíduos com alto teor de umidade está baseado no desempenho de três características operacionais: alta capacidade de retenção de sólidos; alta capacidade drenante para elevar o teor de sólidos do resíduo retido dentro do tubo e por fim proporcionar o desaguamento do tubo em fluxo contínuo no menor tempo possível.

O tempo de desaguamento é definido como a quantidade total de tempo necessário para desaguar um volume conhecido de resíduo. Neste item são apresentados os dados obtidos nos diferentes delineamentos para o índice tempo de desaguamento (tabelas 28 e 29).

Tabela 28: Resultados do tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC faixa 1, para os três tipos de RETAs

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – DFC 1											
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I			RESÍDUO TIPO II			RESÍDUO TIPO III		
	X ₁	X ₂	Tempo de Desaguamento (min)			Tempo de Desaguamento (min)			Tempo de Desaguamento (min)		
			CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO
1	5,0	0,5	6,4	4,52	5,2	8,3	2,3	1,6	20,4	14,2	4,4
2	20,0	0,5	9,3	20,00	4,0	19,8	2,9	29,8	240,0	96,0	98,1
3	5,0	4,0	1,9	10,57	4,8	13,4	15,0	9,9	24,1	23,4	52,8
4	20,0	4,0	12,5	23,55	17,6	48,4	30,9	45,9	29,4	16,9	34,9
5	5,0	2,0	2,4	11,50	5,4	8,3	15,4	10,2	39,1	16,9	21,6
6	20,0	2,0	18,2	19,83	17,9	19,2	32,9	22,4	39,9	15,8	112,4
7	12,5	0,5	4,0	6,08	3,5	4,2	2,4	1,5	180,0	47,2	46,2
8	12,5	4,0	9,9	5,17	12,5	33,6	23,5	12,5	24,8	16,6	916,0
9	12,5	2,0	9,1	1,65	8,4	45,5	13,7	13,5	32,0	16,7	49,9
10	12,5	2,0	9,0	1,70	8,1	44,4	14,1	13,6	32,2	17,1	50,1
11	12,5	2,0	9,2	1,72	8,5	46,2	14,2	13,2	31,9	16,8	49,1

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico).

Fonte: Autor (2019)

Tabela 29: Resultados do tempo de desaguamento nos ensaios do delineamento DFC faixa 2, para os três tipos de resíduos

DELINEAMENTO DE FACE CENTRADAS – DFC 2											
Ensaio	Variáveis		RESÍDUO TIPO I			RESÍDUO TIPO II			RESÍDUO TIPO III		
	X ₁	X ₂	Tempo de Desaguamento (min)			Tempo de Desaguamento (min)			Tempo de Desaguamento (min)		
			CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO	CAT	ANI	NIO
1	5,0	4,0	1,9	10,57	4,8	13,4	15,0	9,9	24,1	23,4	52,8
2	20,0	4,0	12,5	23,55	17,6	48,4	30,9	45,9	29,4	16,9	34,9
3	5,0	8,0	5,1	2,67	11,1	23,6	15,1	7,9	23,8	27,2	35,6
4	20,0	8,0	64,6	34,35	68,9	52,0	42,5	53,7	42,9	22,8	25,3
5	5,0	6,0	2,8	2,27	17,2	14,4	24,8	8,6	40,8	26,4	45,8
6	20,0	6,0	49,6	26,83	50,6	41,0	38,0	49,9	37,7	18,4	46,9
7	12,5	4,0	9,9	5,17	12,5	33,6	23,5	12,5	24,8	16,6	916,0
8	12,5	8,0	19,0	16,53	16,2	52,6	35,5	28,3	46,0	27,4	22,8
9	12,5	6,0	14,0	6,53	15,8	51,7	32,6	20,1	47,6	18,1	13,4
10	12,5	6,0	14,6	6,30	15,6	51,2	32,1	19,8	46,9	18,5	13,2
11	12,5	6,0	14,2	6,40	15,1	50,9	33,5	19,2	48,0	18,4	13,1

* X₁ (Concentração de SST no resíduo g/L); X₂ (Dosagem do polímero mg/gSST); CAT (catiônico); ANI (aniônico); NIO (não iônico).

Fonte: Autor (2019)

A tabela 30 mostra o tratamento estatístico dos dados para o índice tempo de desaguamento. Constata-se pelos resultados de p-valor que as variáveis X₁ e X₂ influenciaram de diferentes formas a variável resposta. No RETA tipo I os delineamentos (DFC 1) para os polímeros catiônico e não iônico não alcançaram significância estatística na variável X₂. No entanto, ao mudar a faixa de dosagens (DFC 2) os dois polímeros tiveram efeito estatístico para a referida variável. Nos demais delineamentos realizados para o RETA tipo I, os efeitos das duas variáveis foram expressivos estatisticamente.

No RETA tipo II as duas variáveis (X₁ e X₂) se mostraram influentes (p-valor < 0,100) sobre o tempo de desaguamento em todos os delineamentos realizados. O RETA tipo III com polímero catiônico (DFC 2), foi o único tratamento no qual o tempo de desaguamento ficou em função apenas da dosagem de polímero, tendo a concentração inicial de SST do resíduo sem significância estatística.

Tabela 30: Resultados do tratamento estatístico (p-valor) da resposta tempo de desaguamento para todos os tipos de resíduos e polímeros estudados

P-VALOR – TEMPO DE DESAGUAMENTO						
Variáveis	RESÍDUO TIPO I					
	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
X ₁ -(L)	<0,010*	0,0002*	<0,010*	<0,001*	0,004*	0,001*
X ₁ -(Q)	0,6516	0,0483*	<0,010*	0,006*	0,3219	0,022*
X ₂ -(L)	0,5473	0,0037*	0,2539	0,080*	0,006*	0,013*
X ₂ -(Q)	0,2328	0,5357	0,4750	0,072*	0,1862	0,3061
X ₁ . X ₂	0,2467	0,0053*	0,6688	0,017*	0,020*	0,019*
RESÍDUO TIPO II						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	X ₁ -(L)	0,098*	<0,001*	0,048*	<0,001*	0,001*
X ₁ -(Q)	0,095*	0,001*	0,1476	0,2123	0,036*	0,002*
X ₂ -(L)	0,088*	0,043*	0,002*	0,032*	0,042*	0,035*
X ₂ -(Q)	0,3860	0,9249	0,1457	0,050*	0,9738	0,8647
X ₁ . X ₂	0,4182	0,6227	0,1417	0,1033	0,5840	0,2047
RESÍDUO TIPO III						
Variáveis	Catiônico		Aniônico		Não iônico	
	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2	DFC 1	DFC 2
	X ₁ -(L)	0,025*	0,1804	0,019*	0,008*	0,8163
X ₁ -(Q)	0,6866	0,1111	0,6869	0,076*	0,058*	0,095*
X ₂ -(L)	0,003*	0,081*	0,052*	0,005*	0,079*	0,087*
X ₂ -(Q)	0,034*	0,019*	0,016*	0,2290	0,3166	0,097*
X ₁ . X ₂	0,014*	0,2670	0,003*	0,6401	0,8487	0,9899

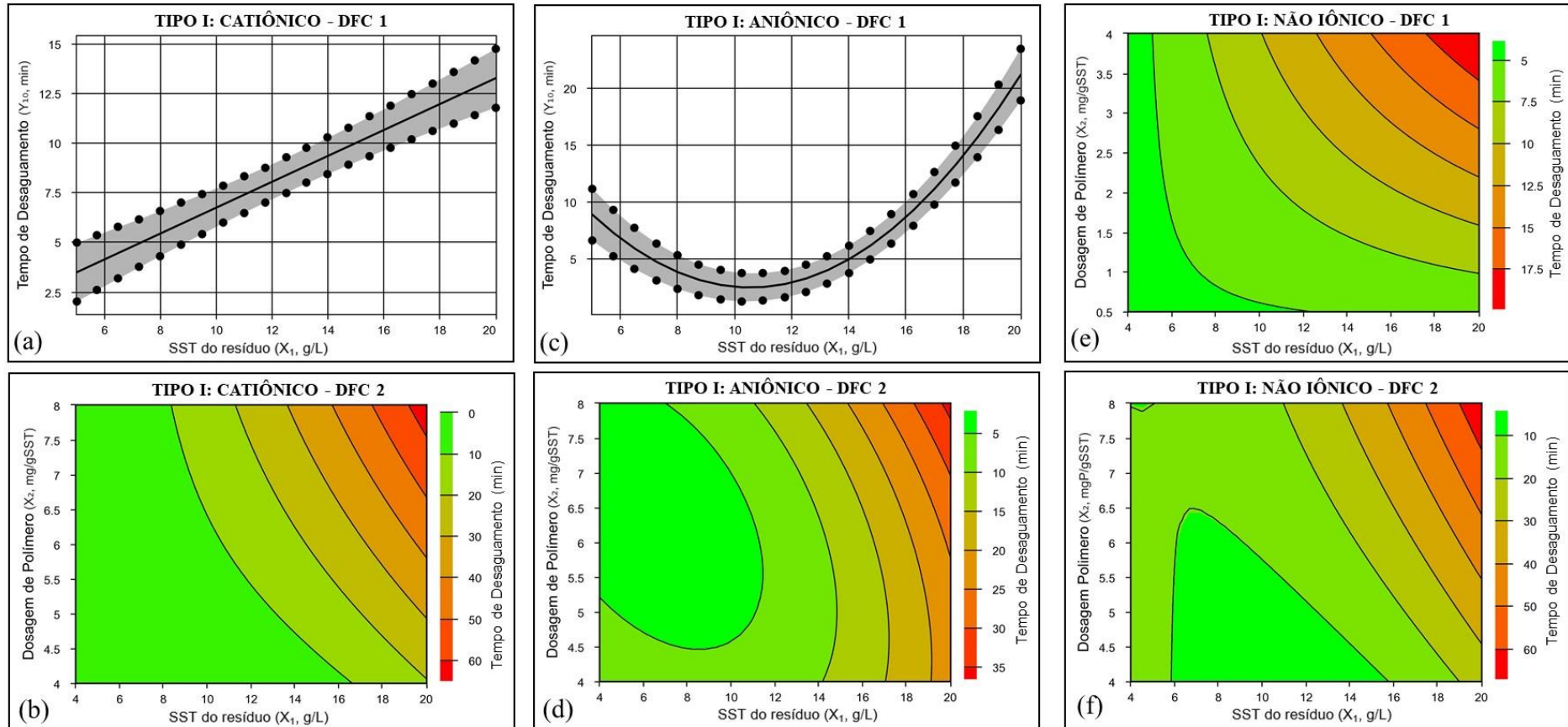
*p-valor $\leq 0,10$; L - termos lineares; Q- termos quadráticos.

Fonte: Autor (2019)

As figuras 52, 53 e 54 apresentam os gráficos com as superfícies de resposta para o tempo de desaguamento nos diferentes tratamentos realizados entre tipos de RETA e polímeros. Verifica-se que os RETAs tipo I e tipo II tiveram comportamentos semelhantes nos efeitos das variáveis X₁ e X₂ para os resultados do tempo de desaguamento. Os maiores valores de tempo de desaguamento estiveram na região de X₁ próximo a 20 g/L (para os três polímeros). Outro detalhe a se destacar, é que diferentes dosagens de polímero (X₂) para valores de X₁ entre 5 e 10 g/L não alteraram significativamente o tempo de desaguamento.

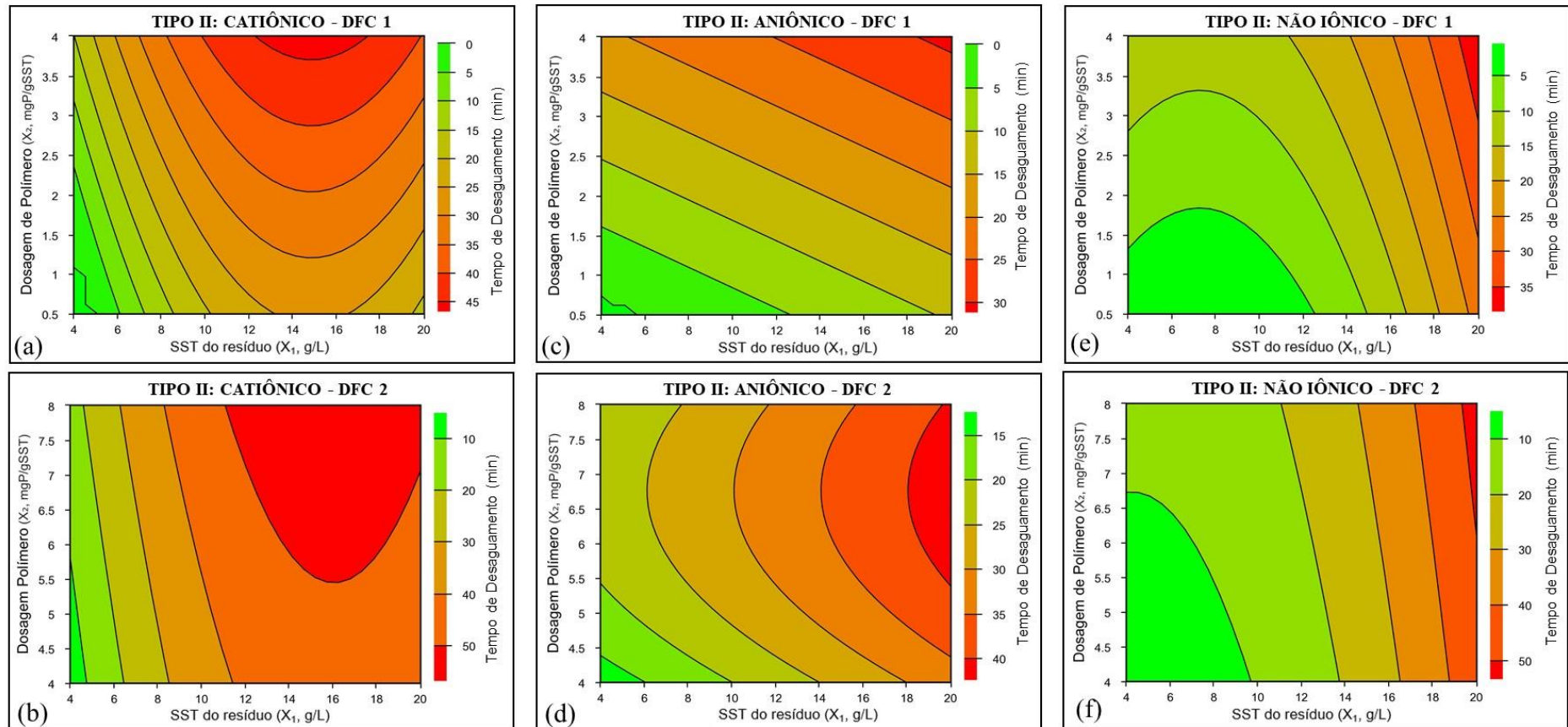
No RETA tipo III para o polímero catiônico e aniônico na faixa de dosagens DFC 1 (figuras 54a e 55c) os resultados foram contrários do que o encontrado nos demais delineamentos realizados. Para esses dois polímeros o aumento da dosagem (X₂) nas diferentes concentrações iniciais de SST do resíduo (X₁) condicionou uma diminuição dos tempos de desaguamento. Quando se comparam esses dados com os gráficos dos índices de retenção, verifica-se que a redução do tempo de desaguamento não produziu efluente com alta perda de partículas, ao contrário, houve aumento na retenção de sólidos, otimizando assim o processo de filtração no tubo geotêxtil.

Figura 52: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo I: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



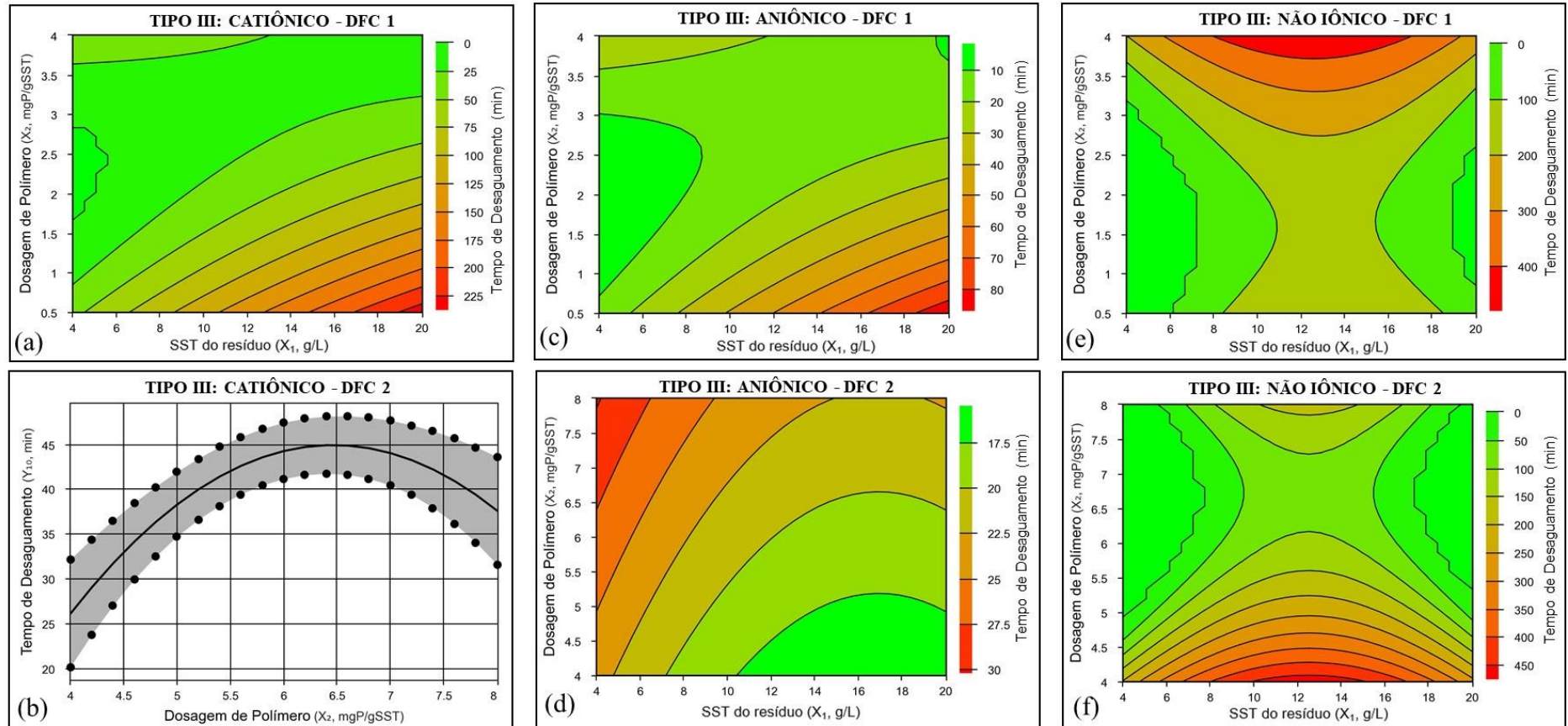
Fonte: Autor (2019)

Figura 53: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo II: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

Figura 54: Superfícies de resposta do índice tempo de desaguamento para o resíduo tipo III: (a) polímero catiônico DFC 1, (b) polímero catiônico DFC 2, (c) polímero aniônico DFC 1, (d) polímero aniônico DFC 2, (e) polímero não iônico DFC 1, (f) polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

5.3.2 Resultados do Teste de Comparação de Médias Anova/Tukey

Neste capítulo são discutidos os resultados dos ensaios do filtro pressurizado em tubo geotêxtil com o tratamento estatístico pelo teste de comparação de médias Anova/Tukey. Foram analisados três índices de desempenho: a turbidez do filtrado, teor de sólidos do resíduo desaguado e o tempo de desaguamento. No tratamento estatístico da análise de variância (Anova) foi adotado nível de significância de 5%.

5.3.2.1 Turbidez do filtrado

Na tabela 31 são apresentados os valores médios da turbidez do filtrado para as diferentes combinações (tratamentos) entre os tipos de RETA, tipo de polímero e concentração inicial de SST do resíduo. Observa-se na tabela 31, comparações das médias para turbidez do filtrado, para menor dosagem de polímero (0,5 mgP/gSST) e a outra para maior dosagem (8,0 mgP/gSST). Todos os valores de turbidez estão acompanhados de letras, sendo que na interpretação do teste de Tukey entende-se que quando as médias são iguais estatisticamente ao nível de confiança de 95%, são rotuladas com a mesma letra.

Para a dosagem de 0,5 mgP/gSST, os valores encontrados de turbidez do filtrado foram elevados (acima de 1.000 uT), exceção feita aos tratamentos do RETA tipo I (aniônico, 20 g/L) e RETA tipo III (catiônico, 20 g/L), que resultaram valores de 45,9 e 25,3 uT, respectivamente. Esses dois tratamentos estão com a mesma letra (a), que demonstra a semelhança estatística entre os dois valores médios. De uma forma geral, para a dosagem de 0,5 mgP/gSST verifica-se uma relação direta entre os valores de turbidez do filtrado com a concentração inicial de SST do resíduo, independentemente do tipo do RETA e tipo do polímero. Esse comportamento se deve a baixa formação da camada de *filter cake* dentro do tubo geotêxtil. Vários pesquisadores (Moo-Young *et al.*, 2002; Liao e Bhatia, 2005; Satyamurthy e Bhatia, 2009) verificaram também esse processo, pois devido a não formação completa da camada, ocorre a perda de sólidos no efluente filtrado.

Na dosagem de 8,0 mgP/gSST foram encontrados valores de turbidez bem inferiores em relação ao que foi verificado para dosagem de 0,5 mgP/gSST. Os menores valores de turbidez (identificados pela letra “a” na tabela) estiveram bem definidos em duas principais combinações: primeiro, para todos os tratamentos do RETA tipo III, não dependendo do tipo de polímero e concentração inicial de SST do resíduo; e segundo para os RETAs tipo I e tipo II em concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L, independentemente do tipo de

polímero. Para as concentrações iniciais de SST do resíduo de 5 g/L e 12 g/L (nos RETAs I e II), o tipo do polímero foi a variável mais determinante nos resultados da turbidez do filtrado, pois em determinadas combinações conseguiu-se atingir menores valores de turbidez (representados pela letra “a”).

Tabela 31: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios de turbidez do filtrado para os diferentes tipos de resíduo e polímeros

RETA	Concentração inicial de SST do resíduo	Polímero	Valores médios de Turbidez do filtrado (uT)	
			Dosagem de 0,5 mgP/gSST	Dosagem de 8,0 mgP/gSST
Tipo I	5 g/L	Catiônico	4.019 c d	221,3 d
		Aniônico	2.922 b c	564,8 g
		Não Iônico	4.426 c d e	223,1 d
	12,5 g/L	Catiônico	10.632 f g h	13,3 a
		Aniônico	8.984 f	107,3 c
		Não Iônico	10.752 f g h i	25,9 a
	20 g/L	Catiônico	12.581 i	22,7 a
		Aniônico	45,9 a	43,7 a b c
		Não Iônico	16.706 k	2,1 a
Tipo II	5 g/L	Catiônico	4.047 c d	93,6 b c
		Aniônico	4.728 c d e	1.179,2 h
		Não Iônico	4.498 c d e	1.137,9 i
	12,5 g/L	Catiônico	10.622 f g h	14,7 a
		Aniônico	11.335 g h i	458,0 f
		Não Iônico	11.237 g h i	300,1 e
	20 g/L	Catiônico	10.914 g h i	5,1 a
		Aniônico	14.493 k	4,2 a
		Não Iônico	12.249 h i	9,6 a
Tipo III	5 g/L	Catiônico	3.155 c	7,9 a
		Aniônico	2.964 b c	42,5 a
		Não Iônico	3.268 c	46,1 a b c
	12,5 g/L	Catiônico	1.196 b	6,1 a
		Aniônico	9.827 f g	25,2 a
		Não Iônico	9.765 f g	3,8 a
	20 g/L	Catiônico	25,5 a	2,1 a
		Aniônico	5.393 d e	4,2 a
		Não Iônico	6.256 e	2,7 a

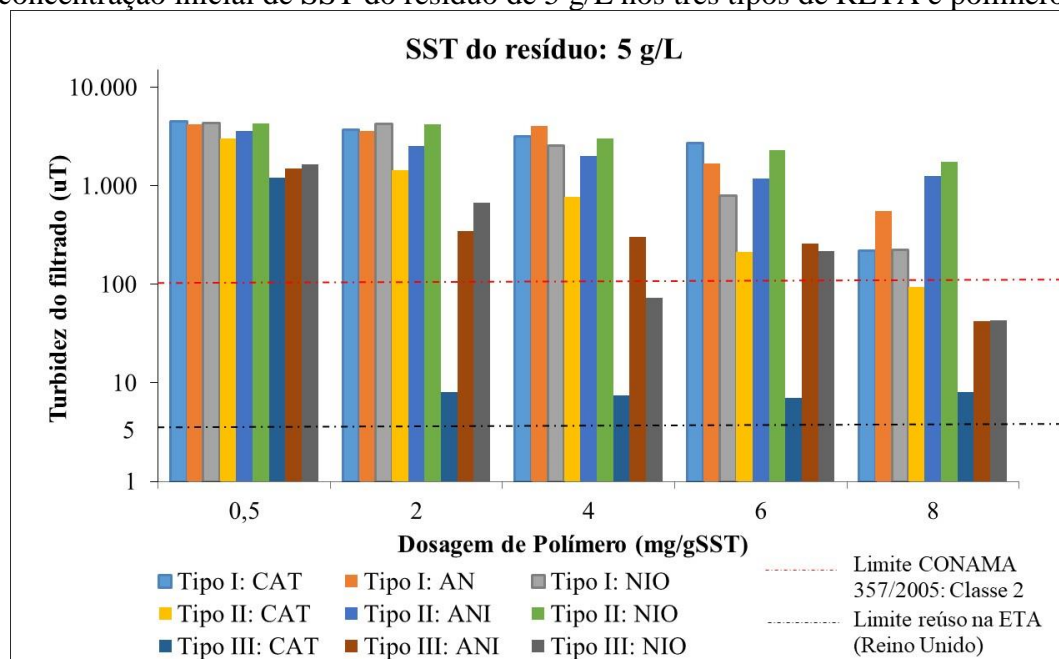
* Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2019)

Nas figuras 55, 56 e 57 são apresentados os dados de turbidez do filtrado agrupados pelas concentrações iniciais de SST do resíduo, 5, 12,5 e 20 g/L, respectivamente. Geralmente, em sistemas de tratamento de RETA, o filtrado das unidades de desaguamento pode ter dois destinos: ou é descartada em corpos hídricos, ou é recirculada ao início do tratamento da ETA. O padrão de qualidade que as empresas de saneamento utilizam para o descarte, normalmente é o valor máximo permitido de turbidez para corpos hídricos classe 2, que segundo a resolução CONAMA 357/05, é de 100 uT. Para o reaproveitamento do filtrado na própria ETA, devido à falta de norma ou legislação específica no Brasil, utiliza-se valores preconizados internacionalmente, como no caso do Reino Unido, que estabelece um valor máximo de 5 uT (UKWIR, 1998).

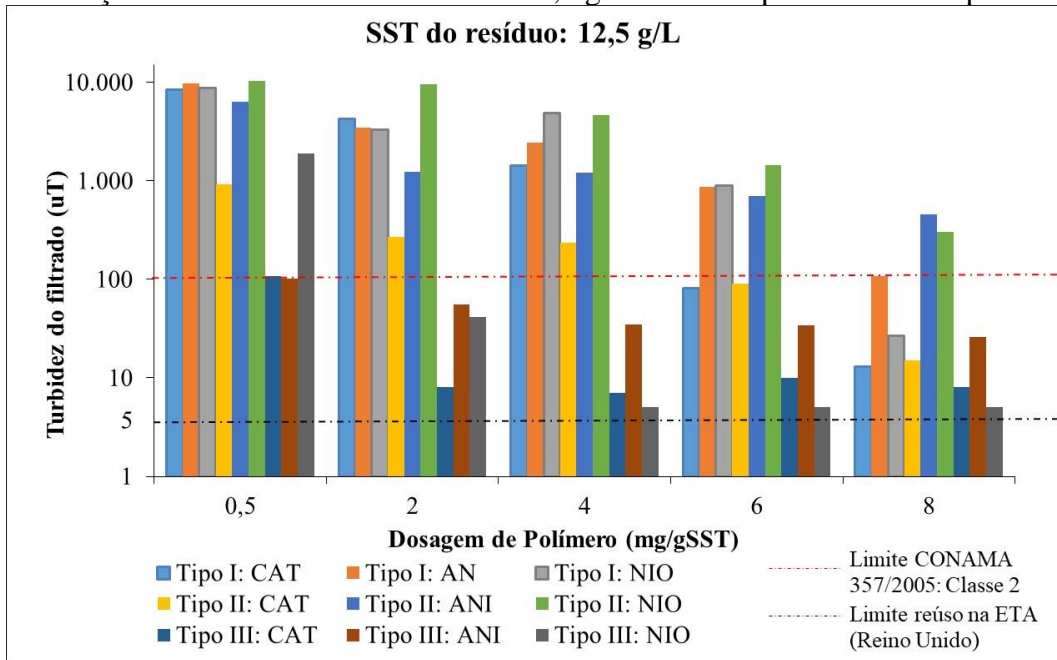
Utilizando estes dois padrões de turbidez como referência, verificou-se que somente na concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L (figura 57) para o RETA tipo III, foram obtidos valores próximos ao recomendado para recirculação em ETA, resultando valores abaixo de 5,0 uT de turbidez para dosagens de 4,0 a 8,0 mgP/gSST. Para o descarte do efluente filtrado em corpos d'água, todos os RETAs e polímeros com concentração de SST do resíduo de 20 g/L ficaram com valores abaixo de 100 uT. Na concentração de 5 g/L somente com o RETA tipo III (para os três polímeros) foram obtidos valores para o descarte. Para concentração de 12,5 g/L, o RETA tipo I (aniônico) e RETA tipo II (não iônico e aniônico) ficaram com resultados acima de 100 uT, inviabilizando o descarte do efluente em corpo hídrico.

Figura 55: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 5 g/L nos três tipos de RETA e polímeros



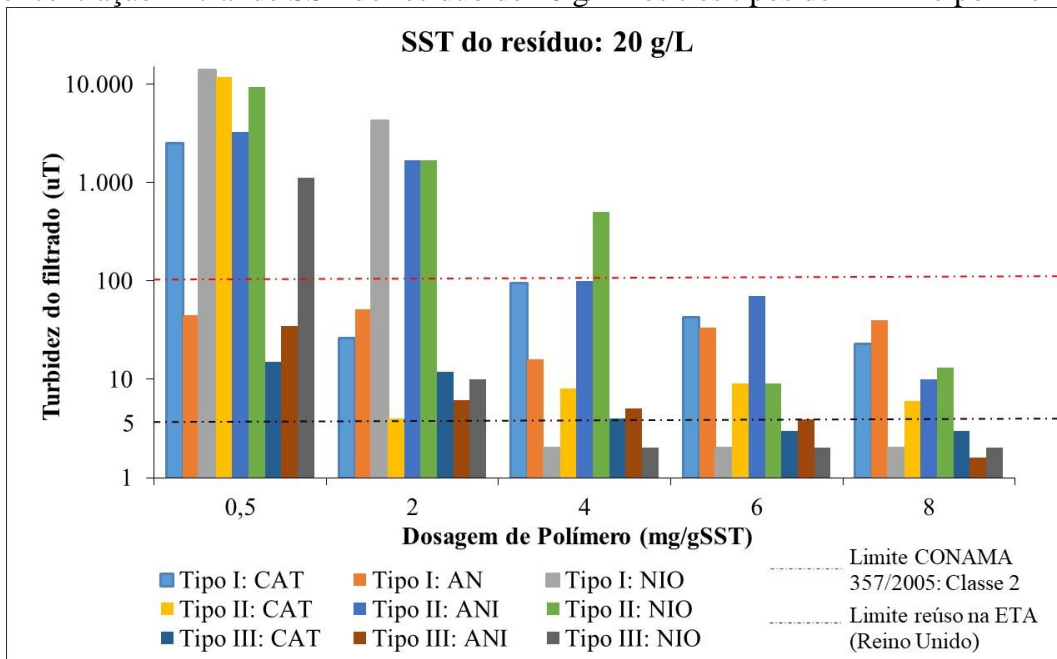
Fonte: Autor (2019)

Figura 56: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 12,5 g/L nos três tipos de RETA e polímeros



Fonte: Autor (2019)

Figura 57: Resultados de turbidez do filtrado em função das dosagens de polímero para a concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L nos três tipos de RETA e polímeros



Fonte: Autor (2019)

5.3.2.2 Teor de sólidos no resíduo desaguado

A tabela 32 mostra os valores médios do teor de sólidos no resíduo desaguado para duas dosagens de polímero (0,5 e 8,0 mgP/gSST) nos diferentes tratamentos do tipo de RETA, tipo de polímero e concentração inicial de SST no resíduo.

Na dosagem de 0,5 mgP/gSST observa-se que os resultados de teor de sólidos estão agrupados primariamente pelo tipo de RETA, tendo o RETA tipo III os menores valores (4,4 a 8,1%), seguido pelo RETA tipo II (10,4 a 21,6%) e os maiores valores para o RETA tipo I (31,4 a 42,3%). Analisando-se a variação dos dados de cada RETA, nota-se que como a dosagem de polímero é pequena (0,5 mgP/gSST), a concentração inicial de SST do resíduo exerce mais efeito nos resultados do que o tipo de polímero, exceção feita para o polímero aniônico no RETA tipo I. Para este polímero, todas as combinações se diferenciaram dos demais resultados (letra “o”), resultando em maiores valores de teor de sólidos.

Ao se elevar a dosagem de polímero para 8,0 mgP/gSST, verifica-se uma consolidação do maior efeito que o tipo de RETA possui nos resultados de teor de sólidos em relação as demais variáveis. O teste de Tukey mostrou que os valores de teor de sólidos no resíduo desaguado nos RETAs tipo I, II e III são estatisticamente diferentes entre si, a nível de confiança de 95%.

Dentre os tratamentos no RETA tipo III, tanto o tipo de polímero como a concentração inicial de SST do resíduo, não tiveram efeito algum na resposta (todos os resultados de teor de sólidos com mesma letra “a”), com valores entre 5,3 e 7,6%. No RETA tipo II, o tipo de polímero teve pouco efeito nos resultados de teor de sólidos, ao contrário da concentração inicial de SST do resíduo, onde os maiores valores de teor de sólidos estiveram nas concentrações de 5 e 12,5 g/L. Os resultados do teor de sólidos no RETA tipo I foram influenciados exclusivamente pelo tipo do polímero, sendo que o polímero não iônico alcançou os maiores valores (40,9 a 42,8%), seguido pelos polímeros catiônico (38,6 a 40,4%) e aniônico (28,9 a 35,4%).

Tabela 32: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios de teor de sólidos no resíduo desaguado para os diferentes tipos de RETA e polímeros

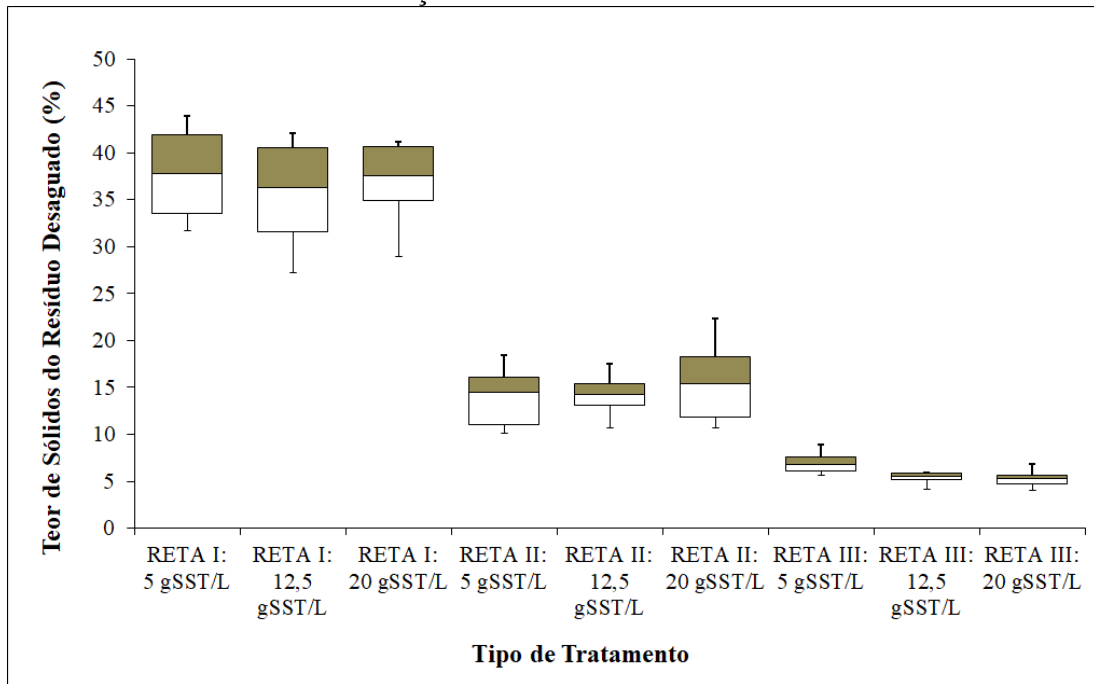
RETA	Concentração inicial de SST do resíduo	Polímero	Valores médios do Teor de Sólidos no resíduo desaguado (%)	
			Dosagem de 0,5 mgP/gSST	Dosagem de 8,0 mgP/gSST
Tipo I	5 g/L	Catiônico	32,3 k l	40,4 h i j
		Aniônico	42,3 o	35,4 g
		Não Iônico	33,4 l m	42,8 j
	12,5 g/L	Catiônico	31,4 k	39,4 h i
		Aniônico	41,1 o	28,9 f
		Não Iônico	33,0 l	41,4 i j
	20 g/L	Catiônico	34,9 m	38,6 h
		Aniônico	40,8 o	29,7 f
		Não Iônico	37,2 n	40,9 h i j
Tipo II	5 g/L	Catiônico	14,4 f	17,6 e
		Aniônico	10,4 e	16,4 d e
		Não Iônico	11,0 e	14,8 c d
	12,5 g/L	Catiônico	17,0 h i	15,1 c d
		Aniônico	15,0 f g	13,3 b c
		Não Iônico	13,5 f	15,2 c d e
	20 g/L	Catiônico	18,4 i	11,5 b
		Aniônico	16,1 g h	11,3 b
		Não Iônico	21,6 j	14,7 c d
Tipo III	5 g/L	Catiônico	6,3 b c	5,8 a
		Aniônico	7,0 c d	6,4 a
		Não Iônico	8,1 d	7,6 a
	12,5 g/L	Catiônico	5,2 a b	5,6 a
		Aniônico	4,4 a	5,4 a
		Não Iônico	7,2 c d	5,6 a
	20 g/L	Catiônico	4,4 a	5,6 a
		Aniônico	4,4 a	5,3 a
		Não Iônico	6,5 b c	5,5 a

* Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2019)

A figura 58 mostra os resultados de teor de sólidos do resíduo desaguado para as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST com os dados de todos os polímeros agrupados em um gráfico boxplot, com os diferentes tipos de RETA e concentrações iniciais de SST do resíduo.

Figura 58: Gráfico boxplot dos resultados de teor de sólidos do resíduo desaguado, com as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST de todos os polímeros, nos três tipos de RETA e nas três concentrações iniciais de SST do resíduo



Fonte: Autor (2019)

O gráfico da figura 58 mostra claramente como a característica do material a ser desaguado foi determinante no resultado do teor de sólidos final do resíduo desaguado. Nos ensaios com o RETA tipo III, originado a partir de água bruta com MON, foram obtidos baixos valores de teor de sólidos ($\cong 6,0\%$), principalmente quando comparado ao RETA tipo I, que teve a água bruta totalmente inorgânica (caulinita) resultando em teor de sólidos de $\cong 37,0\%$. O RETA tipo II obteve resultados intermediários entre os outros dois resíduos ($\cong 15,0\%$).

Guimarães (2007) estudou o desaguamento de RETA (utilizando centrífuga) de duas ETAs com mananciais distintos, sendo a primeira água bruta com presença de algas (caraterística orgânica) e a segunda água com características inorgânicas. Os resultados da pesquisa mostraram que o tipo da água bruta foi determinante nas características do resíduo desaguado, tendo a água com algas obtido teor de sólidos de 10% no resíduo, enquanto a água bruta com características inorgânicas conseguiu teor de sólidos de 30%. Apesar de o autor não utilizar a filtração em tubo geotêxtil no desaguamento do RETA, houve semelhança com os resultados encontrados no presente trabalho, principalmente sobre o efeito da água bruta no resultado final de teor de sólidos.

Khachan e Bhatia (2016) avaliaram o desaguamento de quatro tipos de resíduos (solos de dragagem) com diferentes concentrações iniciais de sólidos do resíduo (200, 330 e 400 g/L). Os resíduos foram condicionados com polímero catiônico e passaram pela filtração em tubo geotêxtil (ensaios de bancada com filtro pressurizado). Os resultados indicaram que o teor de sólidos do resíduo desaguado é dependente do tipo de solo, e tende a aumentar com a elevação da concentração inicial de sólidos do resíduo. Os autores ainda verificaram que maiores dosagens de polímero tendem a diminuir o teor de sólidos do resíduo desaguado. Ao contrário do que foi encontrado por Khachan e Bhatia (2016), os resultados do presente trabalho mostraram que a concentração inicial de sólidos do resíduo não foi determinante para o resultado final do teor de sólidos do resíduo desaguado. Em relação ao condicionamento químico, foi verificado que somente com o polímero aniônico para o RETA tipo I houve uma diminuição do teor de sólidos com o aumento da dosagem, ao passo que para os demais polímeros não ocorreu este comportamento.

5.3.2.3 Tempo de desaguamento

A tabela 33 apresenta os resultados do teste de Tukey com os valores médios do tempo de desaguamento para as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST nas diferentes combinações de tipo de RETA, tipo de polímero e concentração inicial de SST do resíduo.

Analisando-se os dados para dosagem de 0,5 mgP/gSST, nota-se que, com o RETA tipo III, foram obtidos os maiores tempos de desaguamento, diferenciando-se dos RETAs tipo I e tipo II. Para esses dois últimos resíduos, o polímero catiônico teve tendência de ter maiores tempos de desaguamento quando comparado com os demais polímeros, sendo que a concentração inicial de SST do resíduo não teve significância estatística nos resultados da resposta.

Para a dosagem mais elevada de polímero (8,0 mgP/gSST), verifica-se que o tipo de RETA não foi determinante na alteração dos resultados do tempo de desaguamento. Nesta dosagem, a concentração inicial de SST do resíduo passou a ser mais significativa do que as demais variáveis, sendo que na concentração de 5 g/L encontraram-se os menores valores do tempo de desaguamento. Provavelmente os resultados podem ser decorrentes da formação incompleta do *filter cake* em concentrações baixas de SST do resíduo inicial.

Na figura 59 estão os dados do tempo de desaguamento em função do volume filtrado para as dosagens de polímero de 0,5 e 8,0 mgP/gSST para três tipos de RETA, tipos de polímeros e concentração inicial de SST do resíduo.

Tabela 33: Resumo do Teste de Tukey com os resultados médios do tempo total de desaguamento para os diferentes tipos de resíduo e polímeros

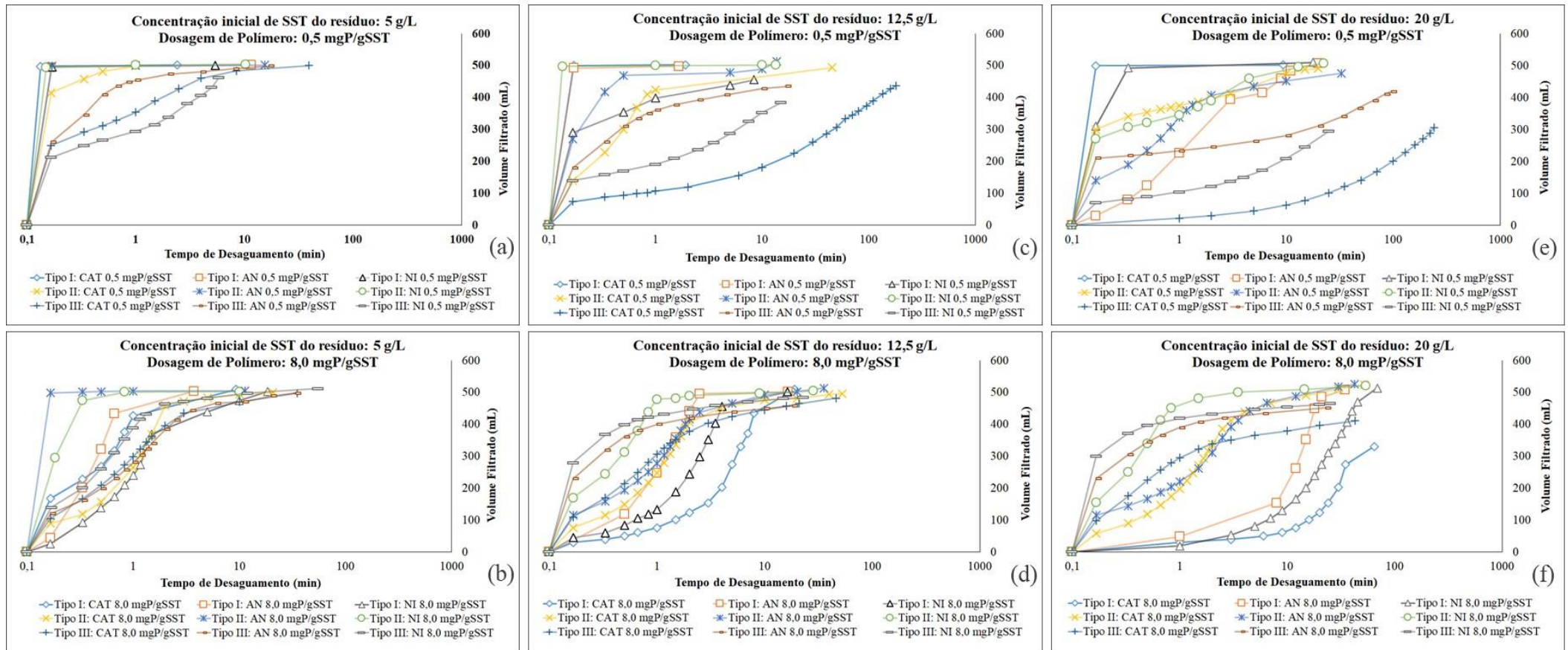
RETA	Concentração inicial de SST do resíduo	Polímero	Valores médios do tempo de desaguamento (min)	
			Dosagem de 0,5 mgP/gSST	Dosagem de 8,0 mgP/gSST
Tipo I	5 g/L	Catiônico	6,2 a b	9,2 a b
		Aniônico	4,6 a b	3,7 a
		Não Iônico	5,3 a b	18,2 b c d e
	12,5 g/L	Catiônico	4,2 a	19,3 c d e
		Aniônico	6,3 a b	32,0 g h i j
		Não Iônico	3,6 a	23,1 e f g
	20 g/L	Catiônico	9,5 a b	57,4 m
		Aniônico	20,5 c d	41,3 j k
		Não Iônico	4,0 a	75,3 n
Tipo II	5 g/L	Catiônico	8,3 a b	19,8 c d e f
		Aniônico	2,4 a	11,8 a b c d
		Não Iônico	1,7 a	10,3 a b c
	12,5 g/L	Catiônico	4,3 a	55,0 m
		Aniônico	2,4 a	19,8 c d e f
		Não Iônico	2,0 a	21,4 d e f
	20 g/L	Catiônico	19,8 c d	51,7 l m
		Aniônico	3,1 a	43,8 k l
		Não Iônico	29,5 d	34,3 i j k
Tipo III	5 g/L	Catiônico	20,7 c d	33,7 i j
		Aniônico	14,1 b c	33,1 h i j
		Não Iônico	4,4 a b	54,7 m
	12,5 g/L	Catiônico	178 g	58,4 m
		Aniônico	47,5 e	31,7 g h i j
		Não Iônico	45,2 e	18,7 b c d e
	20 g/L	Catiônico	234 h	58,7 m
		Aniônico	95,1 f	23,8 e f g h
		Não Iônico	94,6 f	29,0 f g h i

* Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2019)

O que se verifica na figura 59 é o comportamento do tempo de desaguamento durante os ensaios em bancada no filtro em geotêxtil. Comparando-se as três concentrações de SST do resíduo na dosagem de 0,5 mgP/gSST (figuras 59a, 59c e 59e) nota-se à tendência do aumento do tempo de desaguamento com o aumento da concentração inicial de SST do resíduo.

Figura 59: Resultados do tempo de desaguamento em função do volume filtrado, para os três tipos de RETA, polímeros e concentrações iniciais de SST do resíduo, para as dosagens de 0,5 e 8,0 mgP/gSST



CAT (catiônico); ANI (aniônico); NI (não iônico)

Fonte: Autor (2019)

Os ensaios com o RETA tipo III se destacam nos gráficos pelo menor tempo de desaguamento, obtendo valores médios de tempo total de desaguamento cerca de dez vezes mais altos do que o RETA tipo I. Na concentração inicial de SST do resíduo de 20 g/L com dosagem de 0,5 mgP/gSST (figura 59 e) os três polímeros do RETA tipo III resultaram em curvas distintas dos demais resíduos, com tempos superiores a 100 minutos para o desaguamento. Contudo, ao elevar-se a dosagem de polímero para 8,0 mgP/gSST (figura 59 f), as curvas se inverteram, e o RETA tipo III passou a ter um tempo de desaguamento maior.

Vários trabalhos com tubo geotêxtil (Satyamurthy e Bhatia, 2009; Koerner e Koerner, 2010; Maurer, 2011; Khachan *et al.*, 2014) verificaram o ganho que o condicionamento químico otimizado proporciona na redução do tempo de desaguamento em certos tipos de resíduo. No presente trabalho somente o RETA tipo III obteve redução no tempo de desaguamento com o aumento das dosagens de polímero. Nos RETAs tipo I e tipo II houve aumento do tempo com a elevação das dosagens de polímero. O que foi verificado para esses dois tipos de RETA é que, quando se diminuiu a dosagem de polímero para se obter tempos menores de desaguamento, houve um comprometimento do efluente filtrado com a perda de sólidos. Assim, deve-se encontrar uma dosagem ótima com o menor tempo de desaguamento, e que concomitantemente atenda aos requisitos de qualidade do efluente desejado.

5.3.3 Resumo Comparativo dos Resultados

Para facilitar o entendimento das variáveis nos resultados obtidos, apresenta-se neste item um resumo dos resultados obtidos nos ensaios para cada tipo de RETA. De forma geral, foi verificado que a concentração inicial de SST do resíduo, a dosagem e o tipo de polímero exerceram influência nos índices de desempenho avaliados. A tabela 34 apresenta um resumo das melhores condições de funcionamento da filtração em tubo geotêxtil no tratamento dos três tipos de RETA, indicando o tipo de polímero e a concentração inicial de SST do resíduo mais adequada em função dos diferentes índices.

Observou-se no RETA tipo I que, com o polímero catiônico, foram obtidos os melhores índices de retenção de partículas, e conseqüentemente a produção do efluente mais clarificado. Contudo, concentrações iniciais de SST do resíduo menores que 10 g/L não tiveram bons resultados para a retenção de sólidos. Nos índices desempenho de desaguamento, os polímeros catiônico e não iônico conseguiram desaguar eficientemente o resíduo, atingindo teores de sólidos final acima de 30%, mesmo em baixas concentrações de

SST do resíduo (5 a 10 g/L). O polímero catiônico obteve também os menores tempos de desaguamento, sendo, portanto, o polímero mais indicado para este tipo de resíduo.

Tabela 34: Resumo dos melhores resultados obtidos para cada índice de desempenho

ÍNDICES DE DESEMPENHO	CONDIÇÕES RECOMENDADAS					
	Concentração Inicial de SST do Resíduo			Polímeros		
	RETA tipo I	RETA tipo II	RETA tipo III	RETA tipo I	RETA tipo II	RETA tipo III
Retenção: EF, PP e Turbidez	>10 g/L	> 10 g/L	> 5 g/L	CAT	CAT	CAT e NIO
Desaguamento: PD e Teor de Sólidos	5 a 20 g/L	5 a 20 g/L	5 a 20 g/L	CAT e NIO	CAT	NIO
Tempo de Desaguamento	5 a 20 g/L	5 a 20 g/L	5 a 20 g/L	CAT	NIO	NIO

CAT (catiônico); ANI (aniônico); NI (não iônico)

Fonte: Autor (2019)

O RETA tipo II teve resultados semelhantes ao RETA tipo I, principalmente para os índices de retenção de partículas nas concentrações iniciais de SST do resíduo abaixo de 10 g/L. Apesar de o polímero catiônico ter tido tempo de desaguamento elevado, revelou-se como o mais indicado para o RETA tipo II devido à alta retenção de sólidos alcançada.

O RETA tipo III conseguiu a melhor eficiência na retenção de sólidos entre os resíduos estudados, até mesmo na menor concentração inicial de SST do resíduo (5 g/L). Contudo os resultados de teor de sólidos no resíduo desaguado foram baixos ($\cong 6,0\%$), devido principalmente à característica orgânica do resíduo. Outra característica do RETA tipo III foi a colmatação do tubo geotêxtil em dosagens mais baixas de polímero ($<2,0$ mgP/gSST), elevando assim o tempo de desaguamento do resíduo. Assim, o correto condicionamento químico para o RETA tipo III é de fundamental importância, não só para propiciar a geração de efluente clarificado mas também para evitar a colmatação do geotêxtil e inviabilizar o processo de desaguamento. Neste caso, o polímero não iônico foi o melhor condicionante químico para atender às especificidades deste tipo de resíduo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do trabalho realizado, chegou-se às seguintes conclusões:

- A metodologia utilizada no trabalho para a geração de RETA em escala-piloto se mostrou eficiente, pois, além de produzir o volume suficiente de resíduos para a pesquisa, garantiu de forma homogênea a geração de resíduos nas mesmas condições operacionais adotadas em ETAs de ciclo completo em escala real;
- Os três tipos de resíduos de ETA gerados no trabalho alcançaram características físico-químicas distintas e representativas às respectivas águas brutas de origem para cada resíduo;
- O ensaio de bancada com filtro pressurizado em tubo geotêxtil confirmou-se como um método simples e eficiente na predição de parâmetros importantes que só poderiam ser obtidos em escala-piloto ou escala real, como: o teor de sólidos do resíduo desaguado, a qualidade do efluente filtrado, o melhor condicionamento químico;
- A metodologia estatística de superfície de resposta (RSM) indicou ser uma ferramenta eficiente tanto no planejamento experimental dos ensaios como na geração, interpretação e otimização dos resultados obtidos;
- As características das águas brutas avaliadas na pesquisa influenciaram diretamente no desaguamento dos RETAs estudados;
- O tipo de RETA foi determinante nos resultados de teor de sólidos no resíduo desaguado. A característica específica de cada RETA teve influência preponderante sobre o teor de sólidos no resíduo desaguado, quando comparado às demais variáveis estudadas (dosagem/tipo de polímero e a concentração inicial de SST do resíduo);
- O RETA tipo III conseguiu a maior eficiência de filtração, obtendo assim os menores valores de turbidez do filtrado. Contudo, não foi eficiente no desaguamento do resíduo retido no geotêxtil, obtendo valores médios de 6% de teor de sólidos no resíduo desaguado;
- Os maiores teores de sólidos no resíduo desaguado foram obtidos com o RETA tipo I ($\cong 37\%$), seguido pelo RETA tipo II com valores médios de 15%.

- A concentração inicial de SST do resíduo teve efeito direto no desaguamento em tubo geotêxtil, principalmente na capacidade de retenção de sólidos. Nos RETAs tipo I e tipo II, a utilização do resíduo com concentração de SST de 5 g/L não foi capaz de produzir efluente filtrado com turbidez inferior a 100 uT;
- O tipo e a dosagem de polímero tiveram pouco efeito nos resultados de teor de sólidos do resíduo desaguado, entretanto foram significantes na capacidade de retenção de partículas e no tempo de desaguamento da filtração em tubo geotêxtil;
- O polímero catiônico foi o mais eficiente no processo de retenção de partículas no tubo geotêxtil para os três tipos de RETA. O polímero aniônico obteve a menor eficiência na retenção de sólidos para os três tipos de RETAs e proporcionou redução no teor de sólidos no resíduo desaguado para o RETA tipo I;
- O polímero não iônico foi o mais eficiente na redução da colmatação do RETA tipo III, reduzindo significativamente o tempo de desaguamento para este resíduo;
- A filtração em tubo geotêxtil mostrou-se uma tecnologia eficiente e indicada para o desaguamento de resíduos de ETAs. Contudo, há a necessidade de se realizar ensaios de tratabilidade com o RETA a ser desaguado antes da implantação do sistema de tratamento. Cada resíduo tem uma característica específica, podendo necessitar de adequações no adensamento, condicionamento químico e principalmente na estimativa do teor de sólidos final do resíduo desaguado;
- Recomenda-se que nas estações de tratamento de água os resíduos da lavagem de filtros passem pelo processo de clarificação/adensamento antes de ser direcionados para o sistema de tubos geotêxtil, a fim de se elevar a concentração de SST para no mínimo 10 g/L.

7. REFERÊNCIAS

APHA. American Water Works Association and Water Environmental Federation. (2012). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22th edition, Washington, USA.

ANDREOLI, C. V. (coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. (Projeto PROSAB).

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT (2004a). **NBR 10.004 – Resíduos sólidos - Classificação**, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004b) **NBR 10.005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004c) **NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**, Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. (2004d) **NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos - Classificação**, Rio de Janeiro, Brasil.

AWWA – American Water Works Association. **Water treatment plant wastemanagement**. American Water Works Association Research Foundation. Denver, 1987, 459 p.

BARROSO, M. M. (2007). **Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas nos desaguamentos por leito de drenagem**. Doutorado, Universidade de São Paulo.

BACHE, D. H; JOHNSON, C.; ELEFThERIOS, N. PAPAvasILOPOULOS, E. **Sweep coagulation: structures, mechanisms and practice**; Journal of Water Supply: Research and Technology — Aqua; International Water Supply Association; 1999; 48 (5): pp. 201–210.

BHATIA, S. K; MAURER, B. W; KHACHAN, M. M; GRZELAK, M. D. **Performance Indices for Unidirectional Flow Conditions Considering Woven Geotextiles and Sediment Slurries**; Conference Paper in Geotechnical Special Publication. American Society of Civil Engineers; 2013; pp. 319-333.

CORDEIRO, J.S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In: REALI, M.A.P., coord. *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água.* Rio de Janeiro: ABES, 1999. p.1-39.

CORDEIRO, J.S. (2002) **Micro propriedades de Lodos Gerenciados em Decantadores de Estações de Tratamento de Água.** XXVIII Congresso Interamericanos de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México. Memoriais.

CORNWELL, D. A. **Water treatment plant waste management.** Denver. Environmental Engineering & Technology, Inc., AWWA Research Foundation, 1987

CORNWELL, D. A. **Water treatment residuals engineering;** AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, Colorado; 2006; 364 pp.

CHANG, I. L.; CHU, C. P.; LEE, D. J.; HUANG, C. “**Expression dewatering of alum-coagulated clay slurries**”; Environmental Science & Technology; American Chemical Society; May 1997; 31 (5): pp. 1313–1319.

CHOW, A. T.; GAO, S.; DAHIGREN, R. A. **Physical and chemical fractionation of dissolved organic matter and trihalomethane precursors: A review.** Journal of Water Supply and Technology – AQUA. 54(8), 475-503, 2005.

CROUE, J. P. et al. **Natural organic matter: structural characteristics and reactive properties.** In : Singer, P. C. (ed). *Formation and Control of Disinfection By-products in Drinking Water.* American Water Works Association, Denver, Colorado, pp. 65-94, 1999.

DHARMAPPA, H. B.; HASIA, A.; HAGARE, P. **Water treatment plant residuals management.** Water Science and Technology, vol 35 n. 8, pp 45–56, 1997.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 2^a. ed. São Carlos - SP: RIMA, v. 1 e 2, 2005.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2011. 454 p.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2012. 540 p.

DIXON, D. R; ELDRIDGE, R. J; SCALES, P. J; **The effect of alum dose on the consolidation behaviour of coagulated clay dispersions; Journal of Water Supply: Research and Technology — Aqua; IWA Publishing, London; 2004; 53 (8): pp. 545–552.**

DULIN, B. E; KNOCKE, W. R. **The impact of incorporated organic matter on the dewatering characteristics of aluminium hydroxide sludges.** Journal AWWA; American Water Works Association, Denver, Colorado, U.S.A.; May 1989; 81 (5): pp. 74–79.

FERREIRA FILHO, S.S.; ALÉM SOBRINHO. P. (1998). **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água.** Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 3, n. 3. Jul/Set

FERREIRA, B.O.; VIANNA, M. R. (2013). **Eficiência do desaguamento de lodos de decantadores e água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis: estudo de caso.** 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, Anais.

FONTANA, A.O. **Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador Como Solução Para Redução de Volume de Lodo de Decantadores e Reuso de Água de Lavagem de Filtros - Estudo de Caso – ETA Cardoso.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR. São Carlos, 2004.

FOWLER, J.; BAGBY, R.M.; TRAINER, E. (1996). **Dewatering sewage sludge with geotextile tubes.** Proc. 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's New Foundland.

GAFFNEY, D.A. (2001). **Geotextile tube dewatering: Part 1 – design parameters.** GFR Magazine, 19, No. 7, 1-5.

GHARAIBEH, A. M. **Drying of potable water treatment plant residuals.** Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2009.

GILL. R. I. S; HERRINGTON, T. M. **The Effect of Colloid Concentration and pH on Kaolin Suspensions Flocculated with Cationic Polyacrylamides of High Molar Mass;** Colloids and Surfaces. Elsevier; 1989; 42: pp. 23-37.

GUANAES, E. A. **Análise do Desaguamento do Lodo Residual de Estação de Tratamento de Água por Meio de Geossintéticos.** 129 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – CEFET, Minas Gerais, 2009.

GRZELAK, M.S., MAURER, B.S., PULLEN, T.S., BHATIA, S.K., RAMARAO, B.V. (2011). **A Comparison of Test Methods Adopted for Assessing Geotextile Tube Dewatering Performance**. Conference Paper in Geotechnical Special Publication March 2011.

GUIMARAES, G. C. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília**. Dissertação (Mestrado). Departamento de engenharia civil e ambiental – Universidade de Brasília/UNB. Brasília, 2007.

GUIMARÃES, M. G. A., URASHIMA D. C., VIDAL D. M. (2014). **Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems**. Geosynthetics International 5 (21), 310-320

HAAK, W. **Condicionamento químico de lodo de estação de tratamento de água com monitoramento através de potencial redox**. 2011. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Faculdade de engenharia civil da UNICAMP, Universidade de Campinas, Campinas. 2011.

HEDLUND, K. F. S. **Adensamento de lodo de estação de tratamento de água: comparação entre sedimentação e flotação**. 2011. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Faculdade de engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria. 2016.

HO, L.; NEWCOMBE, G. **Effect of NOM, turbidity and floc size on the PAC adsorption of MIB during alum coagulation**; Water Research; Elsevier; September 2005; 39 (15): pp. 3668–3674.

HUANG, C.C.; LUO, S.Y. (2007). **Dewatering of reservoir sediment slurry using woven geotextiles. Part I: Experimental results**. Geosynthetics International, 14, No. 5, 253-263.

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J.; PARSONS, S. **A review of floc strength and breakage**; Water Research; Elsevier; September 2005; 39 (14): pp. 3121–3137.

KHACHAN, M. M.; BHATIA S.K. (2016). **The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance**. Geotextiles and Geomembranes (45) 280-293

KOERNER, R. M.; **Geotextiles: From Design to Applications** - Woodhead Publishing Series in Textiles - 1st Edition. 2016.

KOERNER, G. R.; KOERNER, M. R. (2006). **Geotextile tube assessment using a hanging bag test**. Geotextiles and Geomembranes. v. 24, n. 2, p. 129-37.

KOORSE, S.J. (1993) **The role of residuals disposal law in treatment plant design**. Journal AWWA 86 (11), 64-74.

KUKENBERGER, R.J. (1996). **Conditioning and Dewatering**. In: Girovich, M. J. Biosolids Treatment and Management: Processes for Beneficial Use. Marcel Dekker, Inc., New York, 453p.

KUTAY, M. E.; AYDILEK, A. H. **Retention performance of geotextile containers confining geomaterials**. Geosynthetics International, v. 11, p. 100-113, 2004.

HEDLUND, K, F, S (2016). **Adensamento de lodo de estação de tratamento de água: comparação entre sedimentação e flotação**. 2016. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

LAWSON C. R. (2008). **Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering**. Geosynthetics International 6 (15) 384-427.

LIAO, K.; BHATIA, S. **Evaluation on filtration performance of woven geotextiles by falling head, pressure filtration test, and hanging bag tests**. In: International conference on geosynthetics, 8., 2006, Yokohama. Proceedings Rotterdam: Millpress, 2006.

MAURER, B. W. (2011). **Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment**. Thesis, Master of Science in Civil Engineering, The Syracuse University.

MORGAN, K, R, (2014). **Geotextile tubes and their application to dewatering**. 2014. 147 p. Thesis (Master of Science in Applied Engineering) – Georgia Southern University, Georgia-USA.

MOO-YOUNG, H. K., GAFFNEY, D. A., MO, X. (2002). **Testing Procedures to asses the viability of dewatering with geotextiles tubes**. Geotextiles and Geomembranes 5 (20) 289-303.

MOO-YOUNG H., TUCKER W. (2002). **Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes**. Geotextiles and Geomembranes 3 (20) 191-212.

MUTHUKUMARAN, A. E.; ILAMPARUTHI, K. **Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering.** *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, p. 210-219, 2006.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments.** 3rd Ed. New York: Wiley, 2009.

OGILVIE, D; **New Zealand Interim Guidelines: Management of Water Treatment Sludge. Interim Version;** Water Supply Managers' Group, New Zealand Water and Wastes Association, Auckland; June 1997;

PIEPER, K. M. C. **Avaliação do uso de geossintético para o deságüe e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água.** 2008. 160 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PUKELSHEIM, F. **Optimal design of experiments** / Friedrich Pukelsheim.— Classic ed. p. cm. — (Classics in applied mathematics ; 50). New York : J. Wiley, 2006.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Experimental Design and Process Optimization,** CRC Press, New York, 2014.

SATYAMURTHY R., BHATIA S.K. (2009). **Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles.** *Geosynthetics International* 2 (16) 83-96

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil.** 2012. 136 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2012.

SLOBODA, E. **Influência do tamanho molecular aparente das substâncias húmicas aquáticas na eficiência da coagulação com sulfato de alumínio e cloreto férrico.** Dissertação (Mestrado) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2007.

TOMINAGA, E. (2010). **Análise dos Procedimentos para Avaliação de Desempenho de Sistemas fechados com Geotêxtil para Desaguamento**. Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 126p.

THOMPSON, P. L.; PAULSON, W, L.; **Dewaterability of alum and ferric coagulation sludges**; Journal AWWA; American Water Works Association, Denver, Colorado, U.S.A.; April 1998; 90 (4): pp. 164–170.

THURMAN, E, M.; MALCOLM. R. L. **Preparative isolation of aquatic substances**. Environmental Science Technology, v. 15, p. 463-466, 1981.

VANZETTO, A, S (2012). **Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto**. 2012. 205 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Pós graduação em Tecnologia Ambiental. Universidade de Brasília - UNB, Brasília.

VERRELLI, D. I. (2008). **Drinking water treatment sludge production and dewaterability**. PhD thesis, Faculty of Engineering, Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne.

WORLEY, J. W.; BASS, T. M; VENDRELL, P.F. (2008) **Use of geotextile tubes with chemical amendments to dewater dairy lagoon solids**. Bioresource Technology 99, 4451-4459.

APÊNDICE A

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DELINEAMENTOS EXPERIMENTAIS PELA
METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 35: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	34,868	5,332	6,540	0,001
X ₁	27,600	4,243	6,505	0,001
X ₁ ²	10,059	6,530	1,540	0,184
X ₂	20,800	4,243	4,902	0,004
X ₂ ²	1,559	6,530	0,239	0,821
X ₁ · X ₂	15,000	5,197	2,887	0,034

Fonte: Autor (2019)

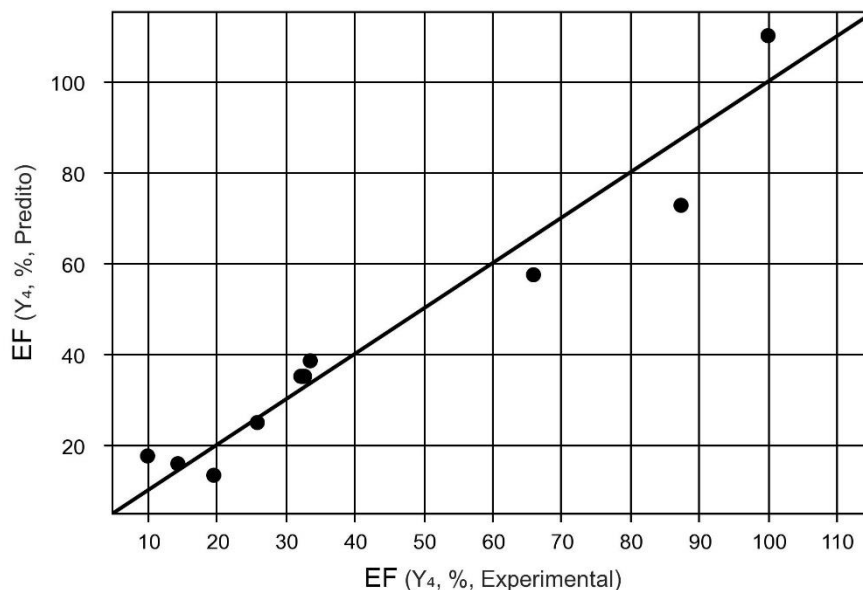
Modelo estatístico: $Y = 34,87 + 27,60 x_1 + 10,06 x_1^2 + 20,80 x_2 + 1,56 x_2^2 + 15 x_1 x_2$

Tabela 36: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8371,8	5,0	1674,4	15,5	0,005
Resíduos	540,1	5,0	108,0		
Falta de Ajuste	539,8	3,0	179,9	1205,9	0,001
Erro Puro	0,3	2,0	0,1		
Total	8911,9	10,0			

Fonte: Autor (2019)

Figura 60: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 37: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	1790,42	183,31	9,77	0,00
X ₁	137,67	145,88	0,94	0,39
X ₁ ²	-796,05	224,51	-3,55	0,02
X ₂	-761,17	145,88	-5,22	0,00
X ₂ ²	106,45	224,51	0,47	0,66
X ₁ · X ₂	-737,25	178,67	-4,13	0,01

Fonte: Autor (2019)

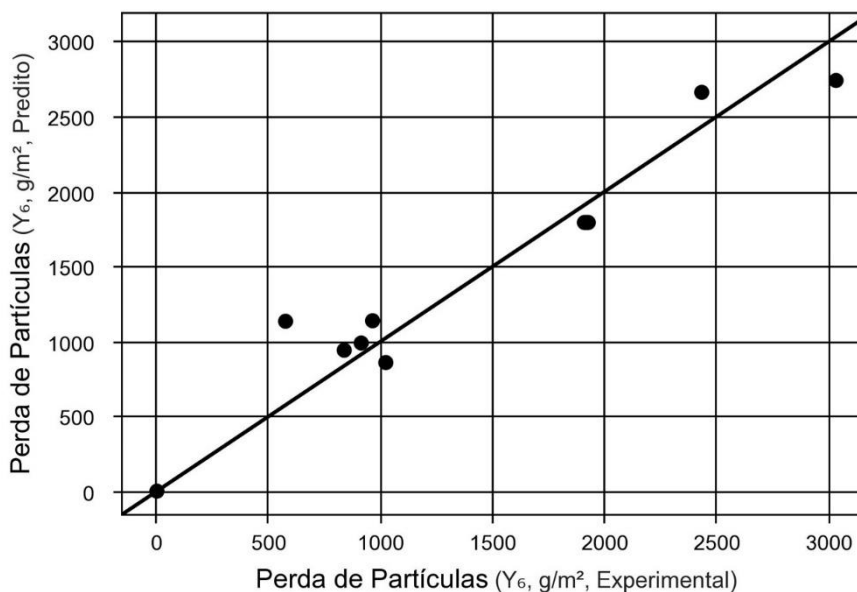
Modelo estatístico: $Y = 1790,42 + 137,67 x_1 - 796,05 x_1^2 - 761,17 x_2 + 106,45 x_2^2 - 737,25 x_1 x_2$

Tabela 38: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7400031	5,0	1480006	11,6	0,009
Resíduos	638469	5,0	127694		
Falta de Ajuste	638224	3,0	212741	1739,0	0,001
Erro Puro	245	2,0	122		
Total	8038500	10,0			

Fonte: Autor (2019)

Figura 61: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 39: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	97,34	0,15	653,22	0,00
X ₁	-1,17	0,12	-9,84	0,00
X ₁ ²	0,49	0,18	2,71	0,04
X ₂	0,33	0,12	2,81	0,04
X ₂ ²	-0,01	0,18	-0,03	0,98
X ₁ · X ₂	0,25	0,15	1,72	0,15

Fonte: Autor (2019)

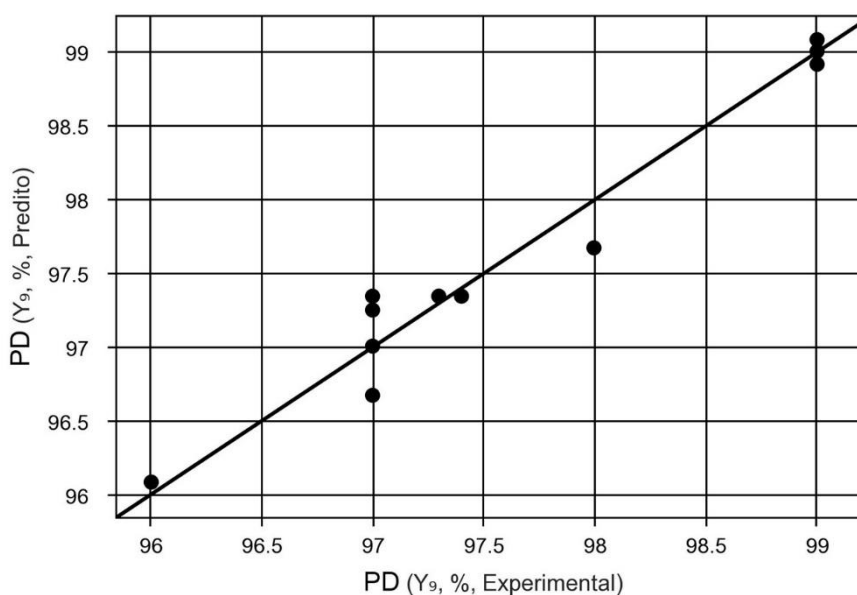
Modelo estatístico: $Y = 97,34 - 1,17 X_1 + 0,49 X_1^2 + 0,33 X_2 - 0,01 X_2^2 + 0,25 X_1 X_2$

Tabela 40: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	9,75	5,00	1,95	23,10	0,002
Resíduos	0,42	5,00	0,08		
Falta de Ajuste	0,34	3,00	0,11	2,58	0,292
Erro Puro	0,09	2,00	0,04		
Total	10,17	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 62: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 41: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	32,41	0,81	39,85	0,00
x ₁	2,92	0,65	4,51	0,01
x ₁ ²	3,72	1,00	3,74	0,01
x ₂	1,72	0,65	2,65	0,05
x ₂ ²	-0,28	1,00	-0,28	0,79
x ₁ · x ₂	1,25	0,79	1,58	0,18

Fonte: Autor (2019)

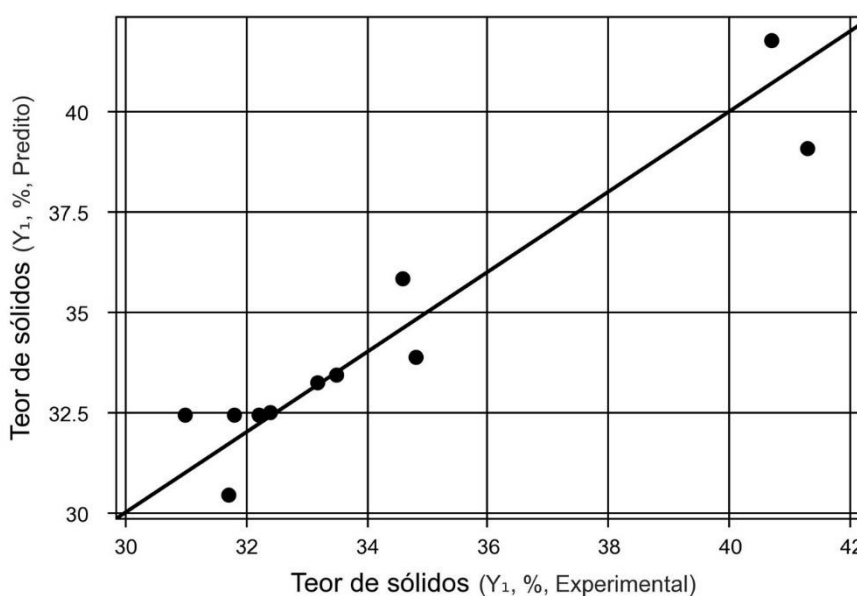
Modelo estatístico: $Y = 32,41 + 2,92 x_1 + 3,72 x_1^2 + 1,72 x_2 - 0,28 x_2^2 + 1,25 x_1 x_2$

Tabela 42: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	111,50	5,00	22,30	8,87	0,016
Resíduos	12,57	5,00	2,51		
Falta de Ajuste	11,82	3,00	3,94	10,55	0,088
Erro Puro	0,75	2,00	0,37		
Total	124,07	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 63: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 43: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	9,23	1,48	6,22	0,00
X ₁	4,88	1,18	4,13	0,01
X ₁ ²	0,87	1,82	0,48	0,65
X ₂	0,77	1,18	0,65	0,54
X ₂ ²	-2,48	1,82	-1,36	0,23
X ₁ · X ₂	1,92	1,45	1,33	0,24

Fonte: Autor (2019)

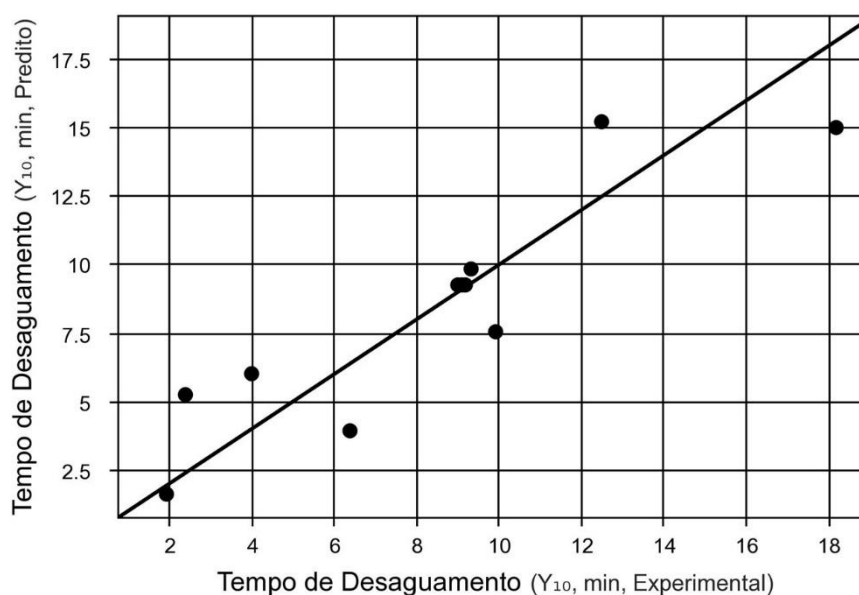
Modelo estatístico: $Y = 9,23 + 4,88 x_1 + 0,87 x_1^2 + 0,77 x_2 - 2,48 x_2^2 + 1,92 x_1 x_2$

Tabela 44: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	177,12	5,00	35,42	4,23	0,070
Resíduos	41,87	5,00	8,37		
Falta de Ajuste	41,85	3,00	13,95	1394,95	0,001
Erro Puro	0,02	2,00	0,01		
Total	218,99	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 64: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 45: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	87,42	3,33	26,27	0,00
x ₁	31,77	2,65	12,00	0,00
x ₁ ²	-17,59	4,08	-4,32	0,01
x ₂	8,97	2,65	3,39	0,02
x ₂ ²	-2,79	4,08	-0,69	0,52
x ₁ · x ₂	-5,03	3,24	-1,55	0,18

Fonte: Autor (2019)

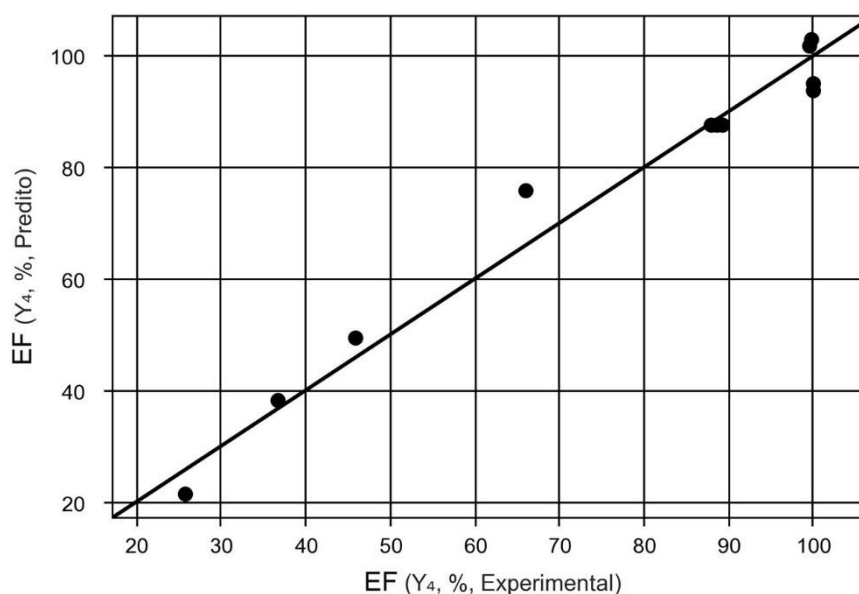
Modelo estatístico: $Y = 87,42 + 31,77 x_1 - 17,59 x_1^2 + 8,97 x_2 - 2,79 x_2^2 - 5,03 x_1 x_2$

Tabela 46: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7574,96	5,00	1514,99	36,01	0,001
Resíduos	210,38	5,00	42,08		
Falta de Ajuste	209,56	3,00	69,85	170,04	0,006
Erro Puro	0,82	2,00	0,41		
Total	7785,34	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 65: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 47: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	359,37	116,90	3,07	0,03
x_1	-356,40	93,03	-3,83	0,01
x_1^2	-40,26	143,17	-0,28	0,79
x_2	-197,80	93,03	-2,13	0,09
x_2^2	74,57	143,17	0,52	0,62
$x_1 \cdot x_2$	57,58	113,94	0,51	0,63

Fonte: Autor (2019)

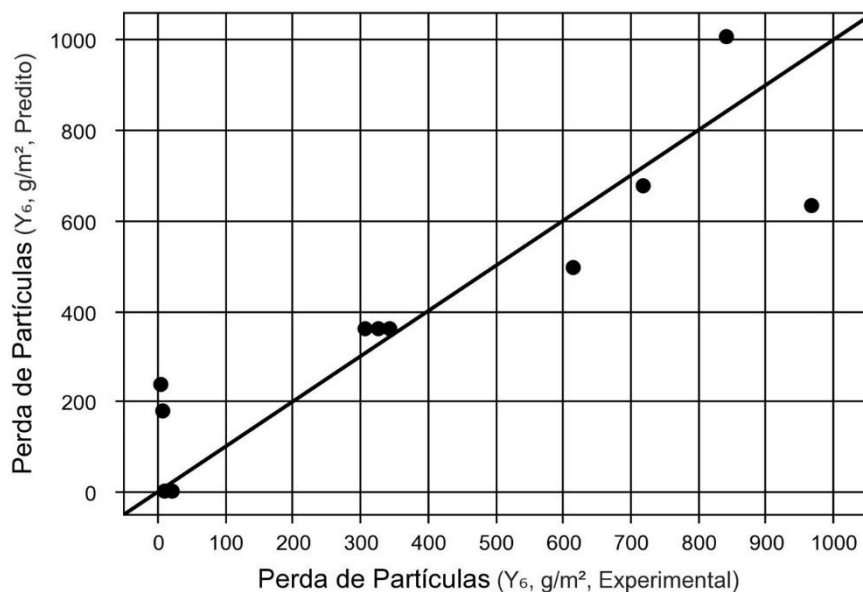
Modelo estatístico: $Y = 359,37 - 356,39 x_1 - 40,26 x_1^2 - 197,79 x_2 + 74,57 x_2^2 + 57,58 x_1 x_2$

Tabela 48: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1025324,8	5,00	205064,96	3,95	0,079
Resíduos	259625,0	5,00	51925,00		
Falta de Ajuste	258963,3	3,00	86321,09	260,90	0,004
Erro Puro	661,7	2,00	330,86		
Total	1284949,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 66: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 2
- Percentual de Desaguamento

Tabela 49: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	97,86	0,09	1063,09	0,000
x_1	-1,08	0,07	-14,79	0,000
x_1^2	0,19	0,11	1,70	0,149
x_2	0,08	0,07	1,14	0,307
x_2^2	-0,01	0,11	-0,07	0,947
$x_1 \cdot x_2$	-0,07	0,09	-0,84	0,441

Fonte: Autor (2019)

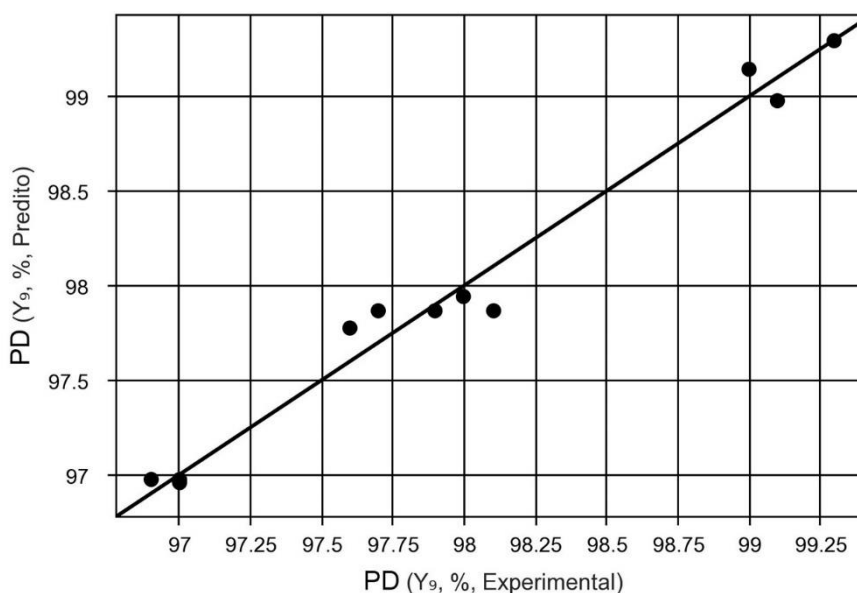
Modelo estatístico: $Y = 97,86 - 1,08 x_1 + 0,19 x_1^2 + 0,08 x_2 - 0,01 x_2^2 - 0,07 x_1 x_2$

Tabela 50: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	7,2	5,00	1,44	44,75	0,000
Resíduos	0,2	5,00	0,03		
Falta de Ajuste	0,1	3,00	0,03	0,68	0,643
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	7,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 67: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 2
- Teor de Sólidos

Tabela 51: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	39,39	0,94	42,07	0,000
x_1	3,97	0,75	5,32	0,003
x_1^2	-1,97	1,15	-1,72	0,146
x_2	0,47	0,75	0,63	0,559
x_2^2	-1,27	1,15	-1,11	0,317
$x_1 \cdot x_2$	0,30	0,91	0,33	0,756

Fonte: Autor (2019)

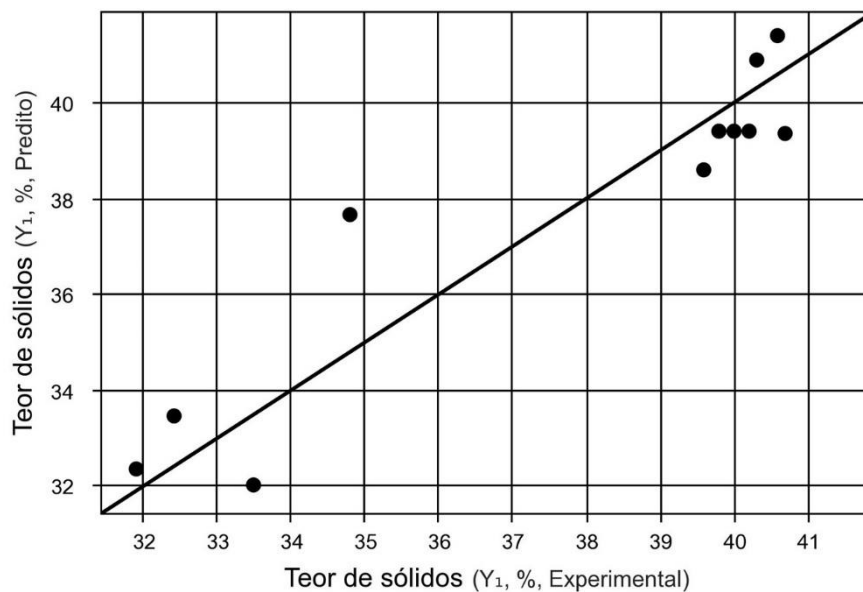
Modelo estatístico: $Y = 39,39 + 3,97 x_1 - 1,97 x_1^2 + 0,47 x_2 - 1,27 x_2^2 + 0,30 x_1 x_2$

Tabela 52: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	114,8	5,00	22,96	6,89	0,027
Resíduos	16,7	5,00	3,33		
Falta de Ajuste	16,6	3,00	5,53	138,15	0,007
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	131,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 68: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero catiônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 53: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	15,18	3,08	4,92	0,004
x_1	19,48	2,45	7,94	0,001
x_1^2	9,24	3,78	2,45	0,058
x_2	10,73	2,45	4,37	0,007
x_2^2	-2,51	3,78	-0,66	0,536
$x_1 \cdot x_2$	12,22	3,01	4,07	0,010

Fonte: Autor (2019)

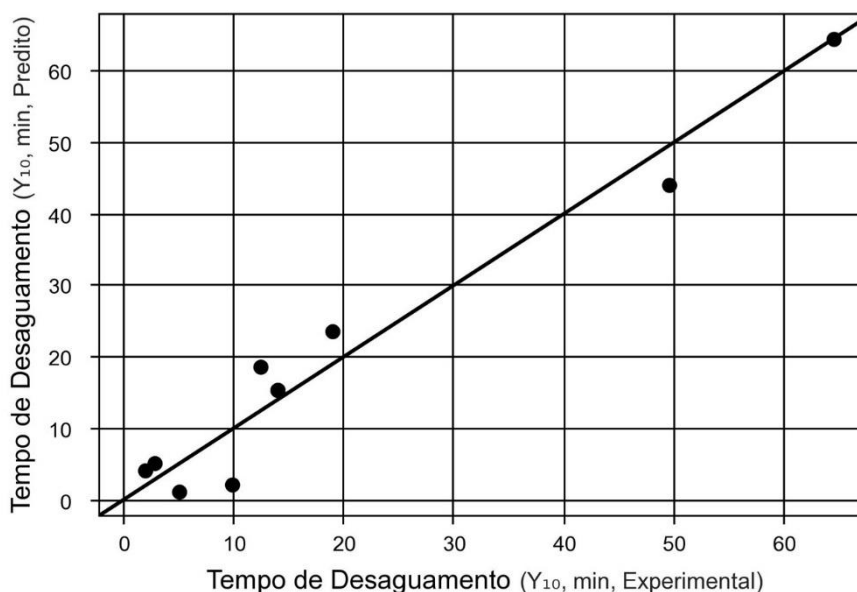
Modelo estatístico: $Y = 15,18 + 19,48 x_1 + 9,24 x_1^2 + 10,73 x_2 - 2,51 x_2^2 + 12,22 x_1 x_2$

Tabela 54: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	3782,9	5,00	756,58	20,93	0,002
Resíduos	180,7	5,00	36,14		
Falta de Ajuste	180,7	3,00	60,24	Infinity	NaN
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	3963,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 69: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 55: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	25,81	8,58	3,01	0,030
x_1	36,00	6,83	5,27	0,003
x_1^2	27,18	10,51	2,59	0,049
x_2	6,30	6,83	0,92	0,398
x_2^2	16,38	10,51	1,56	0,180
$x_1 \cdot x_2$	3,30	8,36	0,39	0,709

Fonte: Autor (2019)

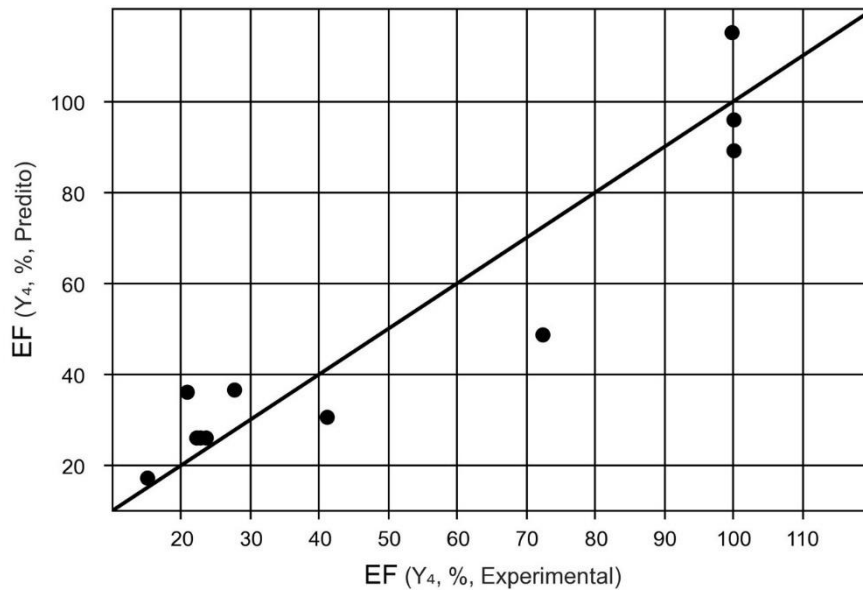
Modelo estatístico: $Y = 25,81 + 36 x_1 + 27,18 x_1^2 + 6,30 x_2 + 16,38 x_2^2 + 3,30 x_1 x_2$

Tabela 56: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	11450,8	5,00	2290,17	8,19	0,019
Resíduos	1397,9	5,00	279,58		
Falta de Ajuste	1396,8	3,00	465,59	813,78	0,001
Erro Puro	1,1	2,00	0,57		
Total	12848,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 70: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 57: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2073,28	232,03	8,94	0,000
x ₁	-407,57	184,66	-2,21	0,078
x ₁ ²	-1409,65	284,18	-4,96	0,004
x ₂	-217,02	184,66	-1,18	0,293
x ₂ ²	-377,80	284,18	-1,33	0,241
x ₁ · x ₂	-35,43	226,16	-0,16	0,882

Fonte: Autor (2019)

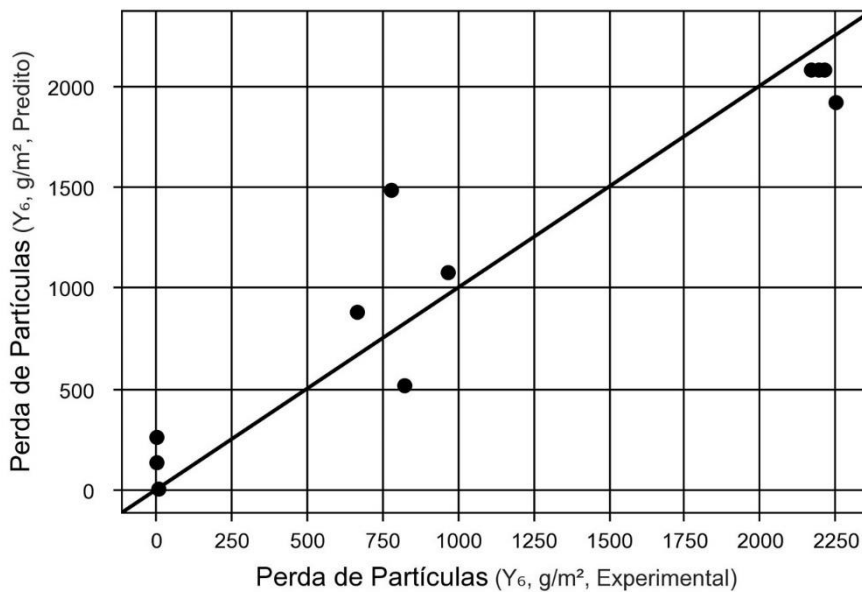
Modelo estatístico: $Y = 2073,28 - 407,57 x_1 - 1409,65 x_1^2 - 217,02 x_2 - 377,80 x_2^2 - 35,42 x_1 x_2$

Tabela 58: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7867540,1	5,00	1573508,02	7,69	0,021
Resíduos	1022950,4	5,00	204590,08		
Falta de Ajuste	1021997,9	3,00	340665,95	715,26	0,001
Erro Puro	952,6	2,00	476,28		
Total	8890490,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 71: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 59: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	96,92	0,20	484,72	0,000
X ₁	-1,00	0,16	-6,28	0,001
X ₁ ²	0,85	0,24	3,46	0,018
X ₂	0,17	0,16	1,05	0,343
X ₂ ²	0,35	0,24	1,42	0,215
X ₁ · X ₂	0,00	0,19	0,00	1,000

Fonte: Autor (2019)

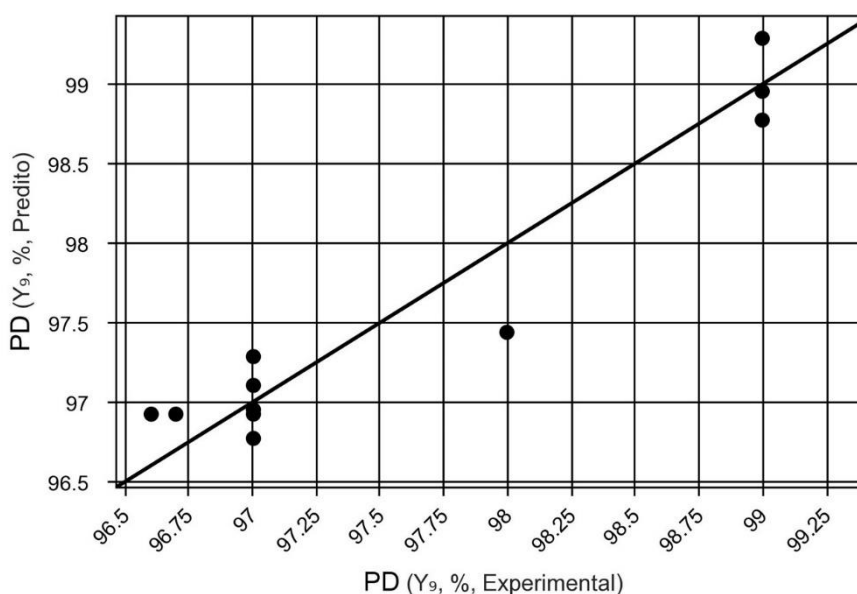
Modelo estatístico: $Y = 96,92 - 1 X_1 + 0,85 X_1^2 + 0,17 X_2 + 0,35 X_2^2 + 0 X_1 X_2$

Tabela 60: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8,9	5,00	1,78	11,69	0,009
Resíduos	0,8	5,00	0,15		
Falta de Ajuste	0,7	3,00	0,22	5,18	0,166
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	9,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 72: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 61: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	40,53	0,82	49,16	0,000
X ₁	1,60	0,66	2,44	0,059
X ₁ ²	-2,08	1,01	-2,06	0,095
X ₂	-2,17	0,66	-3,30	0,021
X ₂ ²	0,32	1,01	0,32	0,763
X ₁ · X ₂	1,60	0,80	1,99	0,103

Fonte: Autor (2019)

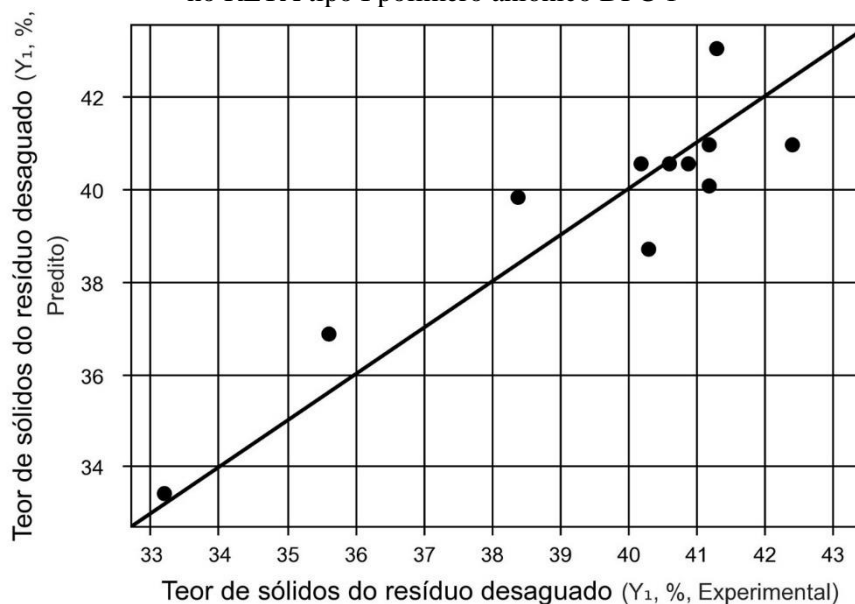
Modelo estatístico: $Y = 40,53 + 1,60 x_1 - 2,08 x_1^2 - 2,17 x_2 + 0,32 x_2^2 + 1,60 x_1 x_2$

Tabela 62: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	64,9	5,00	12,97	5,02	0,051
Resíduos	12,9	5,00	2,58		
Falta de Ajuste	12,7	3,00	4,22	34,25	0,029
Erro Puro	0,2	2,00	0,12		
Total	77,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 73: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 63: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2,73	1,41	1,93	0,111
X ₁	6,13	1,12	5,46	0,003
X ₁ ²	11,38	1,73	6,58	0,001
X ₂	1,45	1,12	1,29	0,254
X ₂ ²	1,34	1,73	0,77	0,475
X ₁ · X ₂	-0,63	1,38	-0,45	0,669

Fonte: Autor (2019)

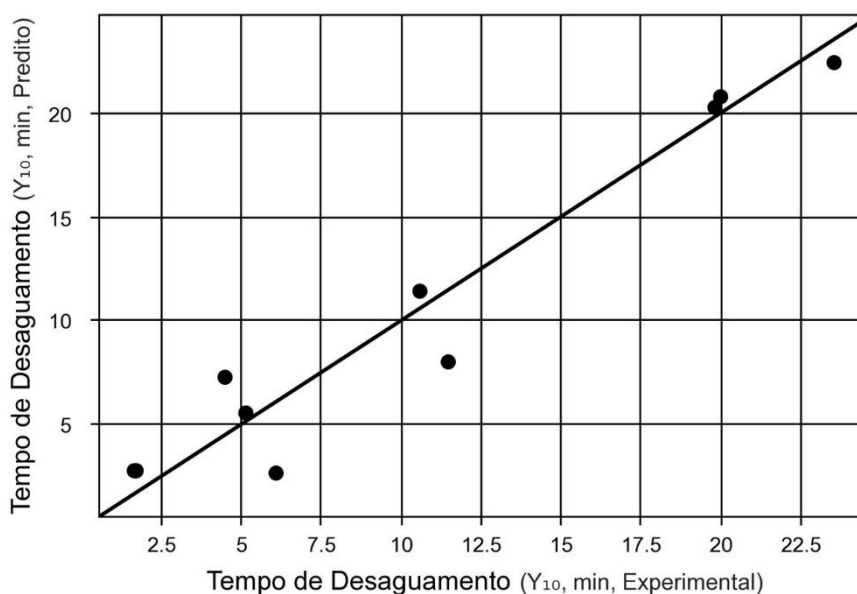
Modelo estatístico: $Y = 2,73 + 6,13 X_1 + 11,38 X_1^2 + 1,45 X_2 + 1,34 X_2^2 - 0,62 X_1 X_2$

Tabela 64: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	619,6	5,00	123,91	16,35	0,004
Resíduos	37,9	5,00	7,58		
Falta de Ajuste	37,9	3,00	12,63	9713,89	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	657,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 74: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 65: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	78,22	4,39	17,82	0,000
x ₁	31,17	3,49	8,92	0,000
x ₁ ²	-15,19	5,38	-2,83	0,037
x ₂	9,90	3,49	2,83	0,037
x ₂ ²	8,41	5,38	1,56	0,179
x ₁ · x ₂	-9,65	4,28	-2,25	0,074

Fonte: Autor (2019)

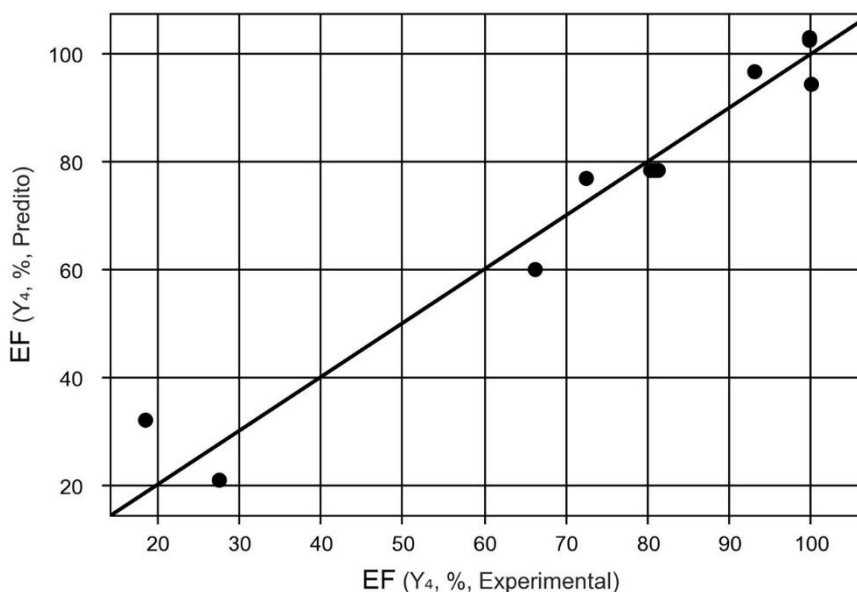
Modelo estatístico: $Y = 78,22 + 31,17 x_1 - 15,19 x_1^2 + 9,90 x_2 + 8,41 x_2^2 - 9,65 x_1 x_2$

Tabela 66: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7425,2	5,00	1485,04	20,27	0,002
Resíduos	366,3	5,00	73,26		
Falta de Ajuste	366,0	3,00	121,99	752,38	0,001
Erro Puro	0,3	2,00	0,16		
Total	7791,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 75: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 67: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	567,23	67,69	8,38	0,000
x_1	-351,39	53,87	-6,52	0,001
x_1^2	-134,71	82,91	-1,62	0,165
x_2	-171,53	53,87	-3,18	0,024
x_2^2	-110,22	82,91	-1,33	0,241
$x_1 \cdot x_2$	108,72	65,98	1,65	0,160

Fonte: Autor (2019)

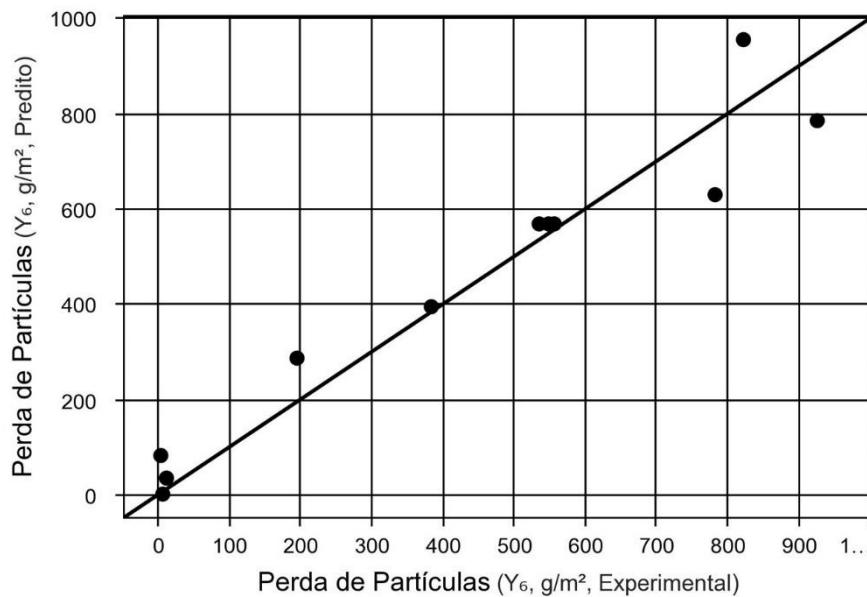
Modelo estatístico: $Y = 567,23 - 351,39 x_1 - 134,71 x_1^2 - 171,53 x_2 - 110,22 x_2^2 + 108,72 x_1 x_2$

Tabela 68: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1068880,1	5,00	213776,01	12,28	0,008
Resíduos	87063,9	5,00	17412,79		
Falta de Ajuste	86825,9	3,00	28941,96	243,14	0,004
Erro Puro	238,1	2,00	119,03		
Total	1155944,0	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 76: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 2
- Percentual de Desaguamento

Tabela 69: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	98,16	0,20	480,79	0,000
x ₁	-1,33	0,16	-8,21	0,000
x ₁ ²	-0,29	0,25	-1,18	0,292
x ₂	-0,33	0,16	-2,05	0,095
x ₂ ²	-0,29	0,25	-1,18	0,292
x ₁ · x ₂	-0,50	0,20	-2,51	0,054

Fonte: Autor (2019)

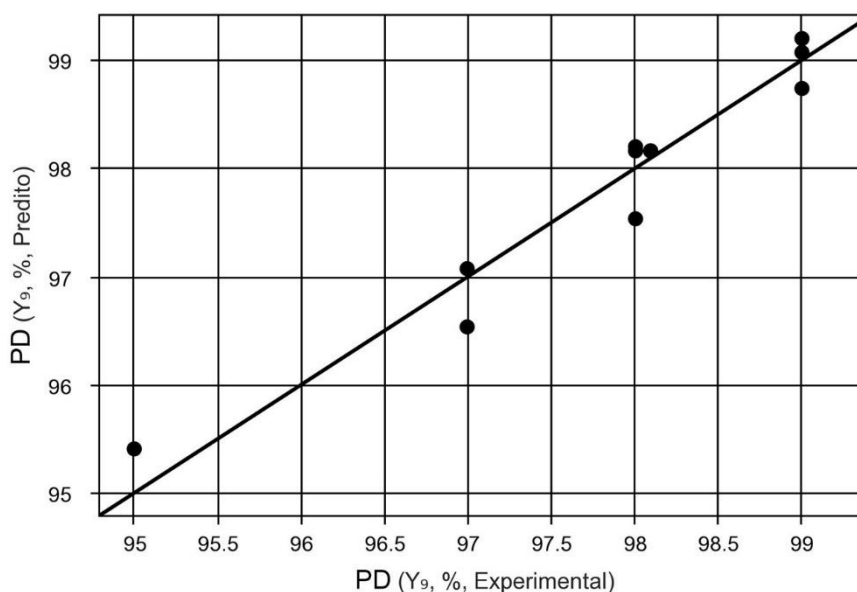
Modelo estatístico: $Y = 98,16 - 1,33 x_1 - 0,29 x_1^2 - 0,33 x_2 - 0,29 x_2^2 - 0,50 x_1 x_2$

Tabela 70: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	12,9	5,00	2,59	16,33	0,004
Resíduos	0,8	5,00	0,16		
Falta de Ajuste	0,8	3,00	0,26	78,53	0,013
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	13,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 77: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 71: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	35,67	1,07	33,22	0,000
x ₁	1,77	0,85	2,07	0,094
x ₁ ²	-1,98	1,32	-1,51	0,192
x ₂	-3,58	0,85	-4,19	0,009
x ₂ ²	-0,63	1,32	-0,48	0,650
x ₁ · x ₂	-1,50	1,05	-1,43	0,211

Fonte: Autor (2019)

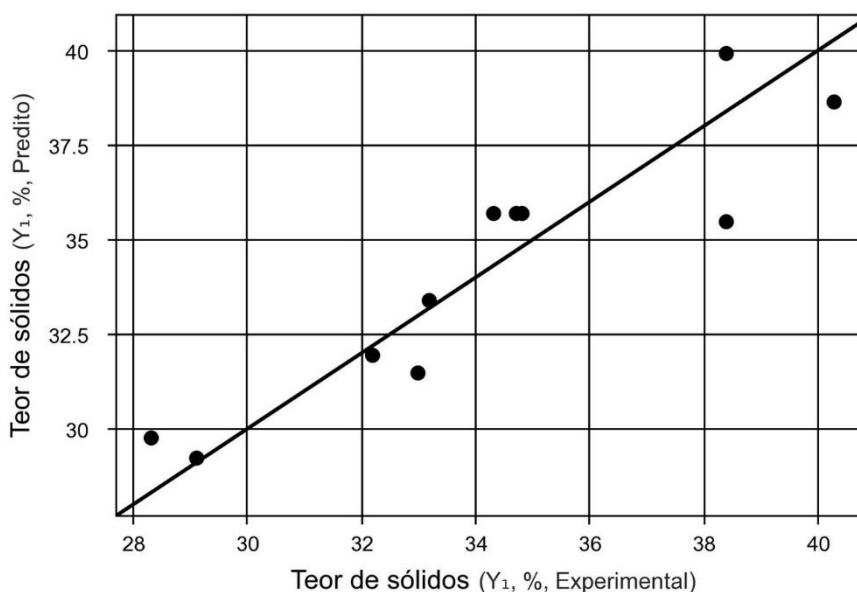
Modelo estatístico: $Y = 35,67 + 1,77 x_1 - 1,98 x_1^2 - 3,58 x_2 - 0,63 x_2^2 - 1,50 x_1 x_2$

Tabela 72: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	118,4	5,00	23,69	5,40	0,044
Resíduos	21,9	5,00	4,38		
Falta de Ajuste	21,8	3,00	7,26	103,69	0,010
Erro Puro	0,1	2,00	0,07		
Total	140,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 78: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero aniônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 73: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	6,66	1,36	4,89	0,005
x_1	11,54	1,09	10,63	0,000
x_1^2	7,51	1,67	4,49	0,006
x_2	2,38	1,09	2,19	0,080
x_2^2	3,81	1,67	2,28	0,072
$x_1 \cdot x_2$	4,68	1,33	3,52	0,017

Fonte: Autor (2019)

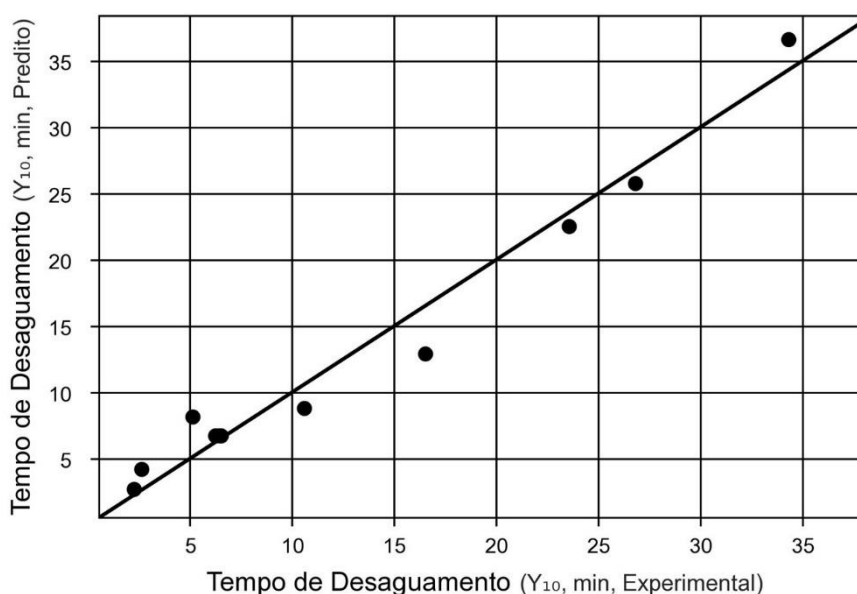
Modelo estatístico: $Y = 6,66 + 11,54 x_1 + 7,51 x_1^2 + 2,38 x_2 + 3,81 x_2^2 + 4,68 x_1 x_2$

Tabela 74: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1154,6	5,00	230,92	32,67	0,001
Resíduos	35,3	5,00	7,07		
Falta de Ajuste	35,3	3,00	11,77	884,98	0,001
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	1189,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 79: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 75: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	31,32	4,97	6,30	0,001
x_1	15,52	3,96	3,92	0,011
x_1^2	-10,04	6,09	-1,65	0,160
x_2	20,23	3,96	5,11	0,004
x_2^2	10,81	6,09	1,77	0,136
$x_1 \cdot x_2$	13,08	4,85	2,70	0,043

Fonte: Autor (2019)

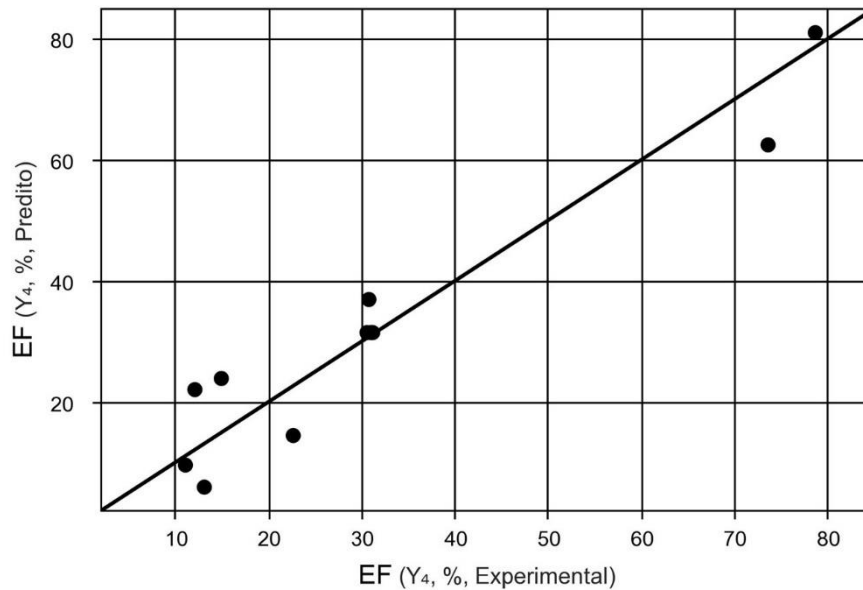
Modelo estatístico: $Y = 31,32 + 15,52 x_1 - 10,04 x_1^2 + 20,23 x_2 + 10,81 x_2^2 + 13,08 x_1 x_2$

Tabela 76: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	5020,5	5,00	1004,10	10,68	0,011
Resíduos	469,9	5,00	93,97		
Falta de Ajuste	469,6	3,00	156,54	1204,12	0,001
Erro Puro	0,3	2,00	0,13		
Total	5490,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 80: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 77: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC

1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	1992,42	136,31	14,62	0,000
x_1	778,33	108,48	7,18	0,001
x_1^2	41,95	166,94	0,25	0,812
x_2	-722,67	108,48	-6,66	0,001
x_2^2	-401,05	166,94	-2,40	0,061
$x_1 \cdot x_2$	-626,25	132,86	-4,71	0,005

Fonte: Autor (2019)

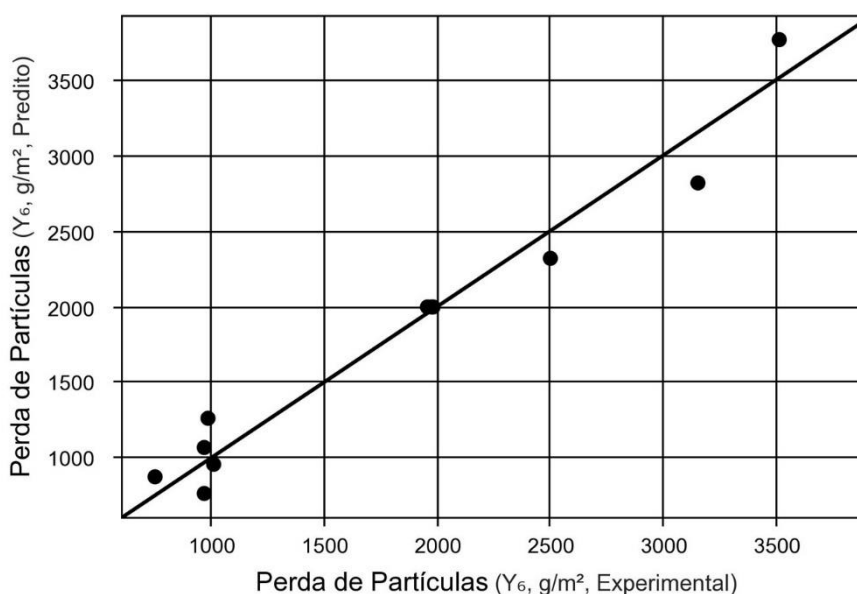
Modelo estatístico: $1992,42 + 778,33 x_1 + 41,95 x_1^2 - 722,67 x_2 - 401,05 x_2^2 - 626,25 x_1 x_2$

Tabela 78: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	8756047,8	5,00	1751209,56	24,80	0,002
Resíduos	353014,9	5,00	70602,99		
Falta de Ajuste	352718,9	3,00	117572,98	794,41	0,001
Erro Puro	296,0	2,00	148,00		
Total	9109062,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 81: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 79: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	97,76	0,07	1424,91	0,000
X ₁	-1,12	0,05	-20,45	0,000
X ₁ ²	0,26	0,08	3,04	0,029
X ₂	0,23	0,05	4,27	0,008
X ₂ ²	0,01	0,08	0,06	0,952
X ₁ · X ₂	0,13	0,07	1,87	0,121

Fonte: Autor (2019)

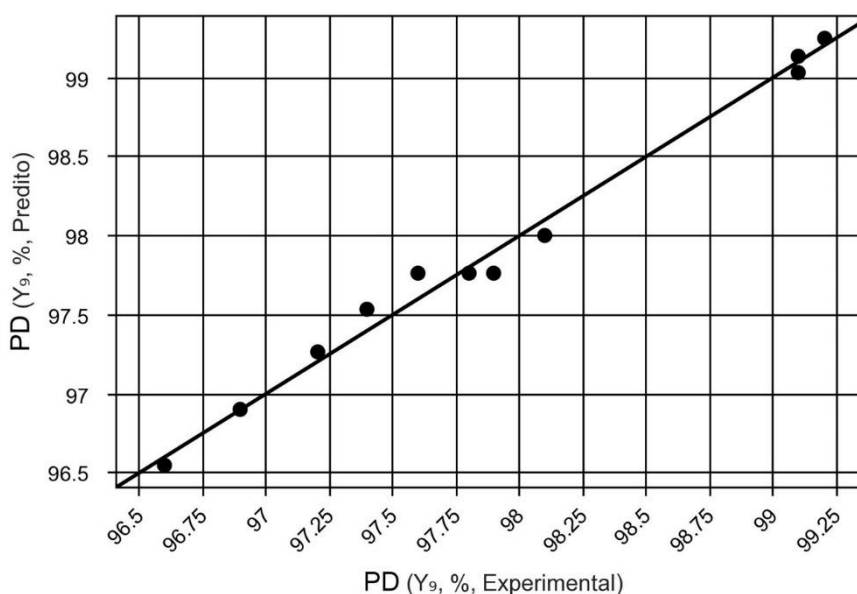
Modelo estatístico: $Y = 97,76 - 1,12 x_1 + 0,26 x_1^2 + 0,23 x_2 + 0,01 x_2^2 + 0,13 x_1 x_2$

Tabela 80: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8,1	5,00	1,61	90,02	0,000
Resíduos	0,1	5,00	0,02		
Falta de Ajuste	0,0	3,00	0,01	0,61	0,669
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	8,1	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 82: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 81: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	36,71	0,54	67,91	0,000
X ₁	3,20	0,43	7,44	0,001
X ₁ ²	0,24	0,66	0,36	0,735
X ₂	2,43	0,43	5,66	0,002
X ₂ ²	0,14	0,66	0,21	0,844
X ₁ · X ₂	0,80	0,53	1,52	0,189

Fonte: Autor (2019)

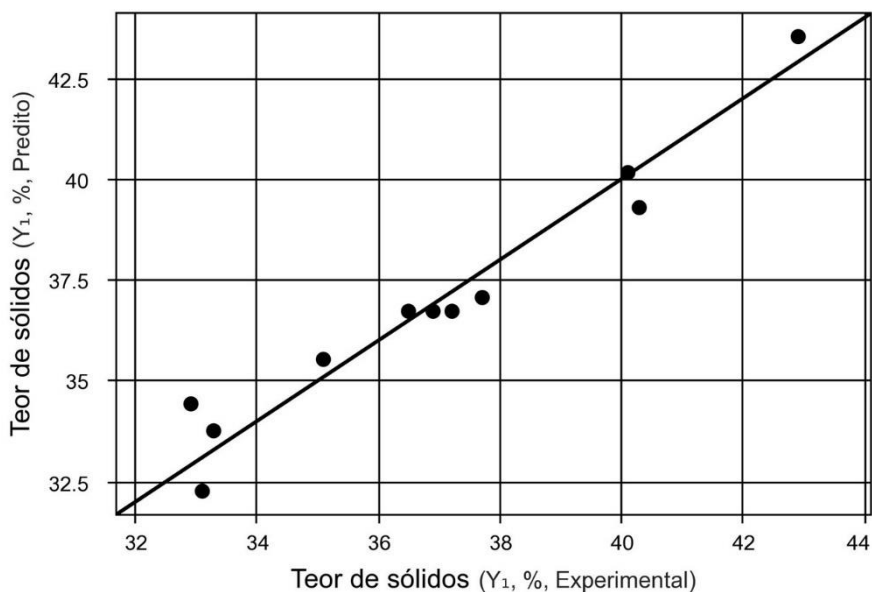
Modelo estatístico: $Y = 36,71 + 3,20 x_1 + 0,24 x_1^2 + 2,43 x_2 + 0,14 x_2^2 + 0,80 x_1 x_2$

Tabela 82: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	99,8	5,00	19,96	17,97	0,003
Resíduos	5,6	5,00	1,11		
Falta de Ajuste	5,3	3,00	1,77	14,34	0,066
Erro Puro	0,2	2,00	0,12		
Total	105,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 83: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1



RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 83: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	9,04	1,13	7,98	0,000
X ₁	4,02	0,90	4,45	0,007
X ₁ ²	1,52	1,39	1,10	0,322
X ₂	3,70	0,90	4,10	0,009
X ₂ ²	-2,13	1,39	-1,53	0,186
X ₁ · X ₂	3,50	1,10	3,17	0,025

Fonte: Autor (2019)

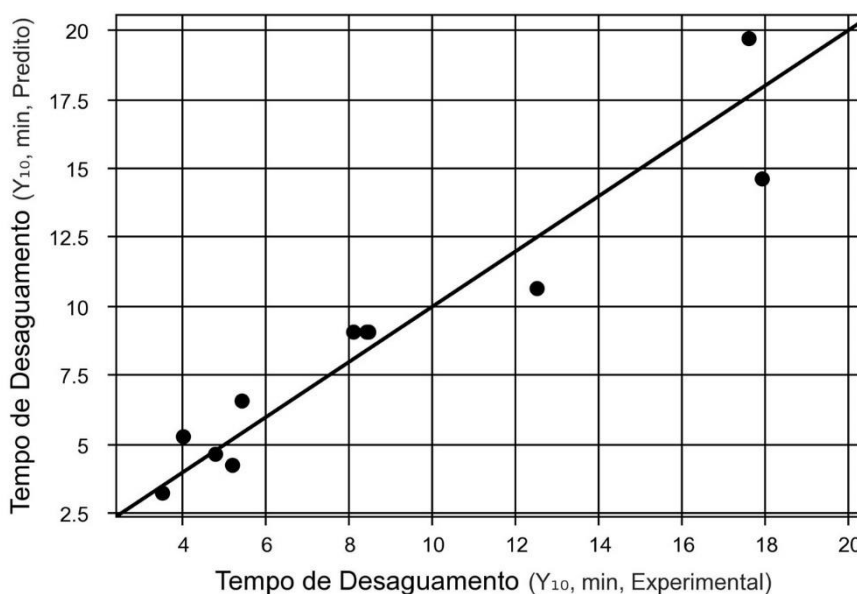
Modelo estatístico: $Y = 9,04 + 4,02 x_1 + 1,52 x_1^2 + 3,70 x_2 - 2,13 x_2^2 + 3,50 x_1 x_2$

Tabela 84: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	241,9	5,00	48,38	9,92	0,012
Resíduos	24,4	5,00	4,88		
Falta de Ajuste	24,3	3,00	8,10	217,87	0,005
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	266,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 84: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 85: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	66,44	6,27	10,59	0,000
x_1	21,82	4,99	4,37	0,007
x_1^2	-0,69	7,68	-0,09	0,932
x_2	18,32	4,99	3,67	0,014
x_2^2	8,01	7,68	1,04	0,345
$x_1 \cdot x_2$	-12,00	6,11	-1,96	0,107

Fonte: Autor (2019)

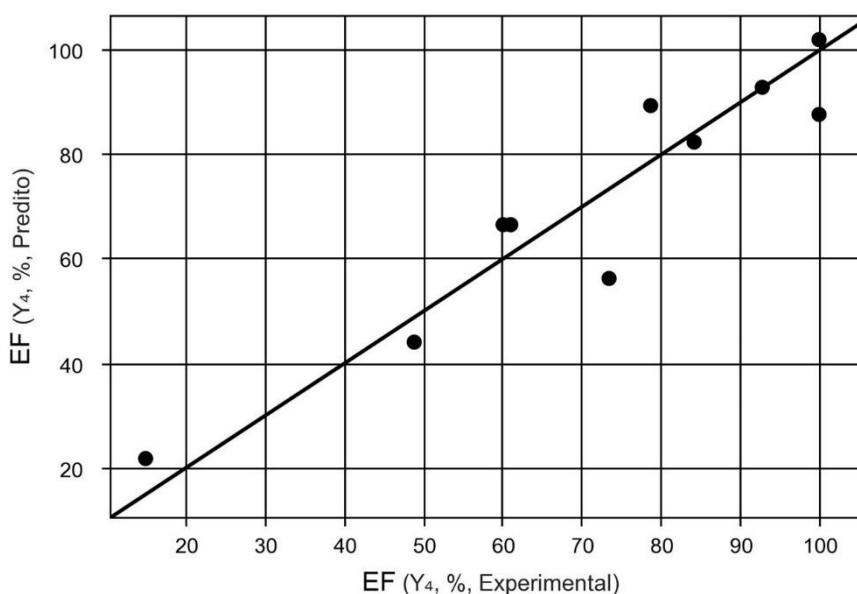
Modelo estatístico: $Y = 66,44 + 21,82 x_1 - 0,69 x_1^2 + 18,32 x_2 + 8,01 x_2^2 - 12 x_1 x_2$

Tabela 86: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	5612,9	5,00	1122,59	7,51	0,023
Resíduos	747,7	5,00	149,54		
Falta de Ajuste	747,1	3,00	249,03	820,99	0,001
Erro Puro	0,6	2,00	0,30		
Total	6360,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 85: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 87: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	924,05	176,18	5,25	0,003
x ₁	-126,83	140,21	-0,90	0,407
x ₁ ²	-360,13	215,77	-1,67	0,156
x ₂	-384,33	140,21	-2,74	0,041
x ₂ ²	-171,63	215,77	-0,80	0,462
x ₁ · x ₂	-45,00	171,72	-0,26	0,804

Fonte: Autor (2019)

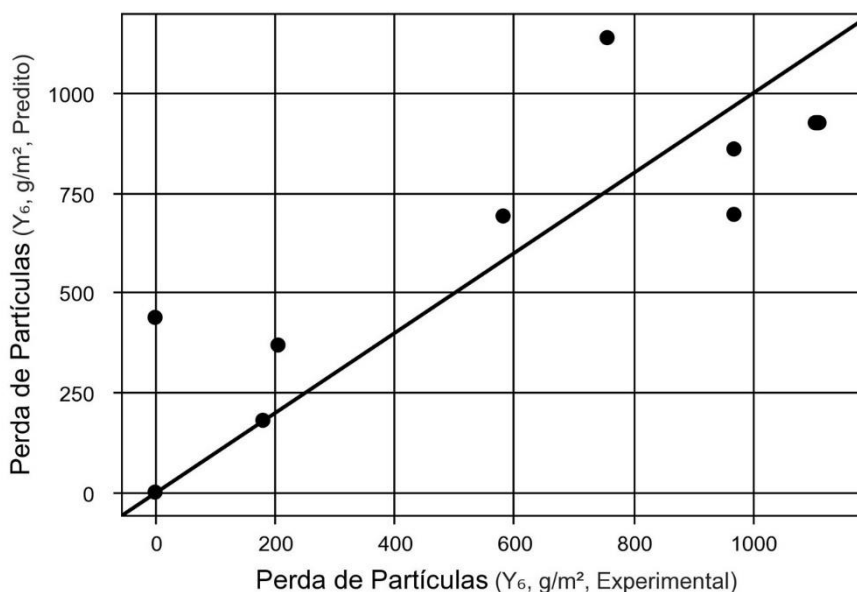
Modelo estatístico: $Y = 924,05 - 126,83 x_1 - 360,13 x_1^2 - 384,33 x_2 - 171,63 x_2^2 - 45 x_1 x_2$

Tabela 88: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1514849,5	5,00	302969,91	2,57	0,162
Resíduos	589728,5	5,00	117945,69		
Falta de Ajuste	589695,8	3,00	196565,26	12034,61	0,000
Erro Puro	32,7	2,00	16,33		
Total	2104578,0	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 86: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 89: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	98,20	0,03	3907,06	0,000
x_1	-1,01	0,02	-50,50	0,000
x_1^2	0,07	0,03	2,41	0,061
x_2	0,04	0,02	1,83	0,126
x_2^2	-0,06	0,03	-1,81	0,130
$x_1 \cdot x_2$	-0,04	0,02	-1,43	0,212

Fonte: Autor (2019)

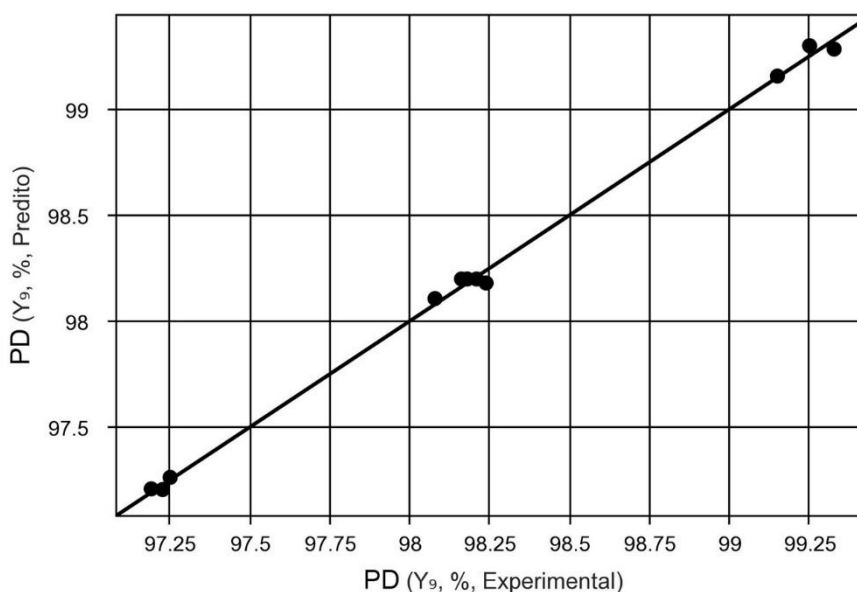
Modelo estatístico: $Y = 98,20 - 1,01 x_1 + 0,07 x_1^2 + 0,04 x_2 - 0,06 x_2^2 - 0,04 x_1 x_2$

Tabela 90: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	6,2	5,00	1,23	512,51	0,000
Resíduos	0,0	5,00	0,00		
Falta de Ajuste	0,0	3,00	0,00	5,65	0,154
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	6,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 87: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 91: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	41,87	0,15	284,81	0,000
x_1	2,47	0,12	21,08	0,000
x_1^2	-1,28	0,18	-7,13	0,001
x_2	1,20	0,12	10,26	0,000
x_2^2	-0,38	0,18	-2,13	0,086
$x_1 \cdot x_2$	-1,45	0,14	-10,12	0,000

Fonte: Autor (2019)

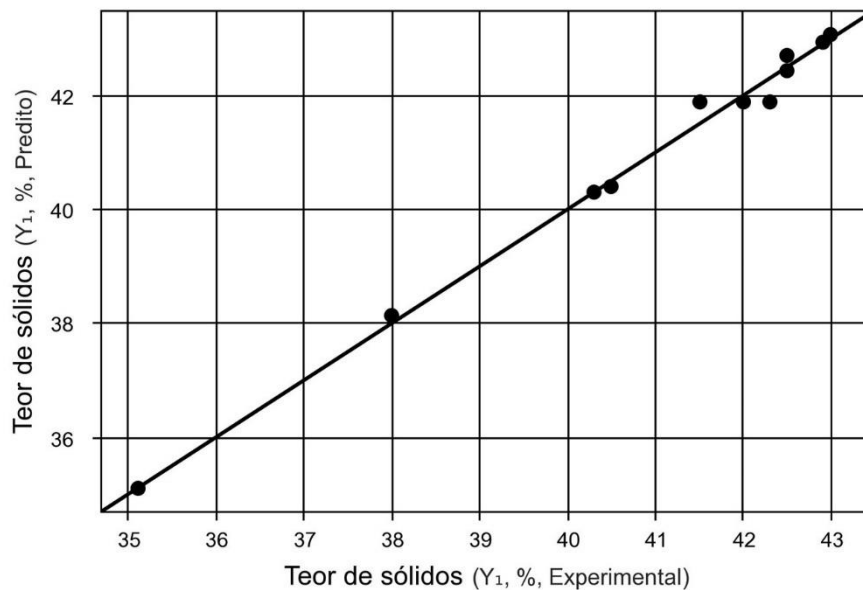
Modelo estatístico: $Y = 41,87 + 2,47 x_1 - 1,28 x_1^2 + 1,20 x_2 - 0,38 x_2^2 - 1,45 x_1 x_2$

Tabela 92: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	59,2	5,00	11,83	144,08	0,000
Resíduos	0,4	5,00	0,08		
Falta de Ajuste	0,1	3,00	0,03	0,17	0,907
Erro Puro	0,3	2,00	0,16		
Total	59,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 88: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2



RETA TIPO I: Polímero não iônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 93: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	17,09	3,57	4,79	0,005
x_1	17,32	2,84	6,10	0,002
x_1^2	14,58	4,37	3,34	0,021
x_2	10,22	2,84	3,60	0,016
x_2^2	-4,98	4,37	-1,14	0,306
$x_1 \cdot x_2$	11,28	3,48	3,24	0,023

Fonte: Autor (2019)

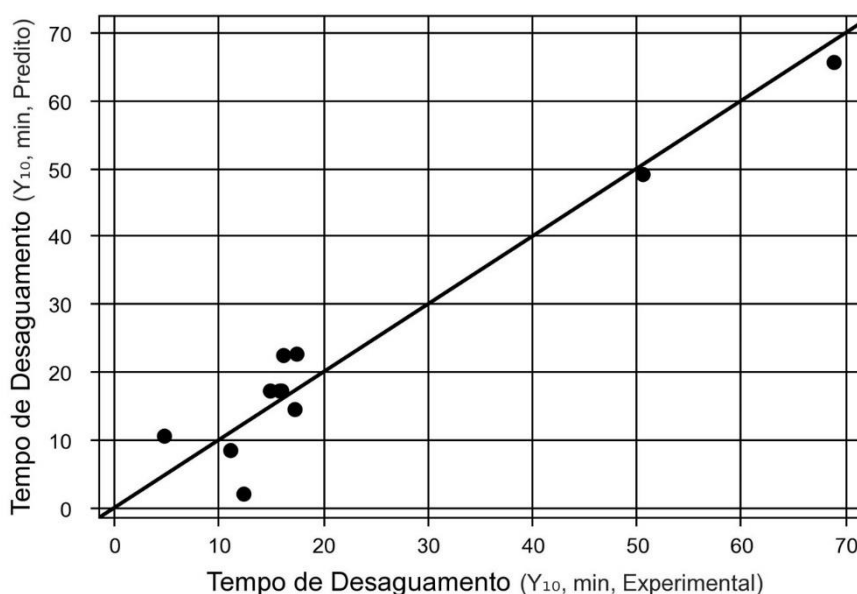
Modelo estatístico: $Y = 17,09 + 17,32 x_1 + 14,58 x_1^2 + 10,22 x_2 - 4,98 x_2^2 + 11,28 x_1 x_2$

Tabela 94: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	3476,4	5,00	695,27	14,36	0,005
Resíduos	242,0	5,00	48,40		
Falta de Ajuste	241,5	3,00	80,48	287,44	0,003
Erro Puro	0,6	2,00	0,28		
Total	3718,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 89: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo I polímero não iônico DFC 2



RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 95: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	87,37	7,51	11,63	0,000
X ₁	18,52	5,98	3,10	0,027
X ₁ ²	-10,11	9,20	-1,10	0,322
X ₂	32,23	5,98	5,39	0,003
X ₂ ²	-23,16	9,20	-2,52	0,053
X ₁ · X ₂	1,85	7,32	0,25	0,811

Fonte: Autor (2019)

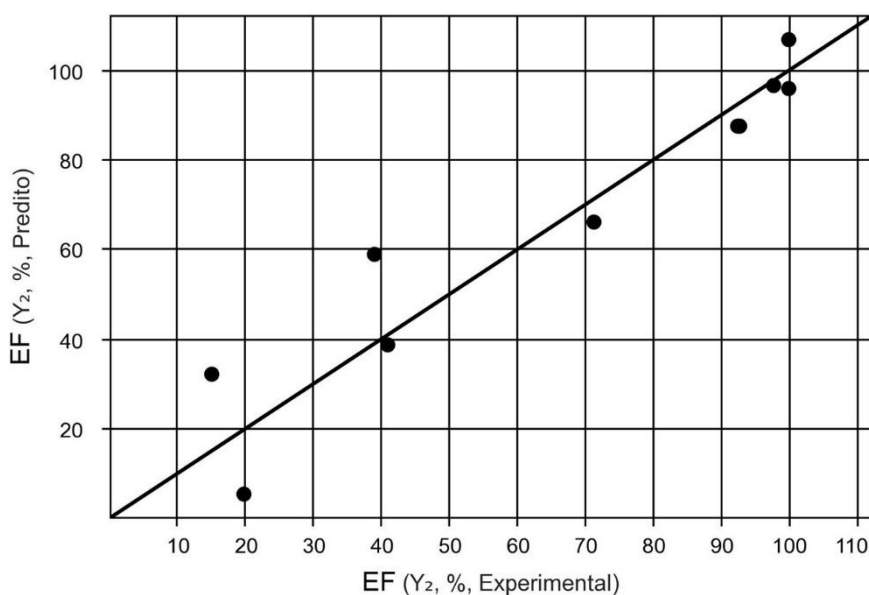
Modelo estatístico: $Y = 87,37 + 18,52 x_1 - 10,11 x_1^2 + 32,23 x_2 - 23,16 x_2^2 + 1,85 x_1 x_2$

Tabela 96: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	10388,0	5,00	2077,60	9,68	0,013
Resíduos	1072,8	5,00	214,56		
Falta de Ajuste	1072,7	3,00	357,58	9823,66	0,000
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	11460,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 90: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 97: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	293,96	222,44	1,32	0,244
x ₁	125,32	177,02	0,71	0,511
x ₁ ²	-71,10	272,43	-0,26	0,805
x ₂	-936,88	177,02	-5,29	0,003
x ₂ ²	820,00	272,43	3,01	0,030
x ₁ · x ₂	-523,30	216,81	-2,41	0,061

Fonte: Autor (2019)

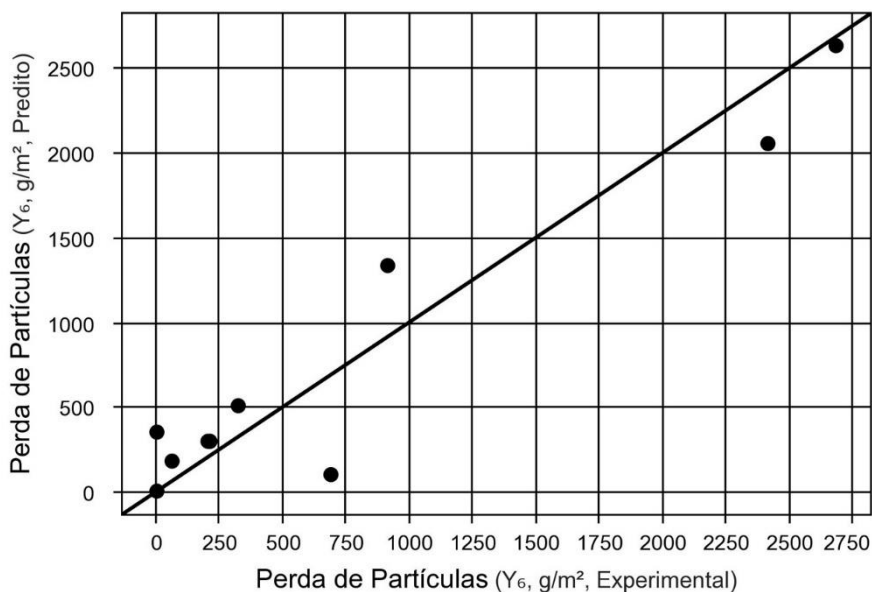
Modelo estatístico: $Y = 293,96 + 125,32 x_1 - 71,10 x_1^2 - 936,88 x_2 + 820 x_2^2 - 523,30 x_1 x_2$

Tabela 98: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8218877,1	5,00	1643775,43	8,74	0,016
Resíduos	940122,2	5,00	188024,44		
Falta de Ajuste	940064,9	3,00	313354,97	10945,85	0,000
Erro Puro	57,3	2,00	28,63		
Total	9158999,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 91: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 99: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	94,43	0,55	172,92	0,000
X ₁	-4,42	0,43	-10,16	0,000
X ₁ ²	-2,31	0,67	-3,45	0,018
X ₂	-1,00	0,43	-2,30	0,070
X ₂ ²	0,14	0,67	0,21	0,843
X ₁ · X ₂	-1,28	0,53	-2,40	0,062

Fonte: Autor (2019)

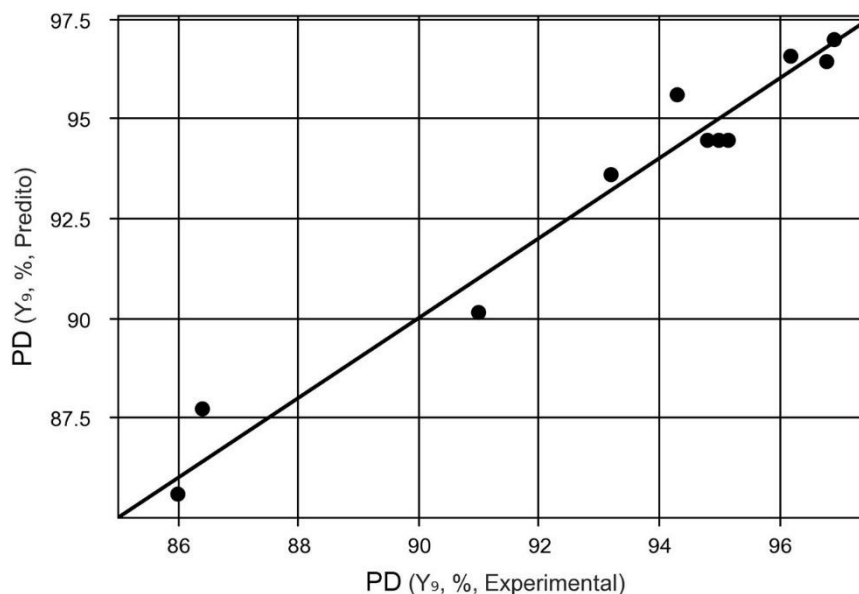
Modelo estatístico: $Y = 94,43 - 4,42 x_1 - 2,31 x_1^2 - 1 x_2 + 0,14 x_2^2 - 1,28 x_1 x_2$

Tabela 100: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	143,7	5,00	28,74	25,36	0,001
Resíduos	5,7	5,00	1,13		
Falta de Ajuste	5,6	3,00	1,87	60,60	0,016
Erro Puro	0,1	2,00	0,03		
Total	149,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 92: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 1
- Teor de Sólidos

Tabela 101: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	18,11	1,07	16,96	0,000
x ₁	0,53	0,85	0,63	0,558
x ₁ ²	-3,46	1,31	-2,65	0,045
x ₂	-1,28	0,85	-1,51	0,191
x ₂ ²	-0,41	1,31	-0,32	0,765
x ₁ · x ₂	-1,60	1,04	-1,54	0,185

Fonte: Autor (2019)

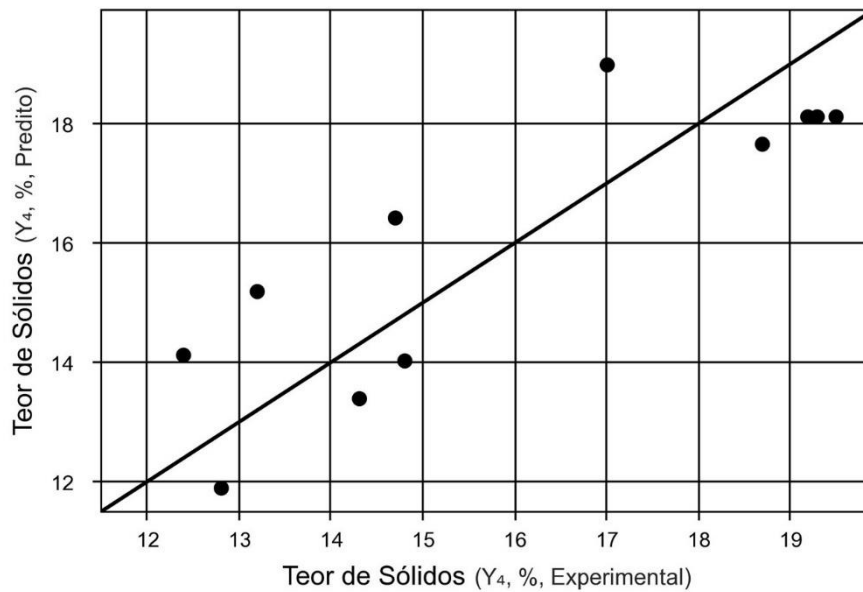
Modelo estatístico: $Y = 18,11 + 0,53 x_1 - 3,46 x_1^2 - 1,28 x_2 - 0,41 x_2^2 - 1,60 x_1 x_2$

Tabela 102: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	57,1	5,00	11,42	2,64	0,155
Resíduos	21,6	5,00	4,33		
Falta de Ajuste	21,6	3,00	7,20	308,54	0,003
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	78,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 93: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 103: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	37,96	6,83	5,55	0,003
X ₁	9,57	5,44	1,76	0,139
X ₁ ²	-13,10	8,37	-1,56	0,178
X ₂	10,52	5,44	1,93	0,111
X ₂ ²	-7,95	8,37	-0,95	0,386
X ₁ · X ₂	5,88	6,66	0,88	0,418

Fonte: Autor (2019)

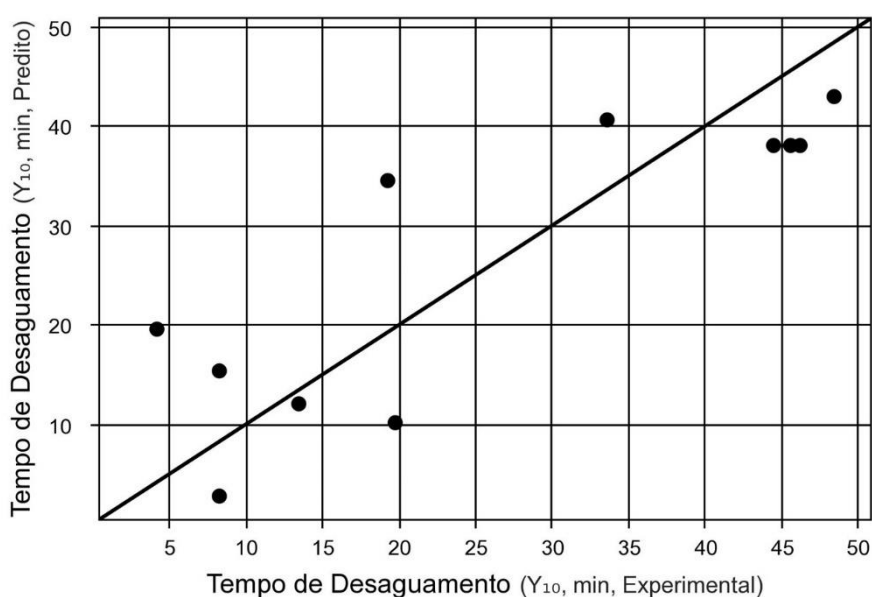
Modelo estatístico: $Y = 37,96 + 9,57 x_1 - 13,10 x_1^2 + 10,52 x_2 - 7,95 x_2^2 + 5,88 x_1 x_2$

Tabela 104: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	2142,4	5,00	428,47	2,41	0,178
Resíduos	887,5	5,00	177,49		
Falta de Ajuste	885,8	3,00	295,27	357,42	0,003
Erro Puro	1,7	2,00	0,83		
Total	3029,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 94: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 105: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	98,37	1,37	71,97	0,000
x_1	8,07	1,09	7,42	0,001
x_1^2	-6,48	1,67	-3,87	0,012
x_2	4,42	1,09	4,06	0,010
x_2^2	0,07	1,67	0,04	0,968
$x_1 \cdot x_2$	-6,10	1,33	-4,58	0,006

Fonte: Autor (2019)

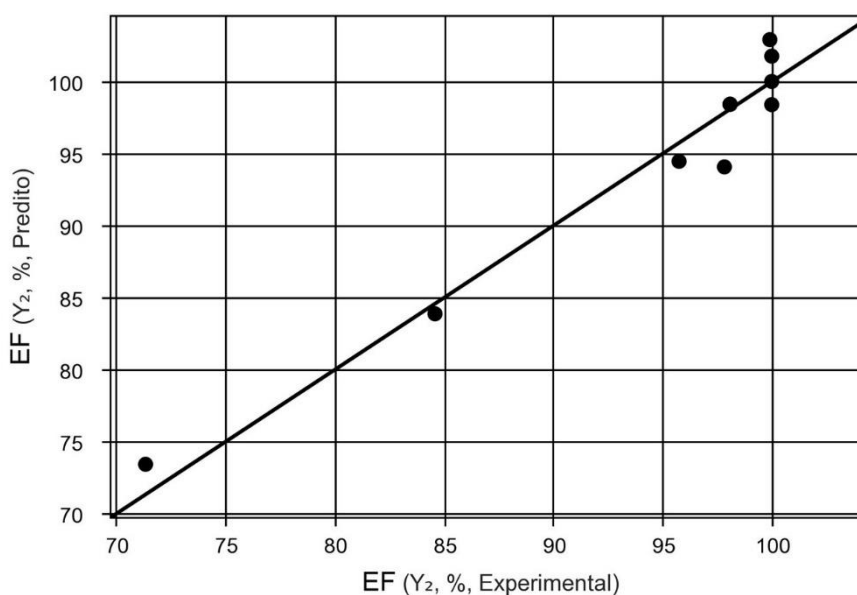
Modelo estatístico: $Y = 98,37 + 8,07 x_1 - 6,48 x_1^2 + 4,42 x_2 + 0,07 x_2^2 - 6,10 x_1 x_2$

Tabela 106: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	770,2	5,00	154,03	21,70	0,002
Resíduos	35,5	5,00	7,10		
Falta de Ajuste	35,5	3,00	11,83	39433,91	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	805,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 95: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 107: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC

2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	48,22	11,92	4,04	0,010
x ₁	-90,74	9,49	-9,56	0,000
x ₁ ²	49,08	14,60	3,36	0,020
x ₂	-55,93	9,49	-5,89	0,002
x ₂ ²	-7,22	14,60	-0,49	0,642
x ₁ · x ₂	69,18	11,62	5,95	0,002

Fonte: Autor (2019)

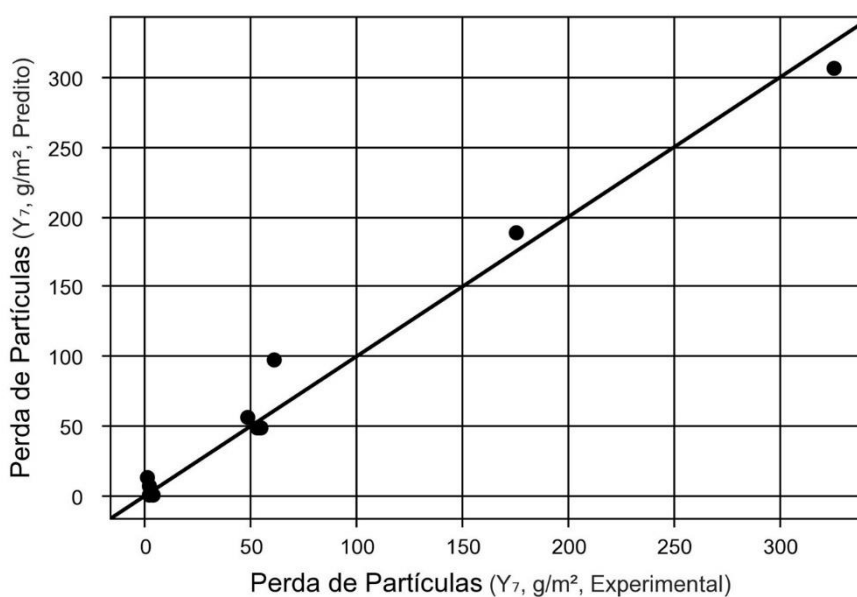
Modelo estatístico: $Y = 48,22 - 90,74 x_1 + 49,08 x_1^2 - 55,93 x_2 - 7,22 x_2^2 + 69,18 x_1 x_2$

Tabela 108: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	93509,1	5,00	18701,83	34,61	0,001
Resíduos	2701,7	5,00	540,34		
Falta de Ajuste	2700,1	3,00	900,05	1170,52	0,001
Erro Puro	1,5	2,00	0,77		
Total	96210,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 96: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 109: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	93,77	0,22	427,03	0,000
x ₁	-5,98	0,17	-34,20	0,000
x ₁ ²	-2,07	0,27	-7,68	0,001
x ₂	0,02	0,17	0,13	0,899
x ₂ ²	-0,36	0,27	-1,32	0,243
x ₁ · x ₂	-0,59	0,21	-2,73	0,041

Fonte: Autor (2019)

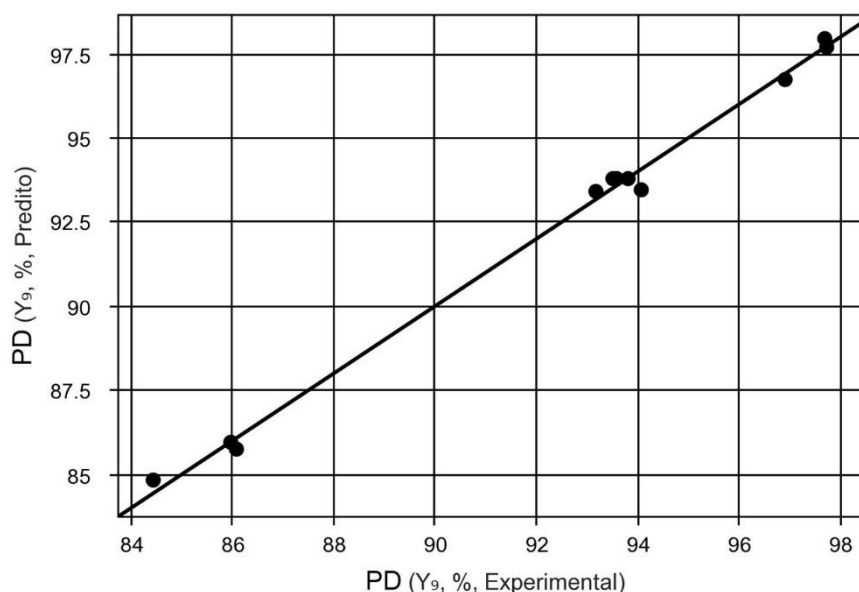
Modelo estatístico: $Y = 93,77 - 5,98 x_1 - 2,07 x_1^2 + 0,02 x_2 - 0,36 x_2^2 - 0,59 x_1 x_2$

Tabela 110: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	228,8	5,00	45,75	249,70	0,000
Resíduos	0,9	5,00	0,18		
Falta de Ajuste	0,9	3,00	0,29	10,73	0,086
Erro Puro	0,1	2,00	0,03		
Total	229,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 97: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 111: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	15,95	0,34	46,35	0,000
x_1	-2,55	0,27	-9,31	0,000
x_1^2	-0,42	0,42	-0,99	0,366
x_2	0,80	0,27	2,92	0,033
x_2^2	-0,77	0,42	-1,82	0,128
$x_1 \cdot x_2$	-1,30	0,34	-3,88	0,012

Fonte: Autor (2019)

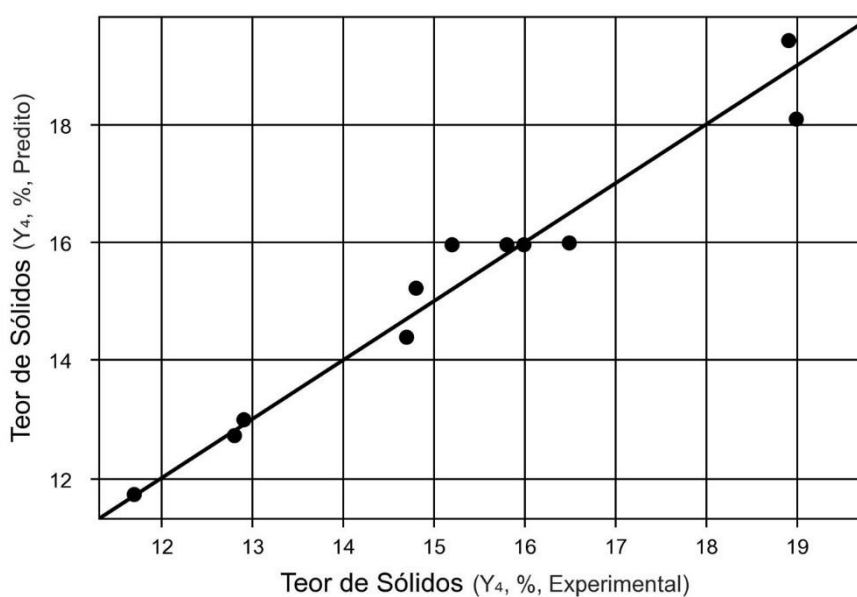
Modelo estatístico: $15,95 - 2,55 x_1 - 0,42 x_1^2 + 0,80 x_2 - 0,77 x_2^2 - 1,30 x_1 x_2$

Tabela 112: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	52,2	5,00	10,43	23,19	0,002
Resíduos	2,2	5,00	0,45		
Falta de Ajuste	1,9	3,00	0,63	3,66	0,222
Erro Puro	0,3	2,00	0,17		
Total	54,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 98: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero catiônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 113: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	48,12	3,22	14,96	0,000
x_1	15,02	2,56	5,87	0,002
x_1^2	-15,76	3,94	-4,00	0,010
x_2	5,47	2,56	2,14	0,086
x_2^2	-0,39	3,94	-0,10	0,925
$x_1 \cdot x_2$	-1,64	3,13	-0,52	0,623

Fonte: Autor (2019)

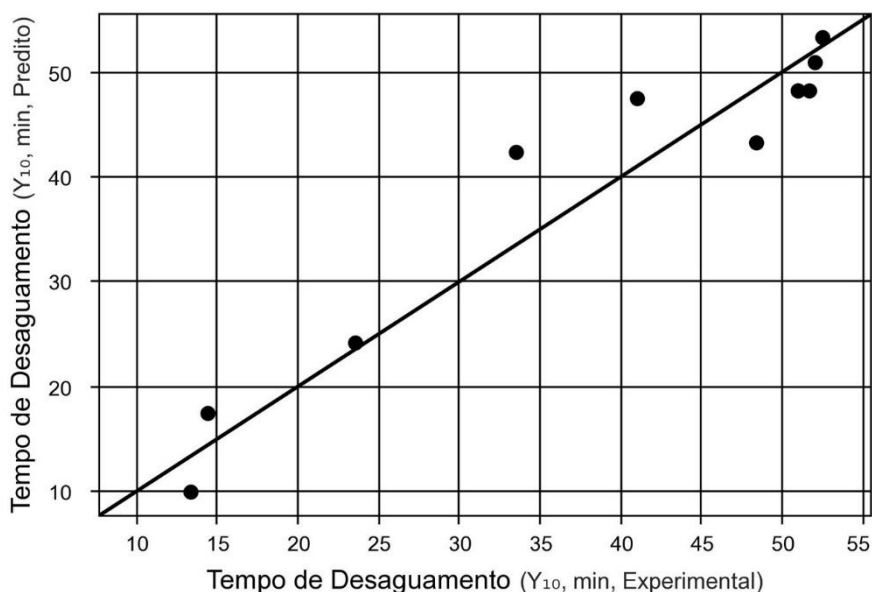
Modelo estatístico: $Y = 48,12 + 15,02 x_1 - 15,76 x_1^2 + 5,47 x_2 - 0,39 x_2^2 - 1,64 x_1 x_2$

Tabela 114: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	2229,8	5,00	445,95	11,34	0,009
Resíduos	196,5	5,00	39,31		
Falta de Ajuste	196,2	3,00	65,40	368,16	0,003
Erro Puro	0,4	2,00	0,18		
Total	2426,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 99: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 115: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	51,68	5,85	8,83	0,000
x ₁	17,33	4,66	3,72	0,014
x ₁ ²	-0,55	7,16	-0,08	0,942
x ₂	32,10	4,66	6,89	0,001
x ₂ ²	-6,45	7,16	-0,90	0,409
x ₁ · x ₂	8,88	5,70	1,56	0,180

Fonte: Autor (2019)

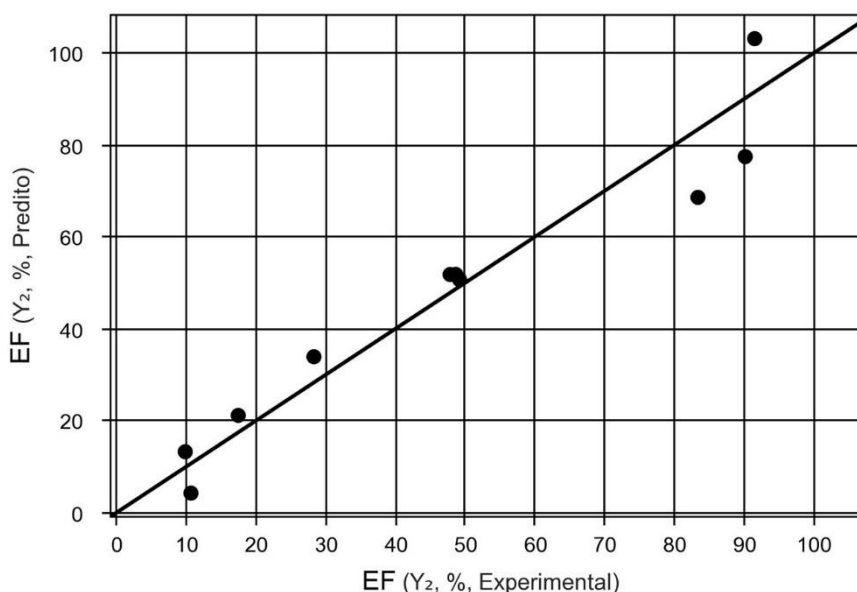
Modelo estatístico: $Y = 51,68 + 17,33 x_1 - 0,55 x_1^2 + 32,10 x_2 - 6,45 x_2^2 + 8,88 x_1 x_2$

Tabela 116: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8419,6	5,00	1683,92	12,95	0,007
Resíduos	650,2	5,00	130,05		
Falta de Ajuste	649,7	3,00	216,58	852,99	0,001
Erro Puro	0,5	2,00	0,25		
Total	9069,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 100: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 117: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC

1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	1317,48	223,39	5,90	0,002
x_1	414,25	177,78	2,33	0,067
x_1^2	-316,44	273,59	-1,16	0,300
x_2	-1012,97	177,78	-5,70	0,002
x_2^2	321,21	273,59	1,17	0,293
$x_1 \cdot x_2$	-731,98	217,73	-3,36	0,020

Fonte: Autor (2019)

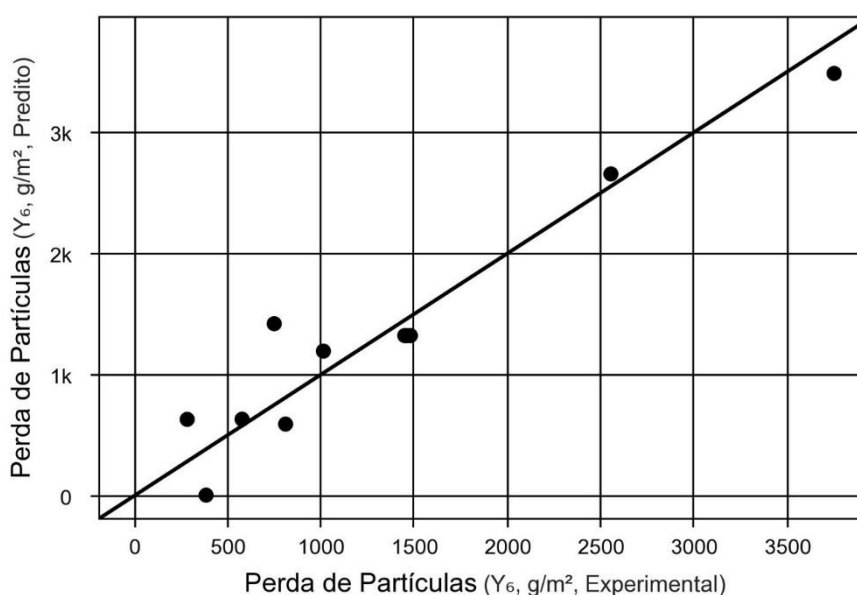
Modelo estatístico: $Y = 1317,48 + 414,25 x_1 - 316,44 x_1^2 - 1012,97 x_2 + 321,21 x_2^2 - 731,97 x_1 x_2$

Tabela 118: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	9736013,7	5,00	1947202,75	10,27	0,012
Resíduos	948145,1	5,00	189629,02		
Falta de Ajuste	947716,0	3,00	315905,34	1472,45	0,001
Erro Puro	429,1	2,00	214,54		
Total	10684158,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 101: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 119: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	93,34	0,24	383,51	0,000
X ₁	-4,13	0,19	-21,34	0,000
X ₁ ²	-1,83	0,30	-6,12	0,002
X ₂	-0,57	0,19	-2,93	0,033
X ₂ ²	0,07	0,30	0,25	0,812
X ₁ · X ₂	-1,20	0,24	-5,06	0,004

Fonte: Autor (2019)

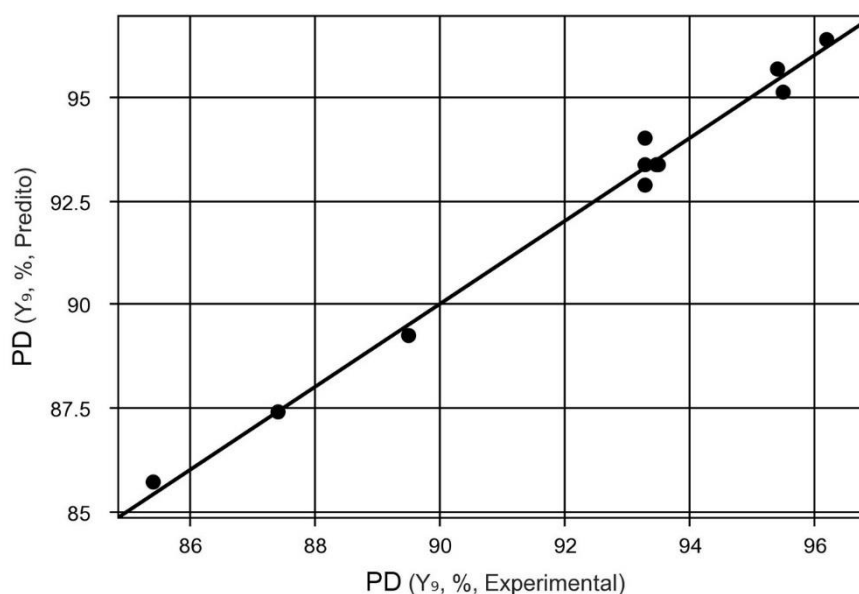
Modelo estatístico: $Y = 93,34 - 4,13 X_1 - 1,83 X_1^2 - 0,57 X_2 + 0,07 X_2^2 - 1,20 X_1 X_2$

Tabela 120: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	119,1	5,00	23,82	105,81	0,000
Resíduos	1,1	5,00	0,23		
Falta de Ajuste	1,1	3,00	0,37	32,83	0,030
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	120,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 102: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 121: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	15,00	0,16	94,05	0,000
x ₁	1,65	0,13	13,00	0,000
x ₁ ²	-2,55	0,20	-13,05	0,000
x ₂	-0,42	0,13	-3,28	0,022
x ₂ ²	0,35	0,20	1,79	0,133
x ₁ · x ₂	-1,55	0,16	-9,97	0,000

Fonte: Autor (2019)

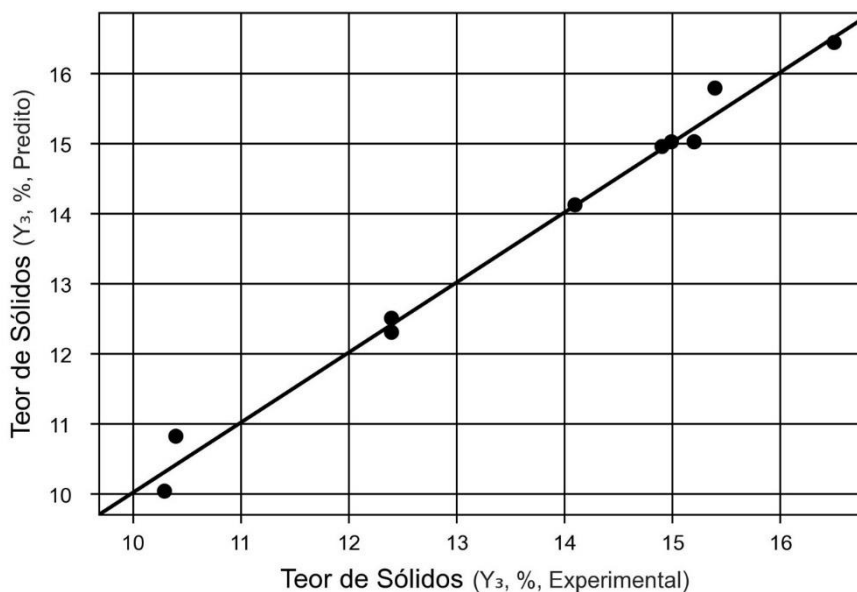
Modelo estatístico: $Y = 15 + 1,65 x_1 - 2,55 x_1^2 - 0,42 x_2 + 0,35 x_2^2 - 1,55 x_1 x_2$

Tabela 122: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	43,8	5,00	8,75	90,53	0,000
Resíduos	0,5	5,00	0,10		
Falta de Ajuste	0,5	3,00	0,15	11,42	0,082
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	44,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 103: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 123: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	16,17	2,25	7,18	0,001
X ₁	5,67	1,79	3,16	0,025
X ₁ ²	4,72	2,76	1,71	0,148
X ₂	10,30	1,79	5,75	0,002
X ₂ ²	-6,48	2,76	-2,35	0,065
X ₁ · X ₂	3,82	2,19	1,74	0,142

Fonte: Autor (2019)

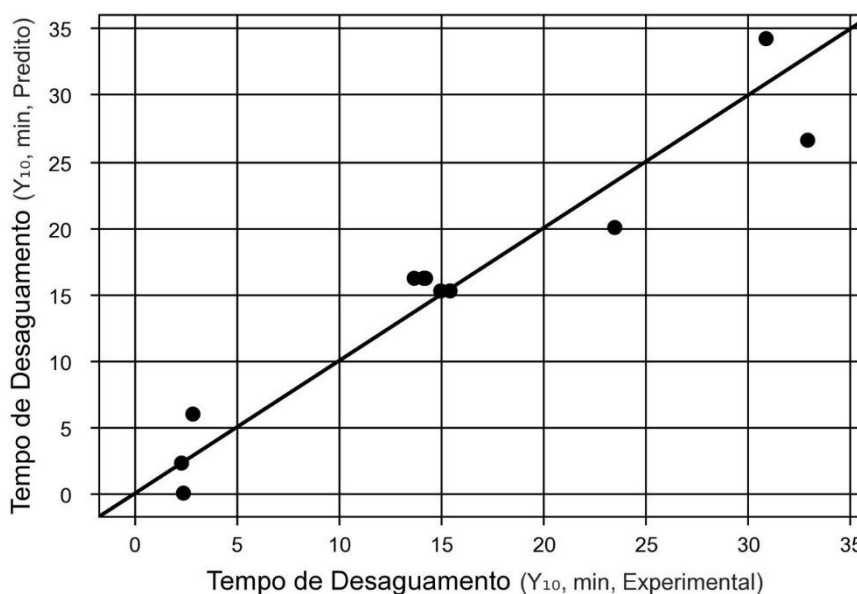
Modelo estatístico: $Y = 16,17 + 5,67 X_1 + 4,72 X_1^2 + 10,30 X_2 - 6,48 X_2^2 + 3,83 X_1 X_2$

Tabela 124: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1018,5	5,00	203,71	10,58	0,011
Resíduos	96,3	5,00	19,26		
Falta de Ajuste	96,1	3,00	32,04	420,86	0,002
Erro Puro	0,2	2,00	0,08		
Total	1114,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 104: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 125: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	78,22	4,39	17,82	0,000
x ₁	31,17	3,49	8,92	0,000
x ₁ ²	-15,19	5,38	-2,83	0,037
x ₂	9,90	3,49	2,83	0,037
x ₂ ²	8,41	5,38	1,56	0,179
x ₁ · x ₂	-9,65	4,28	-2,25	0,074

Fonte: Autor (2019)

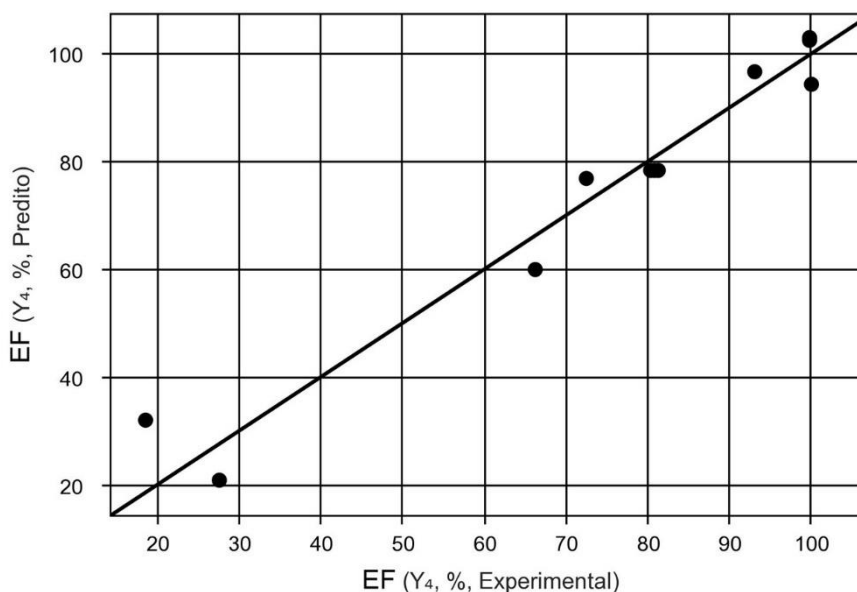
Modelo estatístico: $Y = 78,22 + 31,17 x_1 - 15,19 x_1^2 + 9,90 x_2 + 8,41 x_2^2 - 9,65 x_1 x_2$

Tabela 126: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7425,2	5,00	1485,04	20,27	0,002
Resíduos	366,3	5,00	73,26		
Falta de Ajuste	366,0	3,00	121,99	752,38	0,001
Erro Puro	0,3	2,00	0,16		
Total	7791,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 105: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 127: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	567,23	67,69	8,38	0,000
x_1	-351,39	53,87	-6,52	0,001
x_1^2	-134,71	82,91	-1,62	0,165
x_2	-171,53	53,87	-3,18	0,024
x_2^2	-110,22	82,91	-1,33	0,241
$x_1 \cdot x_2$	108,72	65,98	1,65	0,160

Fonte: Autor (2019)

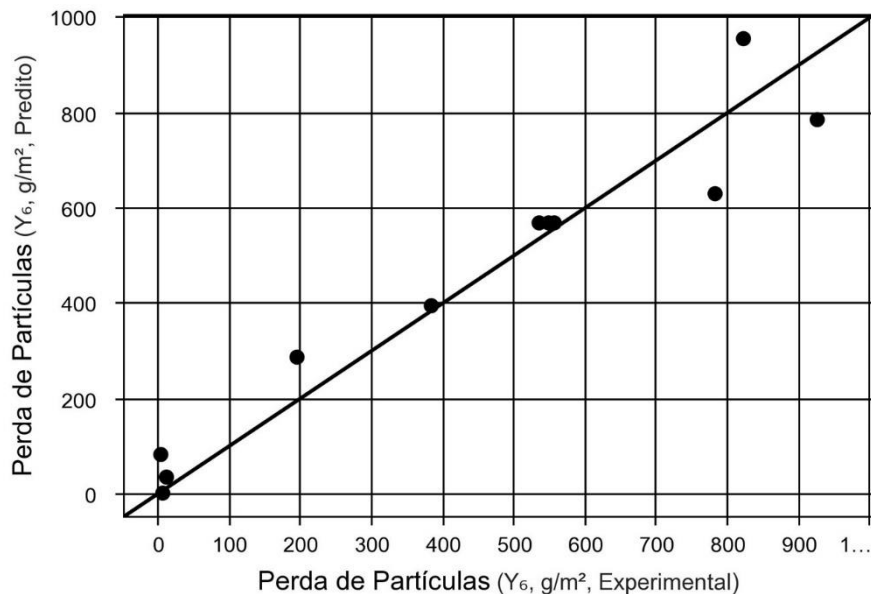
Modelo estatístico: $Y = 567,23 - 351,39 x_1 - 134,71 x_1^2 - 171,53 x_2 - 110,22 x_2^2 + 108,72 x_1 x_2$

Tabela 128: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1068880,1	5,00	213776,01	12,28	0,008
Resíduos	87063,9	5,00	17412,79		
Falta de Ajuste	86825,9	3,00	28941,96	243,14	0,004
Erro Puro	238,1	2,00	119,03		
Total	1155944,0	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 106: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 129: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	98,16	0,20	480,79	0,000
x_1	-1,33	0,16	-8,21	0,000
x_1^2	-0,29	0,25	-1,18	0,292
x_2	-0,33	0,16	-2,05	0,095
x_2^2	-0,29	0,25	-1,18	0,292
$x_1 \cdot x_2$	-0,50	0,20	-2,51	0,054

Fonte: Autor (2019)

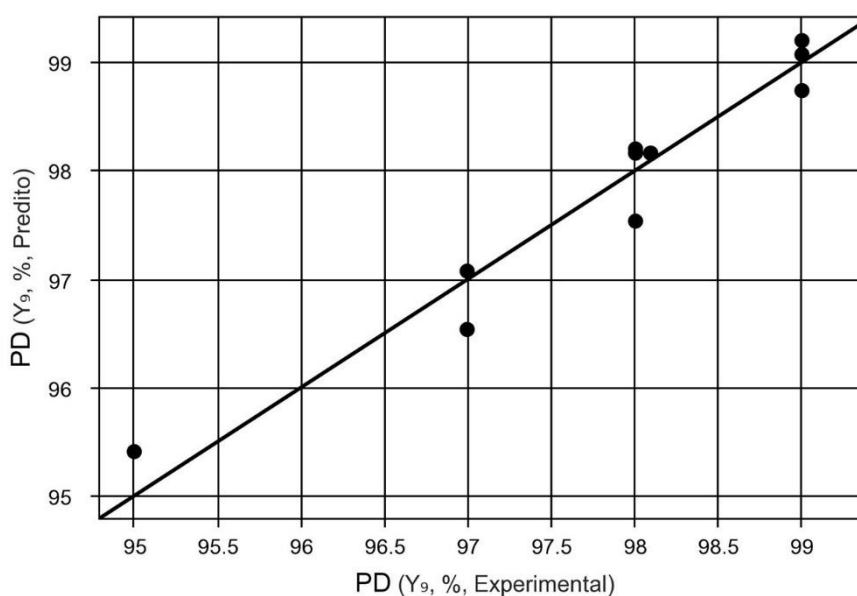
Modelo estatístico: $Y = 98,16 - 1,33 x_1 - 0,29 x_1^2 - 0,33 x_2 - 0,29 x_2^2 - 0,50 x_1 x_2$

Tabela 130: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	12,9	5,00	2,59	16,33	0,004
Resíduos	0,8	5,00	0,16		
Falta de Ajuste	0,8	3,00	0,26	78,53	0,013
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	13,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 107: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 131: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	35,67	1,07	33,22	0,000
x_1	1,77	0,85	2,07	0,094
x_1^2	-1,98	1,32	-1,51	0,192
x_2	-3,58	0,85	-4,19	0,009
x_2^2	-0,63	1,32	-0,48	0,650
$x_1 \cdot x_2$	-1,50	1,05	-1,43	0,211

Fonte: Autor (2019)

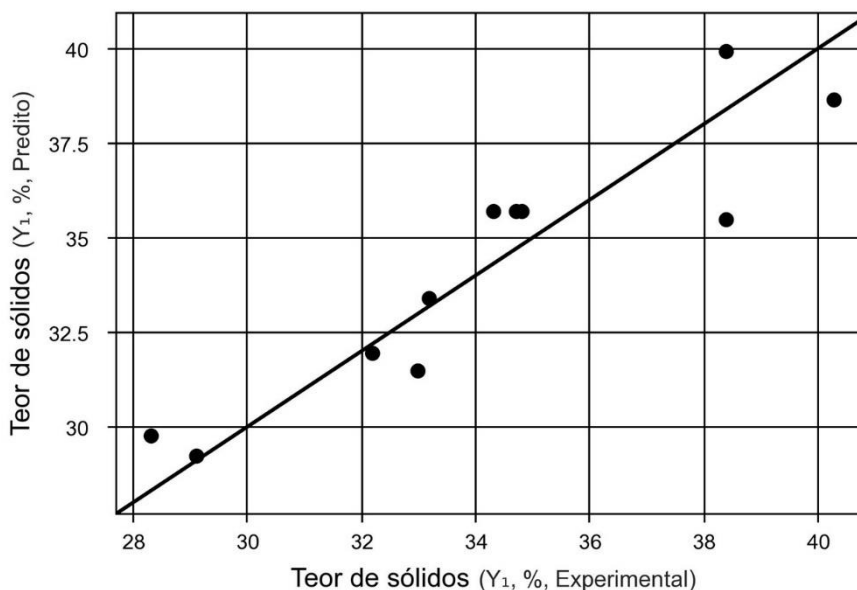
Modelo estatístico: $Y = 35,67 + 1,77 x_1 - 1,98 x_1^2 - 3,58 x_2 - 0,63 x_2^2 - 1,50 x_1 x_2$

Tabela 132: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	118,4	5,00	23,69	5,40	0,044
Resíduos	21,9	5,00	4,38		
Falta de Ajuste	21,8	3,00	7,26	103,69	0,010
Erro Puro	0,1	2,00	0,07		
Total	140,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 108: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero aniônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 133: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	6,66	1,36	4,89	0,005
x_1	11,54	1,09	10,63	0,000
x_1^2	7,51	1,67	4,49	0,006
x_2	2,38	1,09	2,19	0,080
x_2^2	3,81	1,67	2,28	0,072
$x_1 \cdot x_2$	4,68	1,33	3,52	0,017

Fonte: Autor (2019)

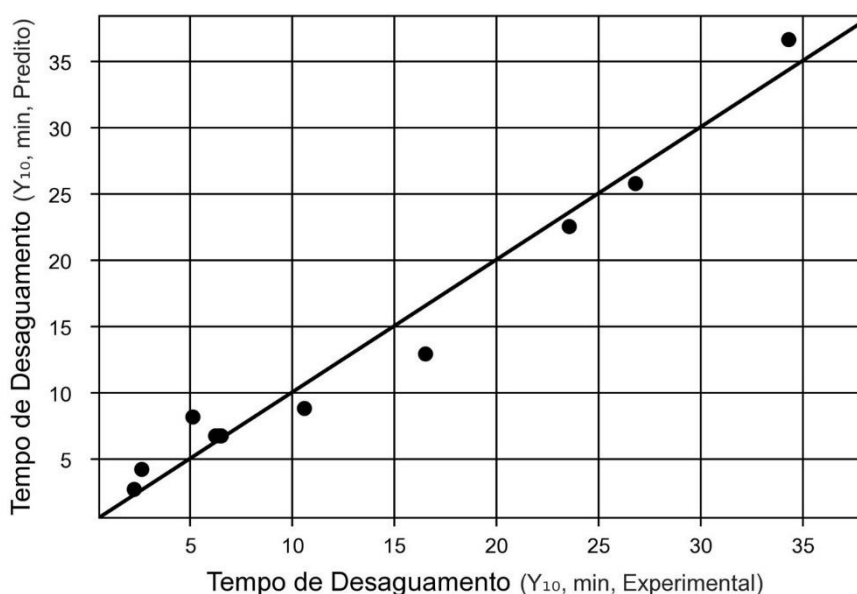
Modelo estatístico: $Y = 6,66 + 11,54 x_1 + 7,51 x_1^2 + 2,38 x_2 + 3,81 x_2^2 + 4,68 x_1 x_2$

Tabela 134: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1154,6	5,00	230,92	32,67	0,001
Resíduos	35,3	5,00	7,07		
Falta de Ajuste	35,3	3,00	11,77	884,98	0,001
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	1189,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 109: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 135: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	16,59	3,14	5,29	0,003
x_1	24,32	2,50	9,74	0,000
x_1^2	19,07	3,84	4,97	0,004
x_2	12,05	2,50	4,83	0,005
x_2^2	2,27	3,84	0,59	0,580
$x_1 \cdot x_2$	11,17	3,06	3,66	0,015

Fonte: Autor (2019)

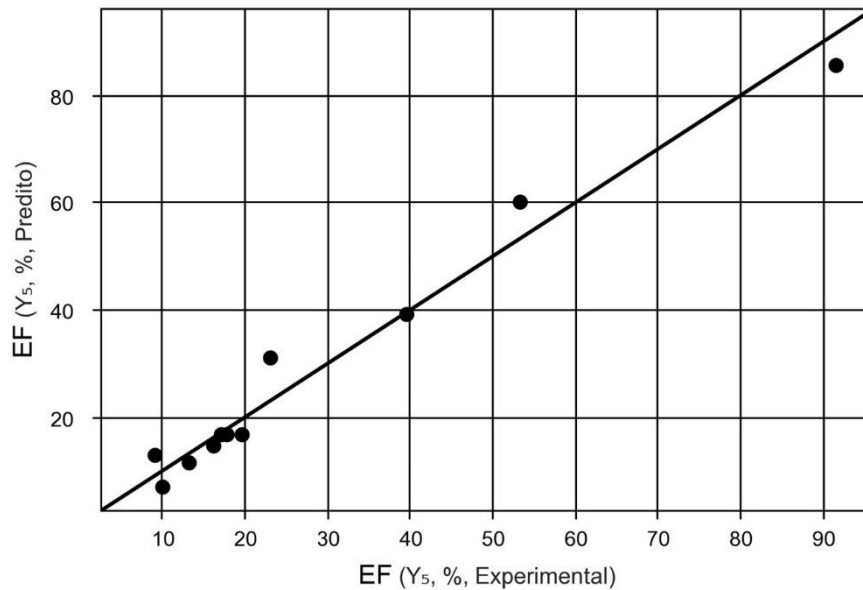
Modelo estatístico: $Y = 16,59 + 24,32 x_1 + 19,07 x_1^2 + 12,05 x_2 + 2,27 x_2^2 + 11,17 x_1 x_2$

Tabela 136: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	5988,1	5,00	1197,61	32,03	0,001
Resíduos	186,9	5,00	37,39		
Falta de Ajuste	183,8	3,00	61,26	38,80	0,025
Erro Puro	3,2	2,00	1,58		
Total	6175,0	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 110: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 137: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2393,09	148,40	16,13	0,000
x_1	380,82	118,10	3,22	0,023
x_1^2	-939,97	181,75	-5,17	0,004
x_2	-469,37	118,10	-3,97	0,011
x_2^2	-123,12	181,75	-0,68	0,528
$x_1 \cdot x_2$	-569,90	144,64	-3,94	0,011

Fonte: Autor (2019)

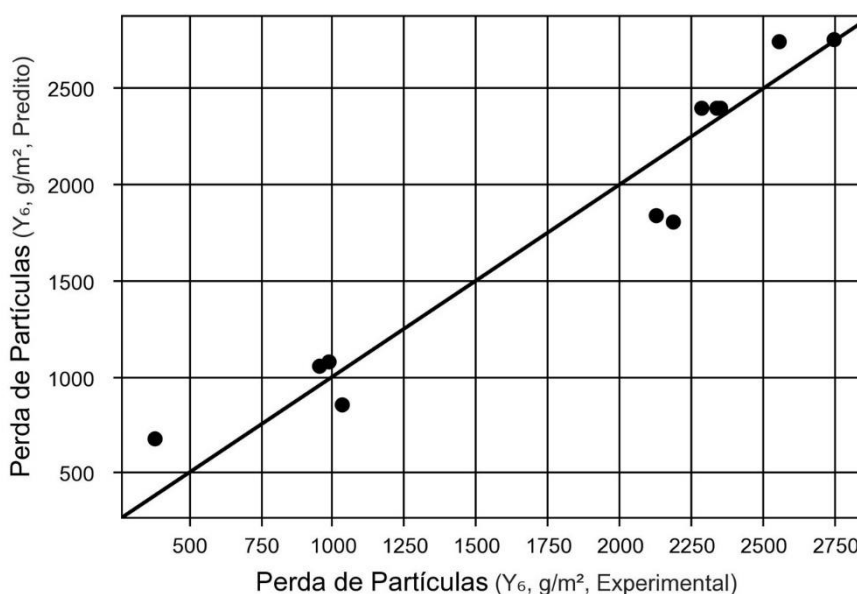
Modelo estatístico: $2393,09 + 380,82 x_1 - 939,97 x_1^2 - 469,37 x_2 - 123,12 x_2^2 - 569,90 x_1 x_2$

Tabela 138: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	6110418,3	5,00	1222083,66	14,60	0,005
Resíduos	418436,4	5,00	83687,29		
Falta de Ajuste	415869,5	3,00	138623,17	108,01	0,009
Erro Puro	2566,9	2,00	1283,47		
Total	6528854,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 111: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 139: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	92,78	0,17	545,78	0,000
X ₁	-2,47	0,14	-18,23	0,000
X ₁ ²	1,03	0,21	4,97	0,004
X ₂	-0,28	0,14	-2,09	0,090
X ₂ ²	-0,42	0,21	-2,00	0,102
X ₁ · X ₂	-0,75	0,17	-4,53	0,006

Fonte: Autor (2019)

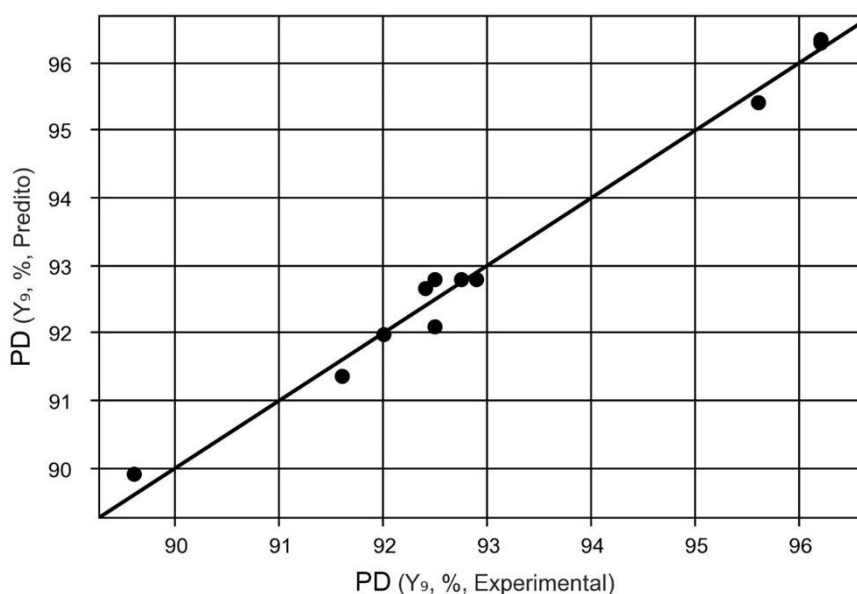
Modelo estatístico: $Y = 92,78 - 2,47 X_1 + 1,03 X_1^2 - 0,28 X_2 - 0,42 X_2^2 - 0,75 X_1 X_2$

Tabela 140: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	42,0	5,00	8,40	76,50	0,000
Resíduos	0,5	5,00	0,11		
Falta de Ajuste	0,5	3,00	0,16	3,82	0,215
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	42,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 112: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 141: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	14,02	0,25	55,36	0,000
X ₁	3,57	0,20	17,70	0,000
X ₁ ²	1,81	0,31	5,84	0,002
X ₂	-0,42	0,20	-2,07	0,093
X ₂ ²	-0,64	0,31	-2,06	0,094
X ₁ · X ₂	-1,35	0,25	-5,47	0,003

Fonte: Autor (2019)

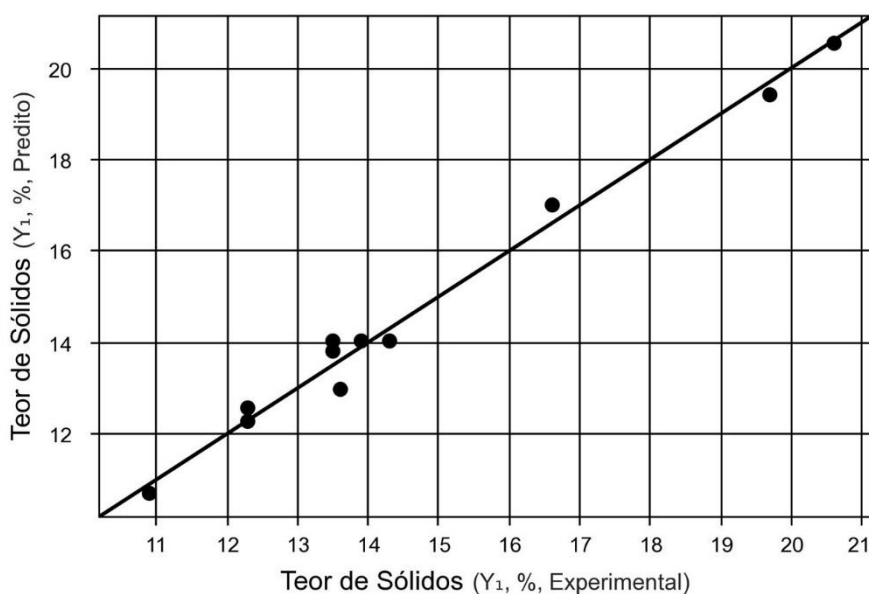
Modelo estatístico: $Y = 14,02 + 3,57 x_1 + 1,81 x_1^2 - 0,42 x_2 - 0,64 x_2^2 - 1,35 x_1 x_2$

Tabela 142: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	93,0	5,00	18,61	76,40	0,000
Resíduos	1,2	5,00	0,24		
Falta de Ajuste	0,9	3,00	0,30	1,87	0,367
Erro Puro	0,3	2,00	0,16		
Total	94,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 113: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 143: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	10,91	3,42	3,19	0,024
X ₁	12,73	2,72	4,68	0,005
X ₁ ²	9,16	4,19	2,19	0,081
X ₂	5,90	2,72	2,17	0,082
X ₂ ²	-0,14	4,19	-0,03	0,974
X ₁ · X ₂	1,95	3,33	0,58	0,584

Fonte: Autor (2019)

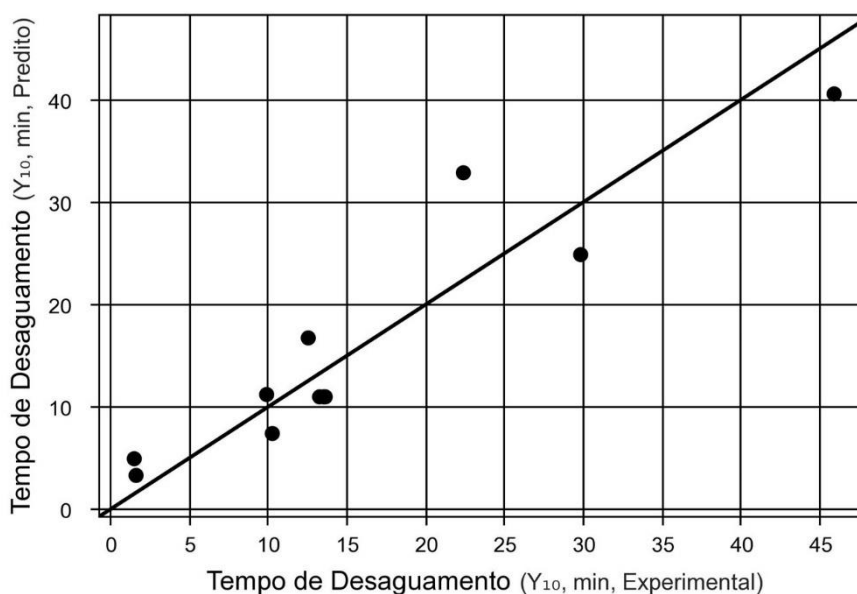
Modelo estatístico: $Y = 10,91 + 12,73 X_1 + 9,16 X_1^2 + 5,90 X_2 - 0,14 X_2^2 + 1,95 X_1 X_2$

Tabela 144: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1423,6	5,00	284,72	6,41	0,031
Resíduos	222,3	5,00	44,45		
Falta de Ajuste	222,2	3,00	74,06	1813,65	0,001
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	1645,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 114: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 145: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	63,01	5,74	10,97	0,000
x ₁	29,88	4,57	6,54	0,001
x ₁ ²	7,26	7,03	1,03	0,349
x ₂	18,53	4,57	4,06	0,010
x ₂ ²	-5,69	7,03	-0,81	0,456
x ₁ · x ₂	-7,25	5,60	-1,30	0,252

Fonte: Autor (2019)

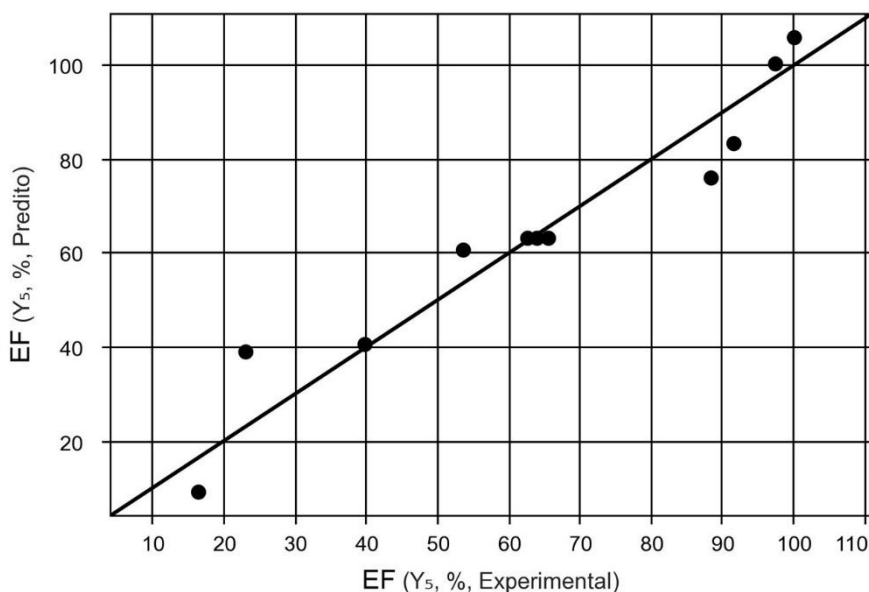
Modelo estatístico: $Y = 63,01 + 29,88 x_1 + 7,26 x_1^2 + 18,53 x_2 - 5,69 x_2^2 - 7,25 x_1 x_2$

Tabela 146: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7801,2	5,00	1560,25	12,45	0,008
Resíduos	626,5	5,00	125,31		
Falta de Ajuste	622,0	3,00	207,33	91,50	0,011
Erro Puro	4,5	2,00	2,27		
Total	8427,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 115: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 147: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	1055,82	195,72	5,39	0,003
x_1	-276,97	155,76	-1,78	0,136
x_1^2	-711,05	239,71	-2,97	0,031
x_2	-444,13	155,76	-2,85	0,036
x_2^2	148,08	239,71	0,62	0,564
$x_1 \cdot x_2$	10,75	190,77	0,06	0,957

Fonte: Autor (2019)

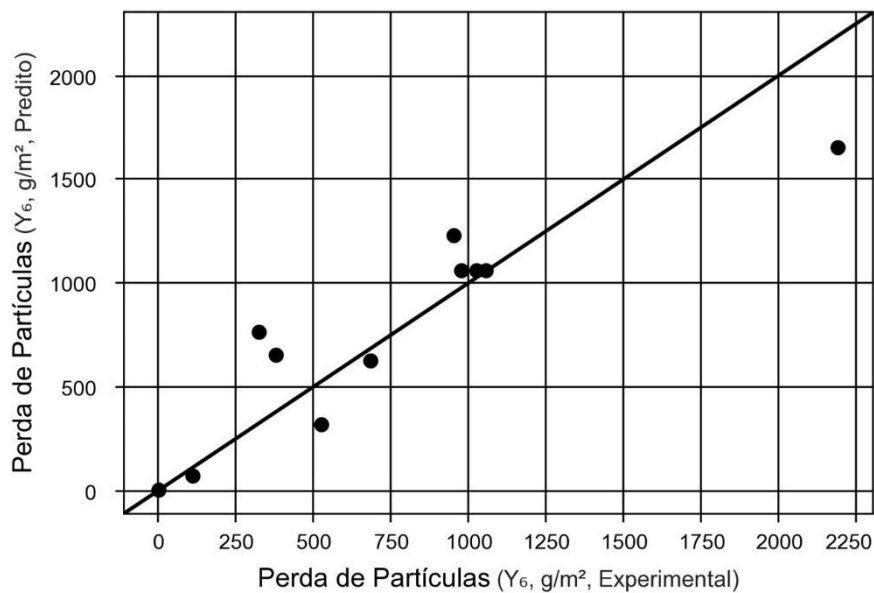
Modelo estatístico: $Y = 1055,82 - 276,97 x_1 - 711,05 x_1^2 - 444,13 x_2 + 148,08 x_2^2 + 10,75 x_1 x_2$

Tabela 148: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	2929775,8	5,00	585955,16	4,03	0,076
Resíduos	727829,5	5,00	145565,90		
Falta de Ajuste	724245,0	3,00	241415,01	134,70	0,007
Erro Puro	3584,5	2,00	1792,24		
Total	3657605,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 116: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 149: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	94,49	0,37	257,99	0,000
x_1	-3,70	0,29	-12,71	0,000
x_1^2	-1,30	0,45	-2,90	0,034
x_2	0,28	0,29	0,95	0,383
x_2^2	-0,57	0,45	-1,27	0,261
$x_1 \cdot x_2$	-0,38	0,36	-1,07	0,333

Fonte: Autor (2019)

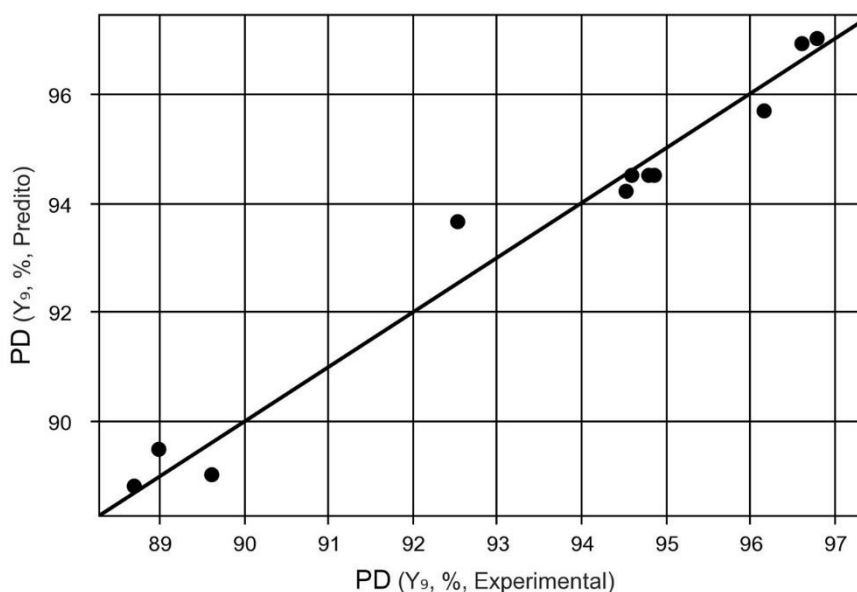
Modelo estatístico: $Y = 94,49 - 3,70 x_1 - 1,30 x_1^2 + 0,28 x_2 - 0,57 x_2^2 - 0,38 x_1 x_2$

Tabela 150: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	90,0	5,00	17,99	35,30	0,001
Resíduos	2,5	5,00	0,51		
Falta de Ajuste	2,5	3,00	0,84	47,88	0,021
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	92,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 117: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2



RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 151: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	17,76	0,70	25,50	0,000
x_1	1,28	0,55	2,31	0,068
x_1^2	-2,21	0,85	-2,59	0,049
x_2	0,82	0,55	1,47	0,201
x_2^2	-1,31	0,85	-1,53	0,186
$x_1 \cdot x_2$	-0,78	0,68	-1,14	0,305

Fonte: Autor (2019)

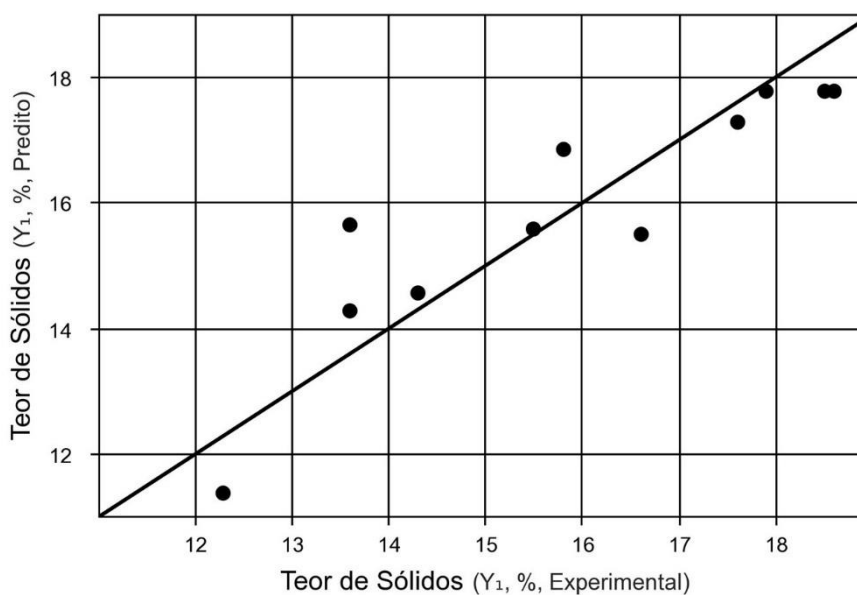
Modelo estatístico: $Y = 17,76 + 1,28 x_1 - 2,21 x_1^2 + 0,82 x_2 - 1,31 x_2^2 - 0,78 x_1 x_2$

Tabela 152: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	38,4	5,00	7,69	4,17	0,072
Resíduos	9,2	5,00	1,84		
Falta de Ajuste	8,9	3,00	2,98	20,78	0,046
Erro Puro	0,3	2,00	0,14		
Total	47,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 118: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2



RETA TIPO II: Polímero não iônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 153: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	19,82	1,72	11,53	0,000
x_1	20,52	1,37	15,00	0,000
x_1^2	9,23	2,11	4,38	0,007
x_2	3,60	1,37	2,63	0,046
x_2^2	0,38	2,11	0,18	0,865
$x_1 \cdot x_2$	2,44	1,68	1,46	0,205

Fonte: Autor (2019)

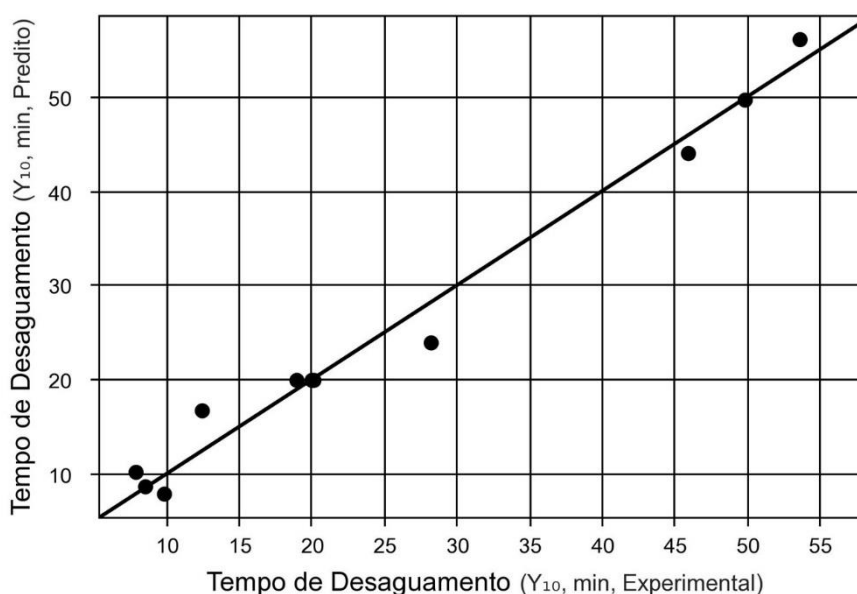
Modelo estatístico: $Y = 19,82 + 20,52 x_1 + 9,23 x_1^2 + 3,60 x_2 + 0,38 x_2^2 + 2,44 x_1 x_2$

Tabela 154: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	2865,4	5,00	573,08	51,03	0,000
Resíduos	56,1	5,00	11,23		
Falta de Ajuste	55,4	3,00	18,46	48,29	0,020
Erro Puro	0,8	2,00	0,38		
Total	2921,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 119: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo II polímero não iônico DFC 2



RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 155: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	98,83	3,09	31,94	0,000
X ₁	14,97	2,46	6,08	0,002
X ₁ ²	-10,90	3,79	-2,88	0,035
X ₂	12,80	2,46	5,20	0,003
X ₂ ²	-4,50	3,79	-1,19	0,289
X ₁ · X ₂	-16,40	3,02	-5,44	0,003

Fonte: Autor (2019)

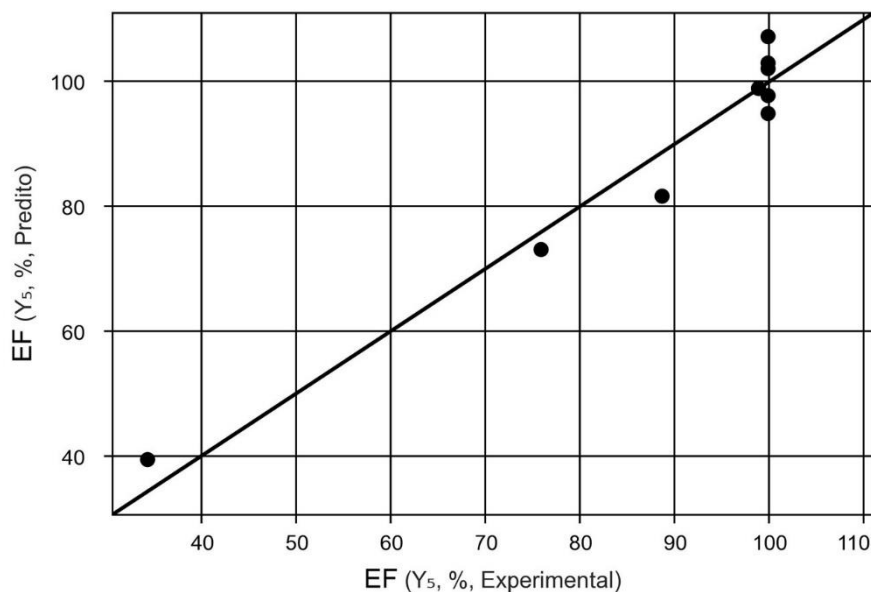
Modelo estatístico: $Y = 98,83 + 14,97 x_1 - 10,90 x_1^2 + 12,80 x_2 - 4,50 x_2^2 - 16,40 x_1 x_2$

Tabela 156: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	3853,2	5,00	770,64	21,18	0,002
Resíduos	181,9	5,00	36,39		
Falta de Ajuste	181,9	3,00	60,64	24257,29	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	4035,1	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 120: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 157: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	37,24	22,73	1,64	0,162
X ₁	-168,87	18,09	-9,34	0,000
X ₁ ²	84,72	27,83	3,04	0,029
X ₂	-167,48	18,09	-9,26	0,000
X ₂ ²	75,87	27,83	2,73	0,041
X ₁ · X ₂	186,08	22,15	8,40	0,000

Fonte: Autor (2019)

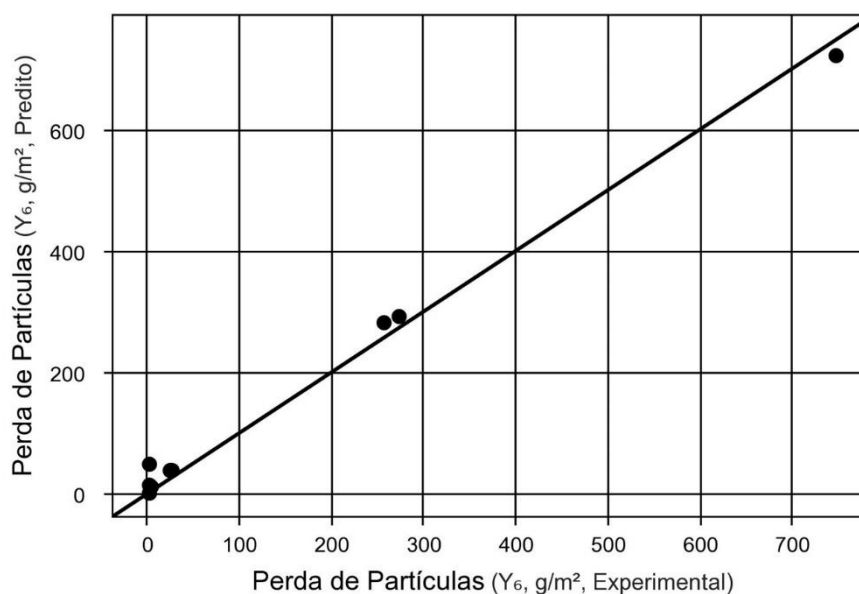
Modelo estatístico: $Y = 37,24 - 168,87 x_1 + 84,72 x_1^2 - 167,48 x_2 + 75,87 x_2^2 + 186,08 x_1 x_2$

Tabela 158: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	522514,5	5,00	104502,89	53,25	0,000
Resíduos	9812,8	5,00	1962,56		
Falta de Ajuste	9809,5	3,00	3269,84	2002,80	0,000
Erro Puro	3,3	2,00	1,63		
Total	532327,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 121: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 1
- Percentual de Desaguamento

Tabela 159: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	83,92	1,06	79,44	0,000
X ₁	-10,47	0,84	-12,45	0,000
X ₁ ²	-0,07	1,29	-0,05	0,959
X ₂	2,12	0,84	2,52	0,053
X ₂ ²	-2,52	1,29	-1,95	0,109
X ₁ · X ₂	3,28	1,03	3,18	0,025

Fonte: Autor (2019)

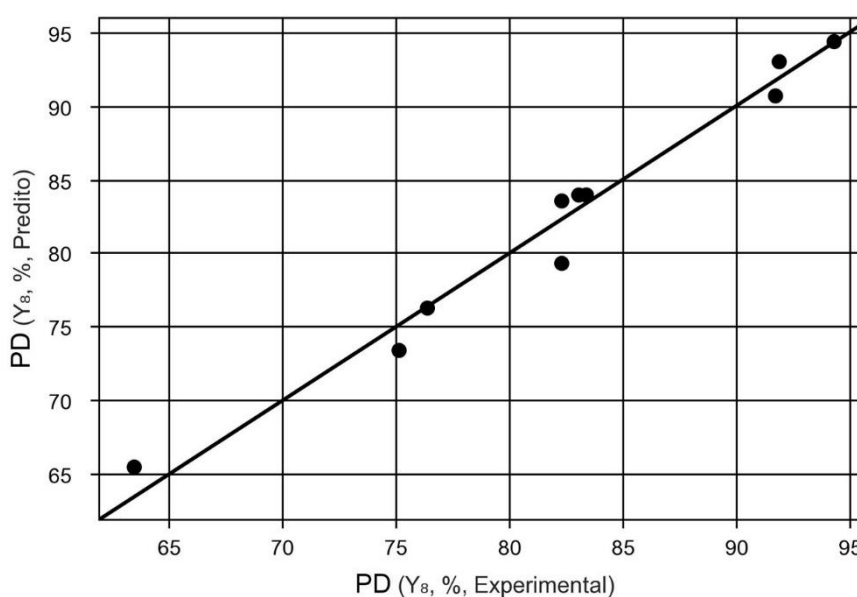
Modelo estatístico: $Y = 83,92 - 10,47 X_1 - 0,07 X_1^2 + 2,12 X_2 - 2,52 X_2^2 + 3,28 X_1 X_2$

Tabela 160: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	744,7	5,00	148,93	35,12	0,001
Resíduos	21,2	5,00	4,24		
Falta de Ajuste	21,1	3,00	7,04	203,99	0,005
Erro Puro	0,1	2,00	0,03		
Total	765,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 122: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 1
- Teor de Sólidos

Tabela 161: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	6,04	0,35	17,45	0,000
x ₁	-0,67	0,28	-2,42	0,060
x ₁ ²	0,66	0,42	1,55	0,181
x ₂	0,33	0,28	1,21	0,280
x ₂ ²	-0,94	0,42	-2,22	0,077
x ₁ · x ₂	0,55	0,34	1,63	0,164

Fonte: Autor (2019)

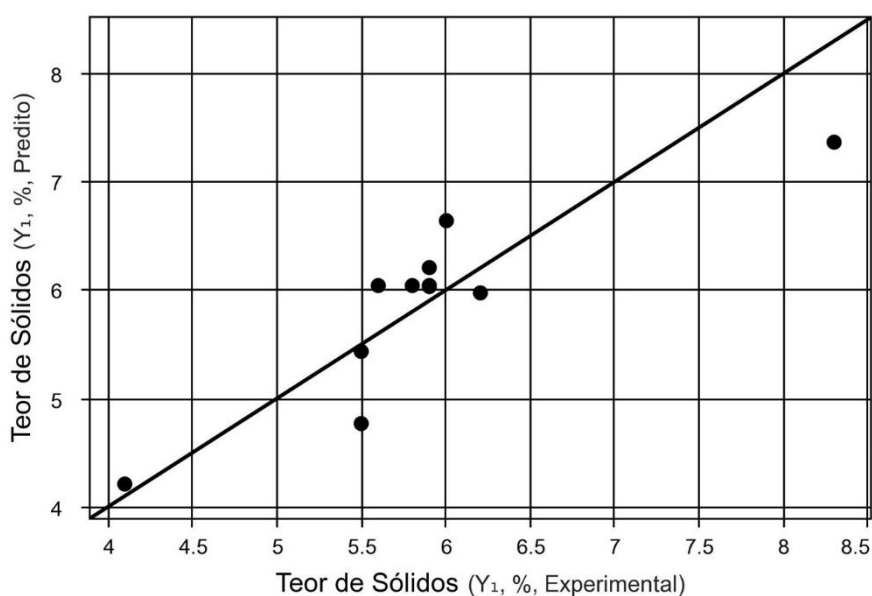
Modelo estatístico: $Y = 6,04 - 0,67 x_1 + 0,66 x_1^2 + 0,33 x_2 - 0,94 x_2^2 + 0,55 x_1 x_2$

Tabela 162: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	7,2	5,00	1,45	3,19	0,115
Resíduos	2,3	5,00	0,45		
Falta de Ajuste	2,2	3,00	0,74	31,81	0,031
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	9,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 123: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 1
- Tempo de Desaguamento

Tabela 163: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	38,64	17,28	2,24	0,076
X ₁	37,62	13,75	2,74	0,041
X ₁ ²	-9,05	21,16	-0,43	0,687
X ₂	-60,35	13,75	-4,39	0,007
X ₂ ²	53,85	21,16	2,54	0,052
X ₁ · X ₂	-53,57	16,84	-3,18	0,024

Fonte: Autor (2019)

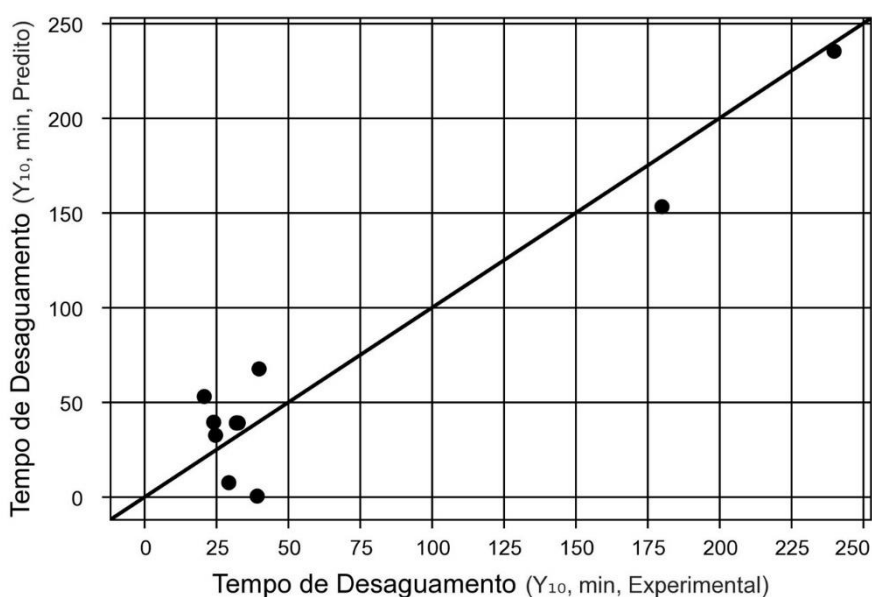
Modelo estatístico: $Y = 38,64 + 37,62 x_1 - 9,05 x_1^2 - 60,35 x_2 + 53,85 x_2^2 - 53,57 x_1 x_2$

Tabela 164: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	49246,2	5,00	9849,24	8,68	0,017
Resíduos	5670,6	5,00	1134,11		
Falta de Ajuste	5670,5	3,00	1890,17	116583,83	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	54916,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 124: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 165: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	99,91	0,02	6090,89	0,000
x ₁	0,05	0,01	3,83	0,012
x ₁ ²	0,02	0,02	1,18	0,291
x ₂	0,03	0,01	2,55	0,051
x ₂ ²	-0,03	0,02	-1,31	0,247
x ₁ · x ₂	0,00	0,02	0,00	1,000

Fonte: Autor (2019)

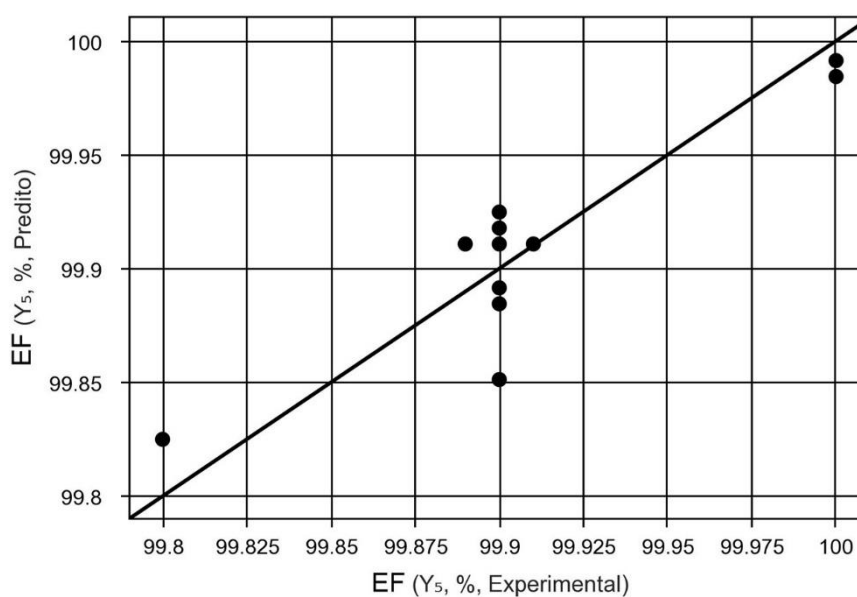
Modelo estatístico: $Y = 99,91 + 0,05 x_1 + 0,02 x_1^2 + 0,03 x_2 - 0,03 x_2^2 + 0 x_1 x_2$

Tabela 166: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	0,0	5,00	0,00	4,73	0,057
Resíduos	0,0	5,00	0,00		
Falta de Ajuste	0,0	3,00	0,00	16,37	0,058
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	0,0	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 125: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 167: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	1,96	0,29	6,83	0,001
x ₁	-0,13	0,23	-0,57	0,594
x ₁ ²	-0,53	0,35	-1,52	0,189
x ₂	-0,31	0,23	-1,34	0,237
x ₂ ²	0,22	0,35	0,62	0,565
x ₁ · x ₂	-0,45	0,28	-1,62	0,167

Fonte: Autor (2019)

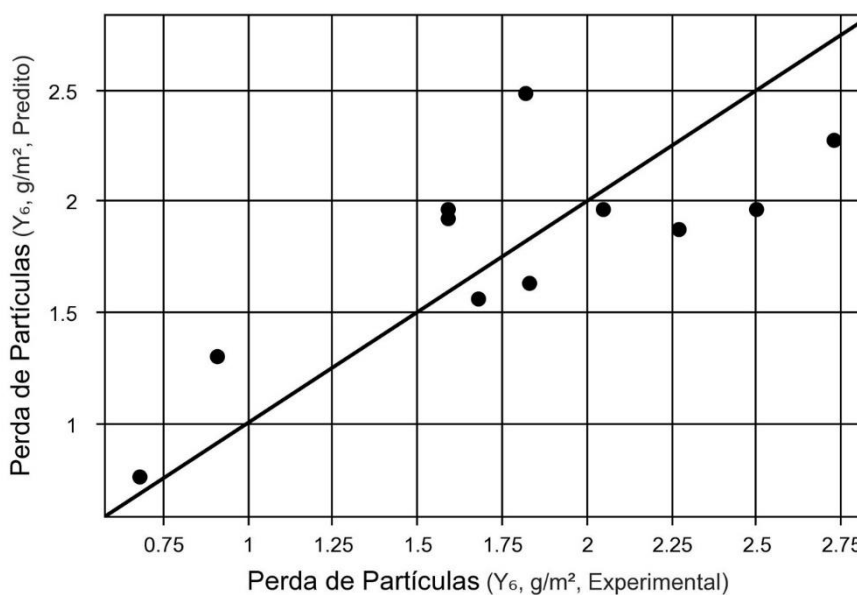
Modelo estatístico: $Y = 1,96 - 0,13 x_1 - 0,53 x_1^2 - 0,31 x_2 + 0,22 x_2^2 - 0,45 x_1 x_2$

Tabela 168: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	2,2	5,00	0,44	1,42	0,355
Resíduos	1,6	5,00	0,31		
Falta de Ajuste	1,2	3,00	0,38	1,85	0,369
Erro Puro	0,4	2,00	0,21		
Total	3,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 126: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 169: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	83,02	0,28	291,54	0,000
x_1	-8,43	0,23	-37,20	0,000
x_1^2	1,09	0,35	3,11	0,026
x_2	-0,68	0,23	-2,99	0,030
x_2^2	-0,97	0,35	-2,78	0,039
$x_1 \cdot x_2$	-0,80	0,28	-2,89	0,034

Fonte: Autor (2019)

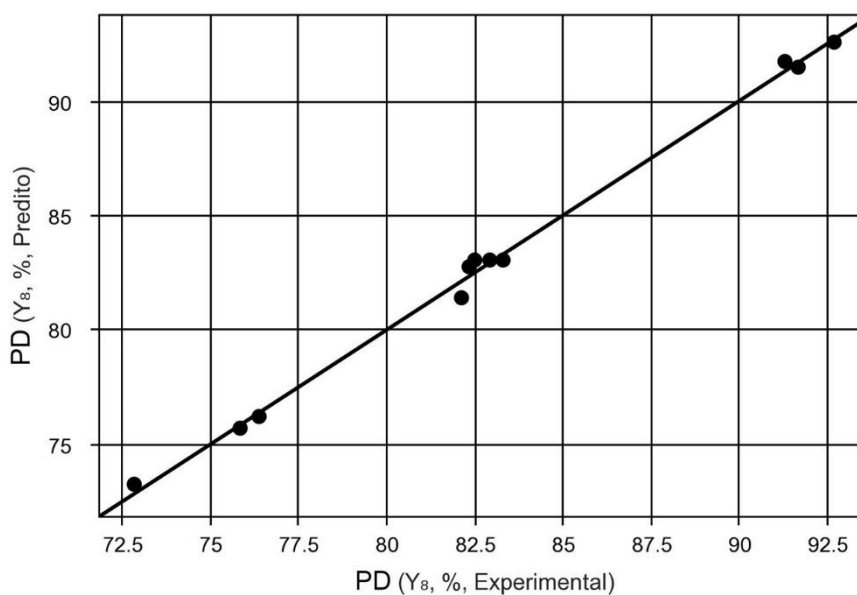
Modelo estatístico: $Y = 83,02 - 8,43 x_1 + 1,09 x_1^2 - 0,68 x_2 - 0,97 x_2^2 - 0,80 x_1 x_2$

Tabela 170: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	436,0	5,00	87,19	282,97	0,000
Resíduos	1,5	5,00	0,31		
Falta de Ajuste	1,2	3,00	0,41	2,54	0,295
Erro Puro	0,3	2,00	0,16		
Total	437,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 127: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 2 - Teor de Sólidos

Tabela 171: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	5,77	0,13	43,88	0,000
x_1	-0,08	0,10	-0,80	0,462
x_1^2	0,43	0,16	2,66	0,045
x_2	-0,18	0,10	-1,75	0,140
x_2^2	-0,37	0,16	-2,30	0,069
$x_1 \cdot x_2$	-0,12	0,13	-0,98	0,374

Fonte: Autor (2019)

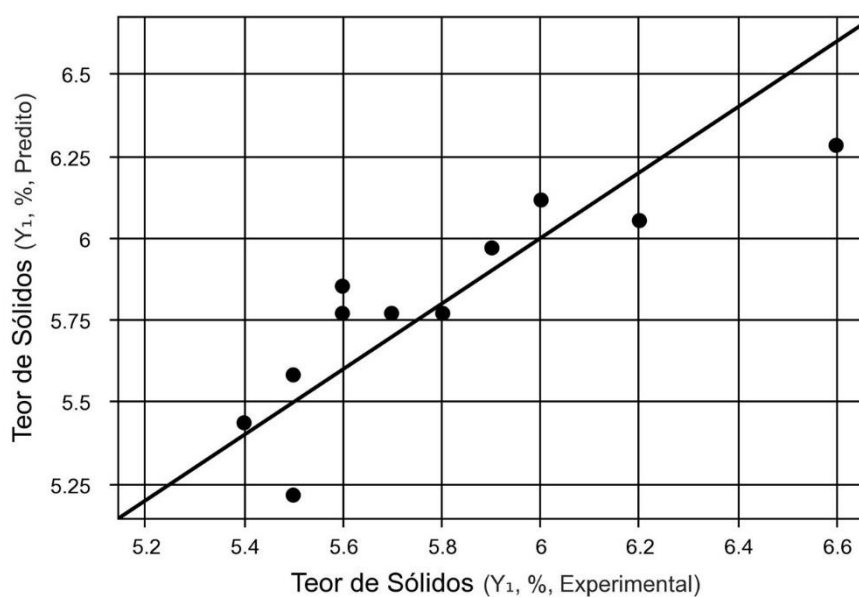
Modelo estatístico: $5,77 - 0,08 x_1 + 0,43 x_1^2 - 0,18 x_2 - 0,37 x_2^2 - 0,12 x_1 x_2$

Tabela 172: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	1,0	5,00	0,19	2,90	0,134
Resíduos	0,3	5,00	0,07		
Falta de Ajuste	0,3	3,00	0,10	10,28	0,090
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	1,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 128: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero catiônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 173: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	46,93	2,85	16,44	0,000
x_1	3,54	2,27	1,56	0,180
x_1^2	-6,76	3,50	-1,93	0,111
x_2	5,72	2,27	2,52	0,053
x_2^2	-10,61	3,50	-3,03	0,029
$x_1 \cdot x_2$	3,47	2,78	1,25	0,267

Fonte: Autor (2019)

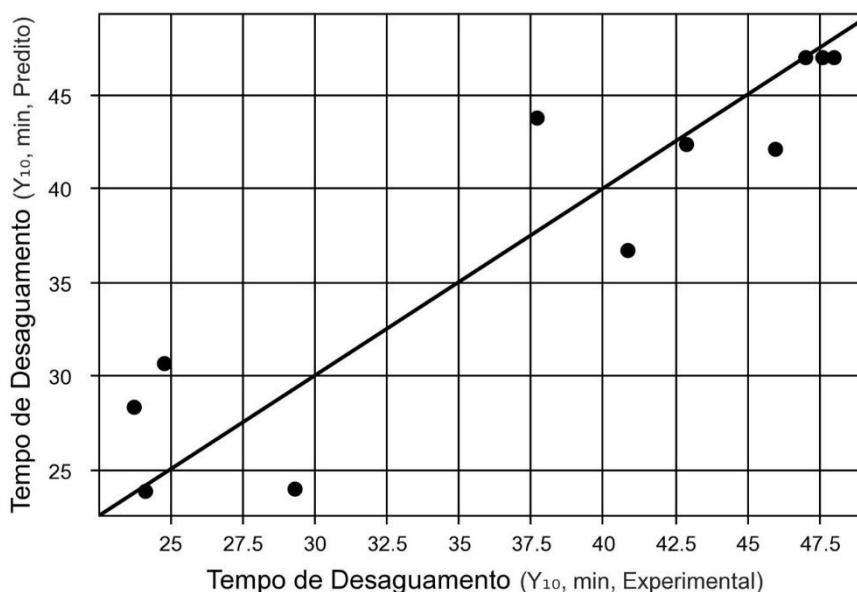
Modelo estatístico: $Y = 46,93 + 3,54 x_1 - 6,76 x_1^2 + 5,72 x_2 - 10,61 x_2^2 + 3,47 x_1 x_2$

Tabela 174: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	855,0	5,00	171,01	5,52	0,042
Resíduos	154,8	5,00	30,97		
Falta de Ajuste	154,3	3,00	51,45	201,91	0,005
Erro Puro	0,5	2,00	0,25		
Total	1009,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 129: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 175: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	90,94	10,20	8,92	0,000
x ₁	9,62	8,12	1,18	0,289
x ₁ ²	6,03	12,49	0,48	0,650
x ₂	30,97	8,12	3,82	0,012
x ₂ ²	-28,42	12,49	-2,28	0,072
x ₁ · x ₂	-3,52	9,94	-0,35	0,737

Fonte: Autor (2019)

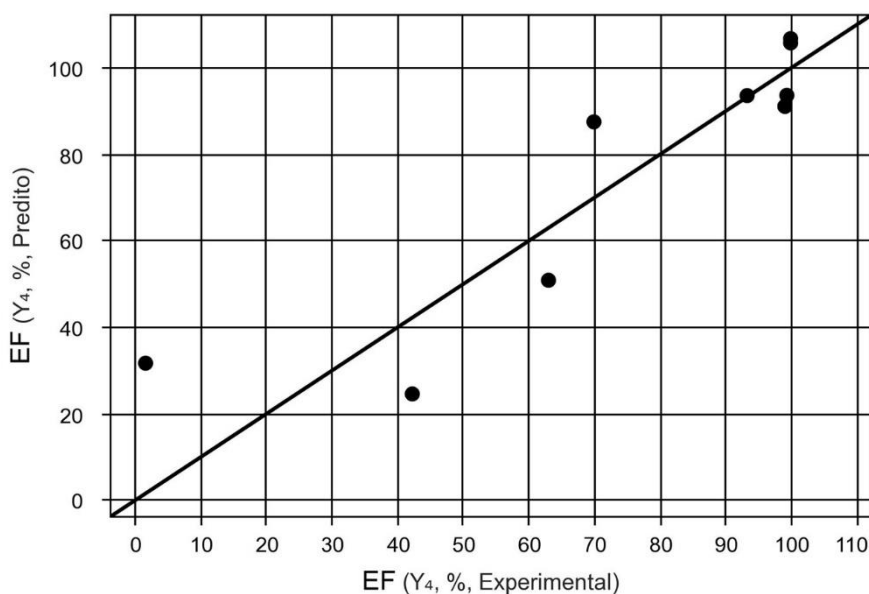
Modelo estatístico: $Y = 90,94 + 9,62 x_1 + 6,03 x_1^2 + 30,97 x_2 - 28,42 x_2^2 - 3,52 x_1 x_2$

Tabela 176: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8411,5	5,00	1682,29	4,26	0,069
Resíduos	1976,0	5,00	395,20		
Falta de Ajuste	1976,0	3,00	658,66	112912,52	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	10387,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 130: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 1

- Perda de partículas

Tabela 177: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	187,12	237,31	0,79	0,466
x_1	31,60	188,86	0,17	0,874
x_1^2	-258,27	290,64	-0,89	0,415
x_2	-676,92	188,86	-3,58	0,016
x_2^2	692,98	290,64	2,38	0,063
$x_1 \cdot x_2$	-169,40	231,30	-0,73	0,497

Fonte: Autor (2019)

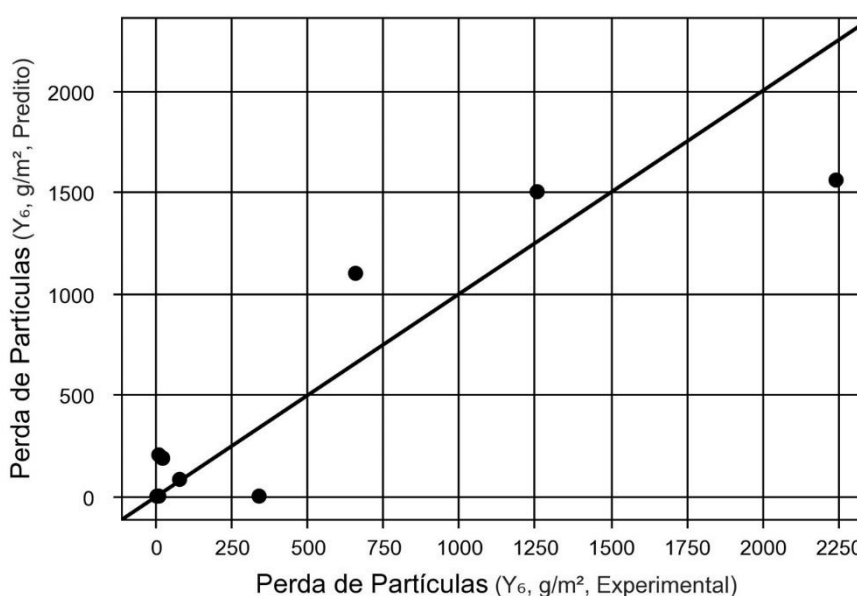
Modelo estatístico: $Y = 187,12 + 31,60 x_1 - 258,27 x_1^2 - 676,92 x_2 + 692,98 x_2^2 - 169,40 x_1 x_2$

Tabela 178: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	4101359,5	5,00	820271,90	3,83	0,083
Resíduos	1069989,1	5,00	213997,82		
Falta de Ajuste	1069984,6	3,00	356661,52	156944,46	0,000
Erro Puro	4,5	2,00	2,27		
Total	5171348,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 131: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 179: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	82,07	0,69	119,24	0,000
X ₁	-11,02	0,55	-20,11	0,000
X ₁ ²	2,01	0,84	2,39	0,063
X ₂	2,28	0,55	4,17	0,009
X ₂ ²	-2,79	0,84	-3,31	0,021
X ₁ · X ₂	2,38	0,67	3,54	0,017

Fonte: Autor (2019)

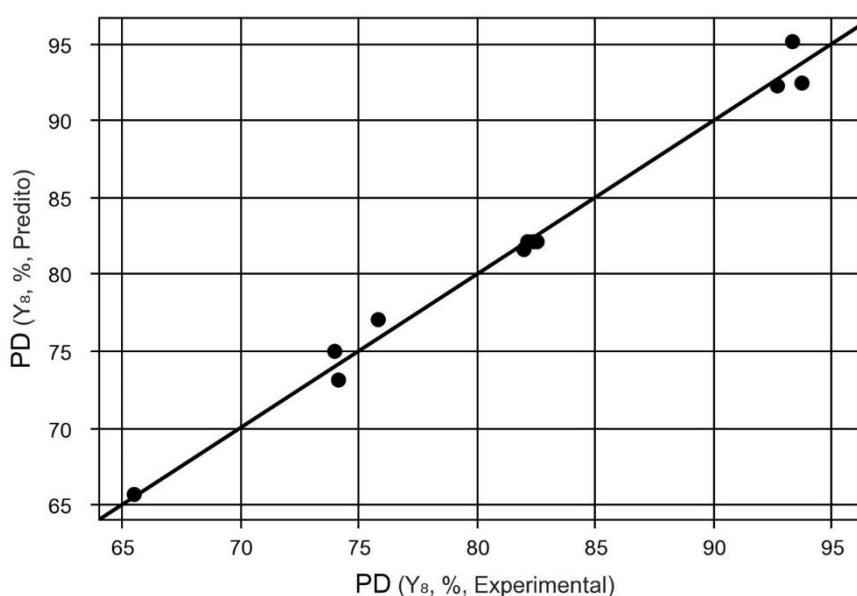
Modelo estatístico: $Y = 82,07 - 11,02 X_1 + 2,01 X_1^2 + 2,28 X_2 - 2,79 X_2^2 + 2,38 X_1 X_2$

Tabela 180: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	806,1	5,00	161,23	89,57	0,000
Resíduos	9,0	5,00	1,80		
Falta de Ajuste	8,9	3,00	2,97	72,80	0,014
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	815,1	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 132: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 181: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	5,51	0,19	28,39	0,000
X ₁	-0,98	0,15	-6,37	0,001
X ₁ ²	1,09	0,24	4,58	0,006
X ₂	0,28	0,15	1,84	0,126
X ₂ ²	-0,61	0,24	-2,58	0,049
X ₁ · X ₂	0,55	0,19	2,91	0,033

Fonte: Autor (2019)

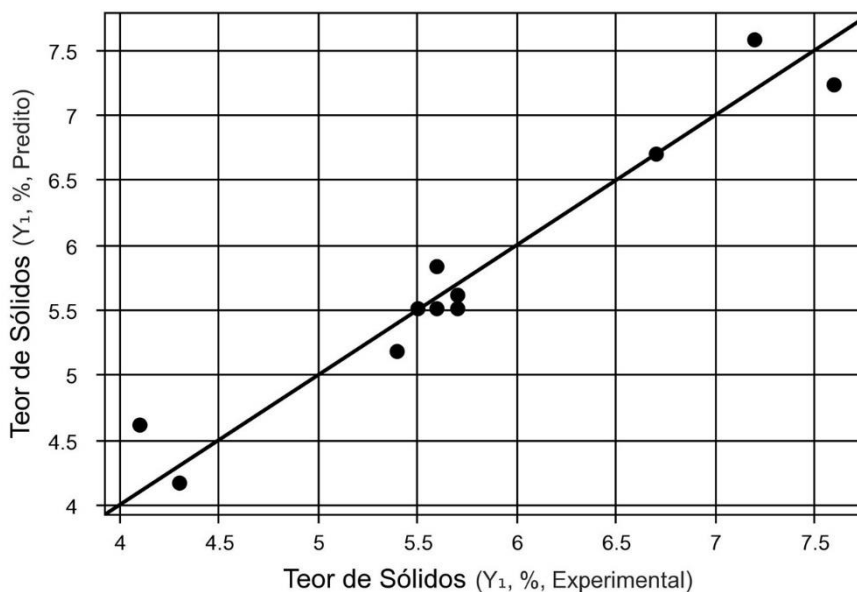
Modelo estatístico: $Y = 5,51 - 0,98 X_1 + 1,09 X_1^2 + 0,28 X_2 - 0,61 X_2^2 + 0,55 X_1 X_2$

Tabela 182: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	10,8	5,00	2,15	15,07	0,005
Resíduos	0,7	5,00	0,14		
Falta de Ajuste	0,7	3,00	0,23	23,15	0,042
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	11,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 133: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1



RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 183: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	15,55	5,29	2,94	0,032
X ₁	12,37	4,21	2,94	0,032
X ₁ ²	2,77	6,48	0,43	0,687
X ₂	-16,75	4,21	-3,98	0,011
X ₂ ²	18,32	6,48	2,83	0,037
X ₁ · X ₂	-22,07	5,16	-4,28	0,008

Fonte: Autor (2019)

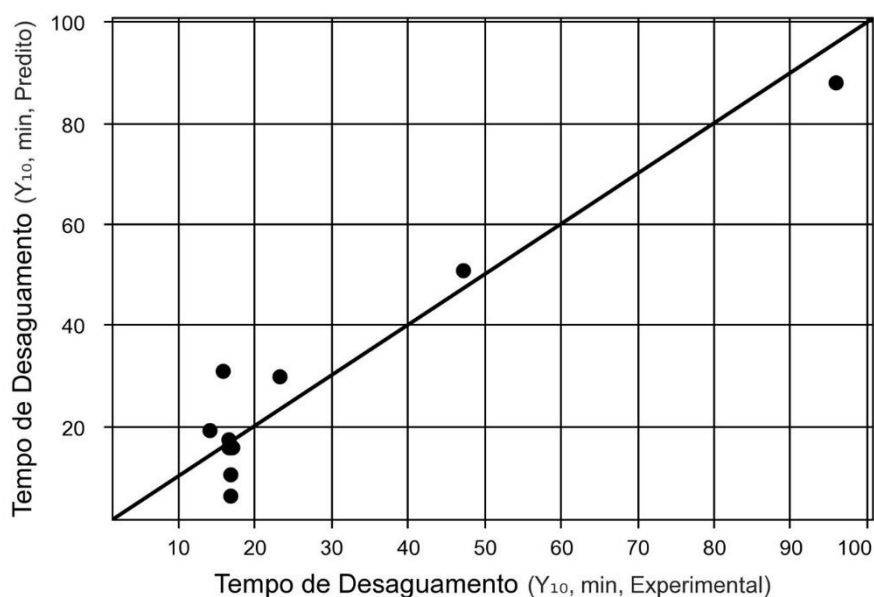
Modelo estatístico: $Y = 15,55 + 12,37 X_1 + 2,77 X_1^2 - 16,75 X_2 + 18,32 X_2^2 - 22,07 X_1 X_2$

Tabela 184: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	5560,0	5,00	1112,01	10,46	0,011
Resíduos	531,5	5,00	106,30		
Falta de Ajuste	531,4	3,00	177,14	4087,95	0,000
Erro Puro	0,1	2,00	0,04		
Total	6091,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 134: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero catiônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 185: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	99,66	0,08	1309,78	0,000
X ₁	3,02	0,06	49,82	0,000
X ₁ ²	-2,63	0,09	-28,20	0,000
X ₂	0,33	0,06	5,50	0,003
X ₂ ²	-0,08	0,09	-0,84	0,441
X ₁ · X ₂	-0,43	0,07	-5,73	0,002

Fonte: Autor (2019)

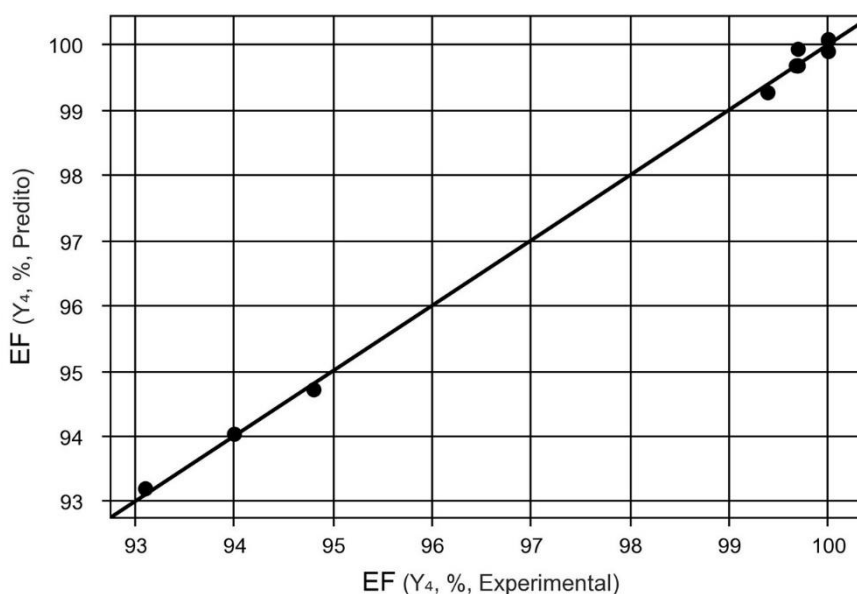
Modelo estatístico: $Y = 99,66 + 3,02 x_1 - 2,63 x_1^2 + 0,33 x_2 - 0,08 x_2^2 - 0,43 x_1 x_2$

Tabela 186: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	75,1	5,00	15,03	683,03	0,000
Resíduos	0,1	5,00	0,02		
Falta de Ajuste	0,1	3,00	0,04	156,49	0,006
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	75,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 135: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 187: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	8,06	0,87	9,28	0,000
x ₁	-33,83	0,69	-48,95	0,000
x ₁ ²	26,03	1,06	24,47	0,000
x ₂	-4,28	0,69	-6,19	0,002
x ₂ ²	1,33	1,06	1,25	0,266
x ₁ · x ₂	4,91	0,85	5,80	0,002

Fonte: Autor (2019)

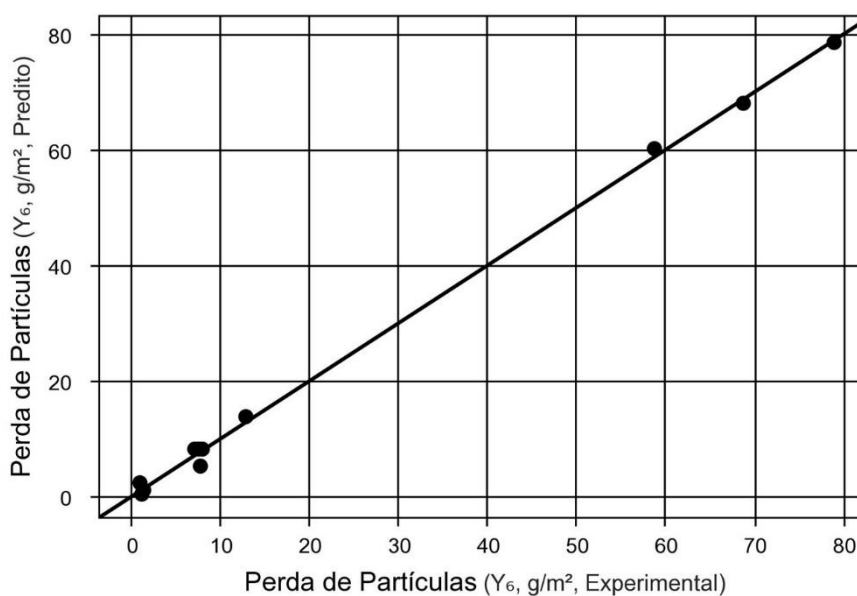
Modelo estatístico: $Y = 8,06 - 33,83 x_1 + 26,03 x_1^2 - 4,28 x_2 + 1,33 x_2^2 + 4,91 x_1 x_2$

Tabela 188: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8976,5	5,00	1795,30	626,27	0,000
Resíduos	14,3	5,00	2,87		
Falta de Ajuste	13,9	3,00	4,64	22,93	0,042
Erro Puro	0,4	2,00	0,20		
Total	8990,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 136: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 189: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	80,65	0,23	356,25	0,000
x ₁	-9,49	0,18	-52,66	0,000
x ₁ ²	2,27	0,28	8,19	0,000
x ₂	-0,36	0,18	-2,00	0,102
x ₂ ²	0,37	0,28	1,32	0,244
x ₁ · x ₂	-0,08	0,22	-0,37	0,724

Fonte: Autor (2019)

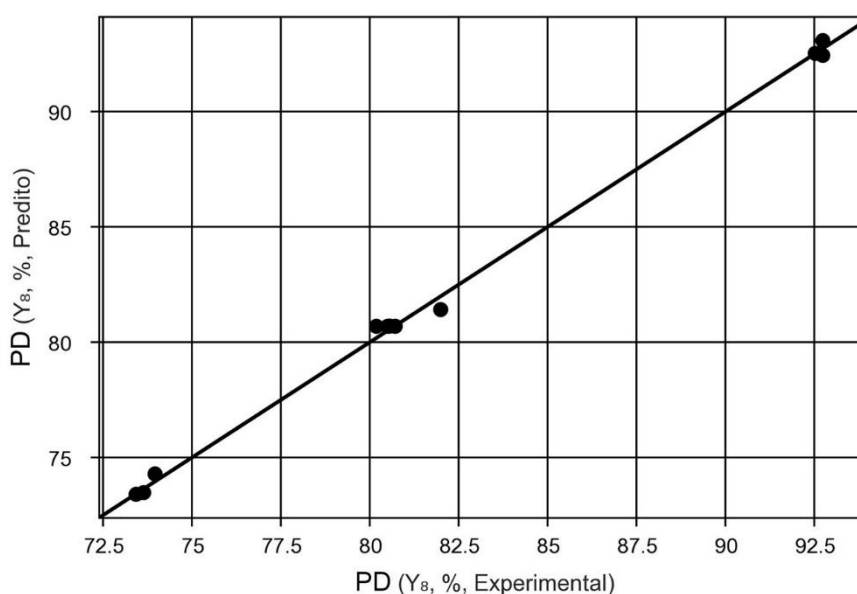
Modelo estatístico: $Y = 80,65 - 9,49 x_1 + 2,27 x_1^2 - 0,36 x_2 + 0,37 x_2^2 - 0,08 x_1 x_2$

Tabela 190: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	556,6	5,00	111,32	571,54	0,000
Resíduos	1,0	5,00	0,19		
Falta de Ajuste	0,8	3,00	0,28	3,93	0,209
Erro Puro	0,1	2,00	0,07		
Total	557,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 137: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 191: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	5,07	0,07	71,66	0,000
x ₁	-0,53	0,06	-9,48	0,000
x ₁ ²	0,98	0,09	11,30	0,000
x ₂	-0,10	0,06	-1,78	0,136
x ₂ ²	0,08	0,09	0,91	0,404
x ₁ · x ₂	0,03	0,07	0,36	0,732

Fonte: Autor (2019)

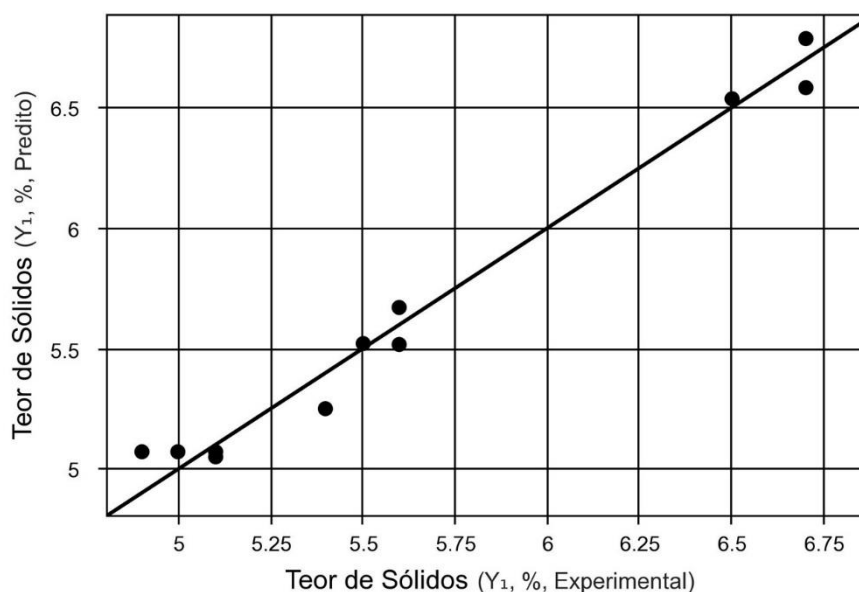
Modelo estatístico: $Y = 5,07 - 0,53 x_1 + 0,98 x_1^2 - 0,10 x_2 + 0,08 x_2^2 + 0,03 x_1 x_2$

Tabela 192: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	4,5	5,00	0,90	47,48	0,000
Resíduos	0,1	5,00	0,02		
Falta de Ajuste	0,1	3,00	0,03	2,50	0,298
Erro Puro	0,0	2,00	0,01		
Total	4,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 138: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero aniônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 193: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	19,10	1,08	17,71	0,000
x_1	-3,15	0,86	-3,68	0,014
x_1^2	2,19	1,32	1,66	0,158
x_2	3,41	0,86	3,97	0,011
x_2^2	1,81	1,32	1,37	0,229
$x_1 \cdot x_2$	0,52	1,05	0,50	0,640

Fonte: Autor (2019)

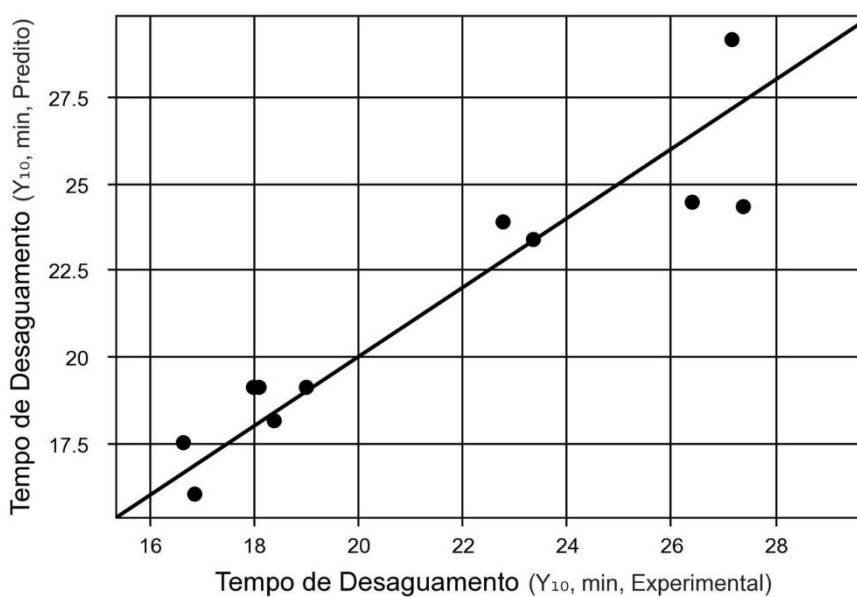
Modelo estatístico: $Y = 19,10 - 3,15 x_1 + 2,19 x_1^2 + 3,41 x_2 + 1,81 x_2^2 + 0,52 x_1 x_2$

Tabela 194: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	158,1	5,00	31,63	7,16	0,025
Resíduos	22,1	5,00	4,42		
Falta de Ajuste	21,5	3,00	7,16	23,61	0,041
Erro Puro	0,6	2,00	0,30		
Total	180,2	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 139: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero aniônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 1

- Eficiência de filtração

Tabela 195: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	77,41	7,41	10,45	0,000
x ₁	11,22	5,89	1,90	0,115
x ₁ ²	8,46	9,07	0,93	0,394
x ₂	32,60	5,89	5,53	0,003
x ₂ ²	-20,29	9,07	-2,24	0,075
x ₁ · x ₂	-3,67	7,22	-0,51	0,632

Fonte: Autor (2019)

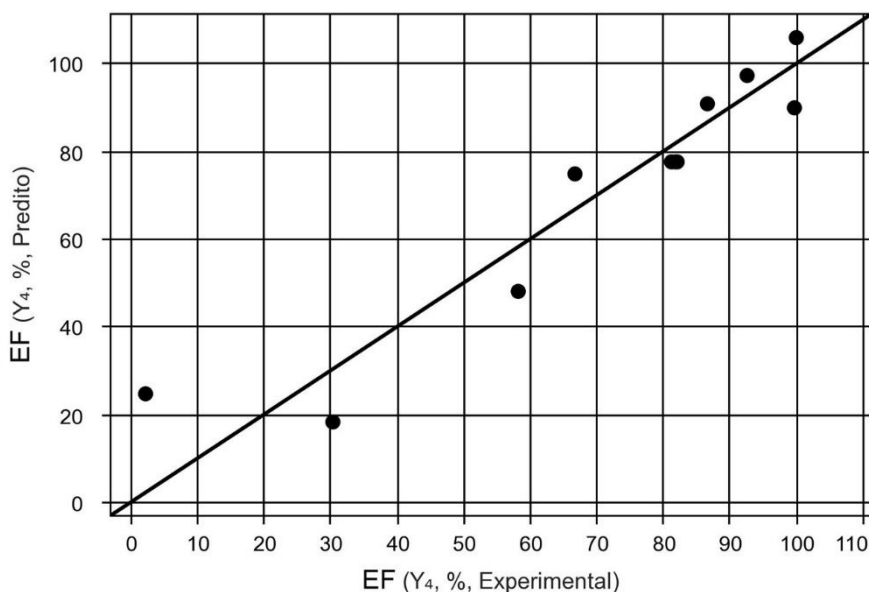
Modelo estatístico: $Y = 77,41 + 11,22 x_1 + 8,46 x_1^2 + 32,60 x_2 - 20,29 x_2^2 - 3,67 x_1 x_2$

Tabela 196: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8253,6	5,00	1650,72	7,92	0,020
Resíduos	1041,9	5,00	208,37		
Falta de Ajuste	1041,4	3,00	347,14	1529,01	0,001
Erro Puro	0,5	2,00	0,23		
Total	9295,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 140: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 1
- Perda de partículas

Tabela 197: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	507,07	181,37	2,80	0,038
x_1	59,22	144,34	0,41	0,699
x_1^2	-324,11	222,13	-1,46	0,204
x_2	-712,97	144,34	-4,94	0,004
x_2^2	476,64	222,13	2,15	0,085
$x_1 \cdot x_2$	-195,20	176,78	-1,10	0,320

Fonte: Autor (2019)

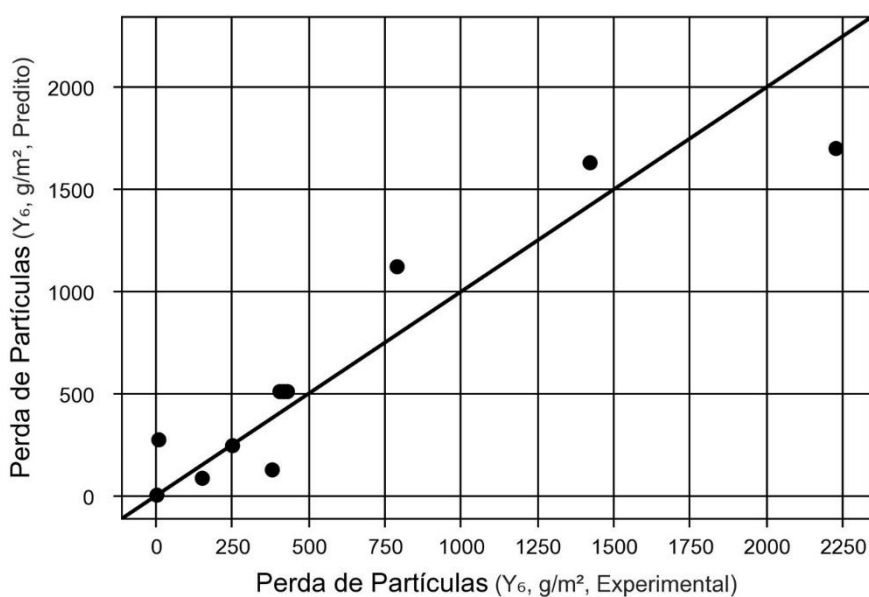
Modelo estatístico: $507,07 + 59,22 x_1 - 324,11 x_1^2 - 712,97 x_2 + 476,64 x_2^2 - 195,20 x_1 x_2$

Tabela 198: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	3904764,1	5,00	780952,83	6,25	0,033
Resíduos	624993,4	5,00	124998,68		
Falta de Ajuste	624761,8	3,00	208253,93	1798,52	0,001
Erro Puro	231,6	2,00	115,79		
Total	4529757,5	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 141: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 1

- Percentual de Desaguamento

Tabela 199: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	82,35	0,76	108,27	0,000
X ₁	-8,82	0,61	-14,56	0,000
X ₁ ²	2,16	0,93	2,32	0,068
X ₂	-1,50	0,61	-2,48	0,056
X ₂ ²	1,11	0,93	1,19	0,288
X ₁ · X ₂	-0,30	0,74	-0,40	0,702

Fonte: Autor (2019)

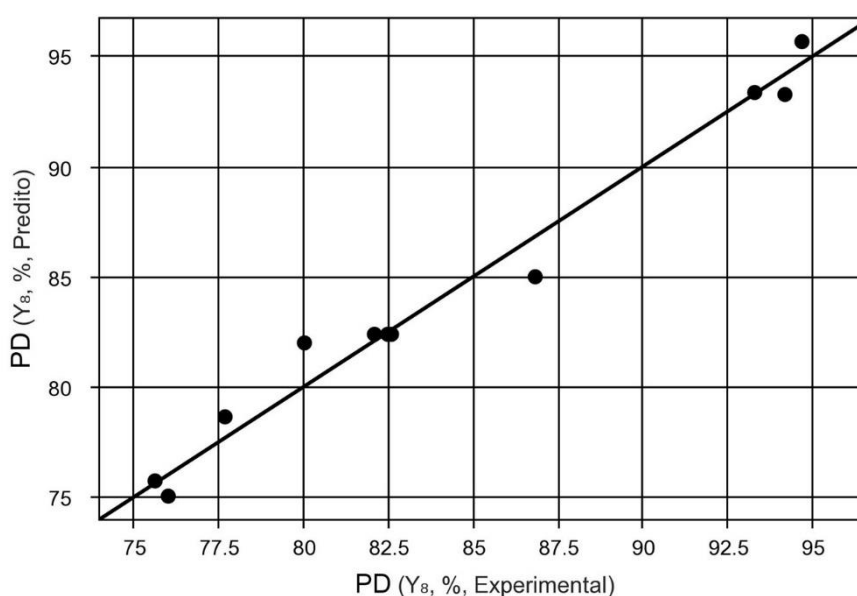
Modelo estatístico: $Y = 82,35 - 8,82 X_1 + 2,16 X_1^2 - 1,50 X_2 + 1,11 X_2^2 - 0,30 X_1 X_2$

Tabela 200: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	499,8	5,00	99,96	45,46	0,000
Resíduos	11,0	5,00	2,20		
Falta de Ajuste	10,9	3,00	3,62	53,12	0,019
Erro Puro	0,1	2,00	0,07		
Total	510,8	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 142: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 1

- Teor de Sólidos

Tabela 201: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	5,51	0,29	19,16	0,000
X ₁	-0,95	0,23	-4,15	0,009
X ₁ ²	1,19	0,35	3,37	0,020
X ₂	-0,58	0,23	-2,55	0,051
X ₂ ²	0,69	0,35	1,95	0,108
X ₁ · X ₂	0,08	0,28	0,27	0,800

Fonte: Autor (2019)

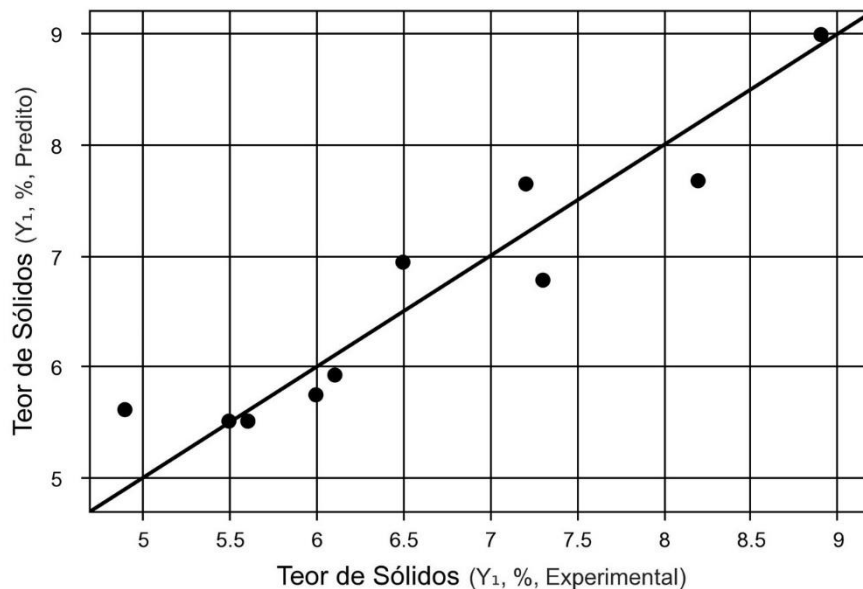
Modelo estatístico: $Y = 5,51 - 0,95 X_1 + 1,19 X_1^2 - 0,58 X_2 + 0,69 X_2^2 + 0,08 X_1 X_2$

Tabela 202: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	13,8	5,00	2,76	8,79	0,016
Resíduos	1,6	5,00	0,31		
Falta de Ajuste	1,6	3,00	0,52	156,21	0,006
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	15,4	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 143: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 1

- Tempo de Desaguamento

Tabela 203: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	144,60	142,50	1,01	0,357
X ₁	27,77	113,40	0,24	0,816
X ₁ ²	-219,98	174,53	-1,26	0,263
X ₂	142,50	113,40	1,26	0,264
X ₂ ²	194,12	174,53	1,11	0,317
X ₁ · X ₂	-27,90	138,89	-0,20	0,849

Fonte: Autor (2019)

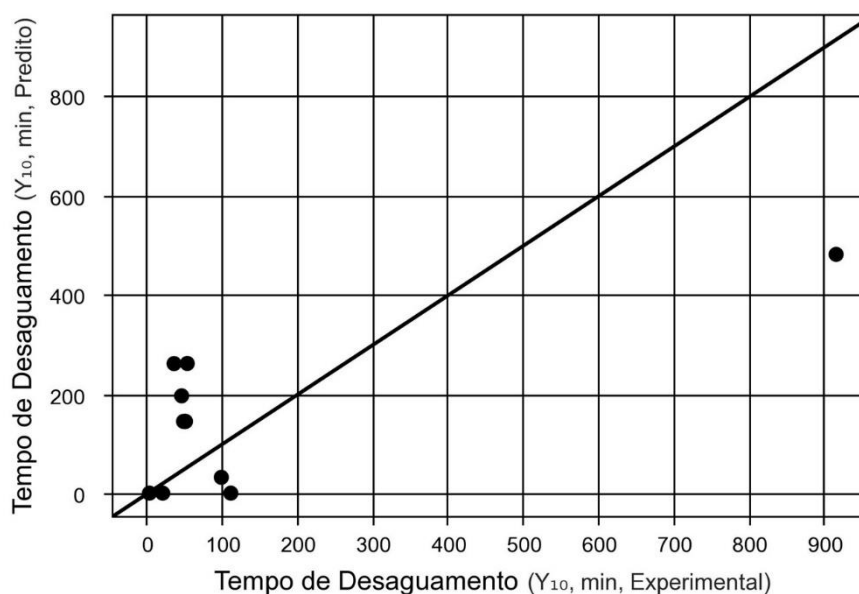
Modelo estatístico: $Y = 144,60 + 27,77 X_1 - 219,98 X_1^2 + 142,50 X_2 + 194,12 X_2^2 - 27,90 X_1 X_2$

Tabela 204: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	302211,3	5,00	60442,25	0,78	0,602
Resíduos	385814,5	5,00	77162,89		
Falta de Ajuste	385813,9	3,00	128604,64	474847,91	0,000
Erro Puro	0,5	2,00	0,27		
Total	688025,7	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 144: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 1



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 2

- Eficiência de filtração

Tabela 205: Resultados da regressão para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	100,72	1,29	77,92	0,000
x_1	3,20	1,03	3,11	0,027
x_1^2	-2,59	1,58	-1,64	0,163
x_2	1,58	1,03	1,54	0,184
x_2^2	-2,04	1,58	-1,29	0,254
$x_1 \cdot x_2$	-2,23	1,26	-1,77	0,138

Fonte: Autor (2019)

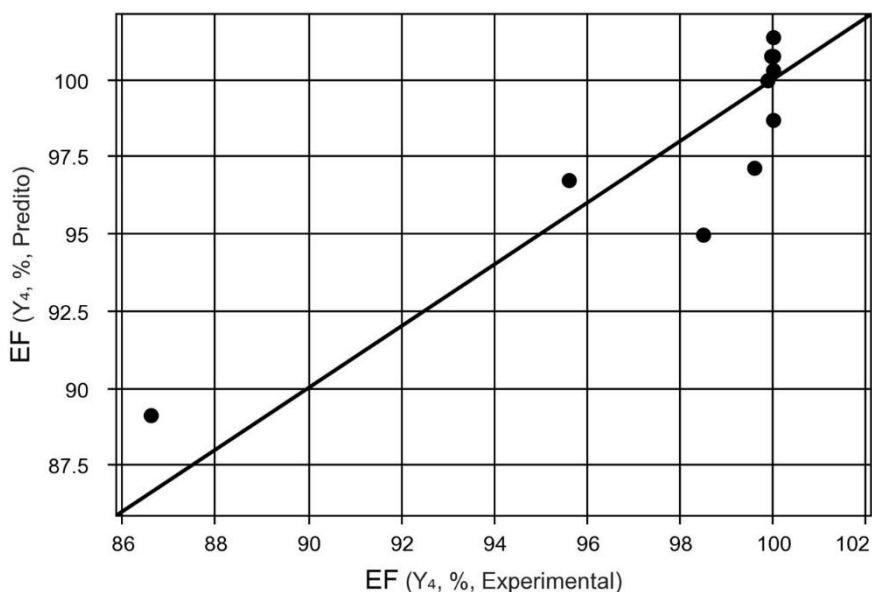
Modelo estatístico: $Y = 100,72 + 3,20 x_1 - 2,59 x_1^2 + 1,58 x_2 - 2,04 x_2^2 - 2,23 x_1 x_2$

Tabela 206: Análise de variância para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	133,6	5,00	26,72	4,21	0,070
Resíduos	31,7	5,00	6,35		
Falta de Ajuste	31,7	3,00	10,58	12698,09	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	165,3	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 145: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para eficiência de filtração no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 2

- Perda de partículas

Tabela 207: Resultados da regressão para perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	-6,97	14,31	-0,49	0,647
x_1	-35,90	11,39	-3,15	0,025
x_1^2	27,67	17,52	1,58	0,175
x_2	-18,80	11,39	-1,65	0,160
x_2^2	24,38	17,52	1,39	0,223
$x_1 \cdot x_2$	25,22	13,95	1,81	0,130

Fonte: Autor (2019)

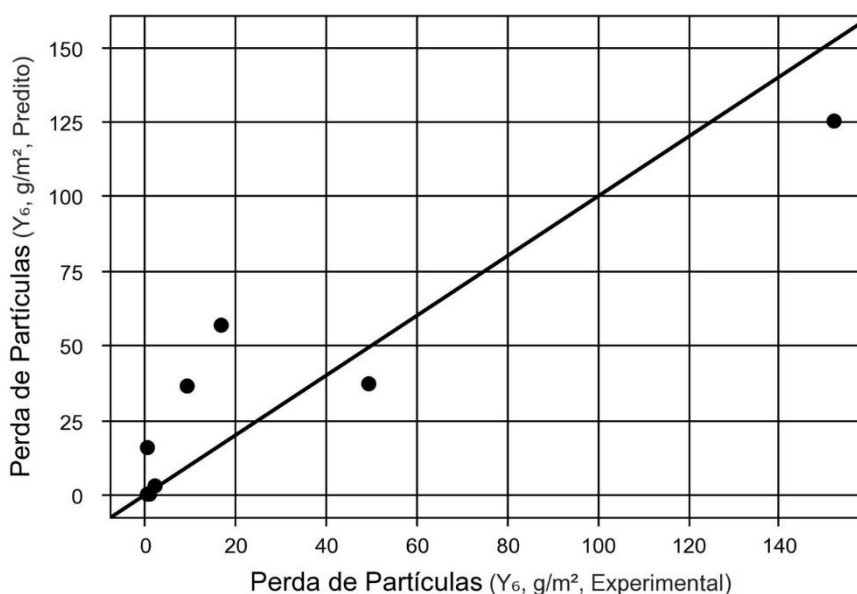
Modelo estatístico: $Y = - 6,97 - 35,90 x_1 + 27,67 x_1^2 - 18,80 x_2 + 24,38 x_2^2 + 25,22 x_1 x_2$

Tabela 208: Análise de variância para perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	17086,1	5,00	3417,22	4,39	0,065
Resíduos	3890,0	5,00	778,00		
Falta de Ajuste	3890,0	3,00	1296,66	2431244,07	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	20976,1	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 146: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para a perda de partículas no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 2

- Percentual de Desaguamento

Tabela 209: Resultados da regressão para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	80,89	0,46	174,74	0,000
x_1	-8,84	0,37	-23,99	0,000
x_1^2	3,73	0,57	6,57	0,001
x_2	0,11	0,37	0,31	0,768
x_2^2	0,16	0,57	0,27	0,795
$x_1 \cdot x_2$	0,04	0,45	0,08	0,941

Fonte: Autor (2019)

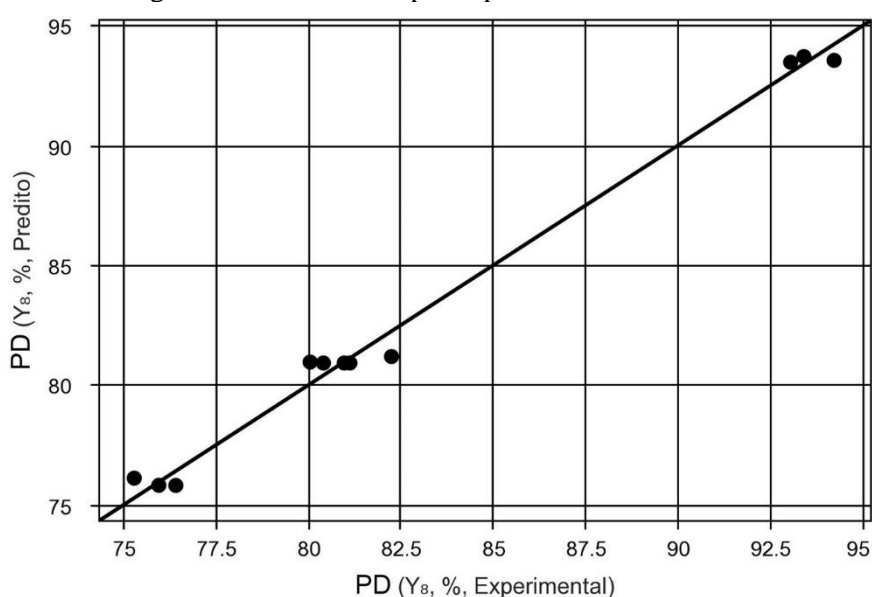
Modelo estatístico: $Y = 80,89 - 8,84 x_1 + 3,73 x_1^2 + 0,11 x_2 + 0,16 x_2^2 + 0,04 x_1 x_2$

Tabela 210: Análise de variância para percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	507,5	5,00	101,51	124,66	0,000
Resíduos	4,1	5,00	0,81		
Falta de Ajuste	3,8	3,00	1,26	9,12	0,100
Erro Puro	0,3	2,00	0,14		
Total	511,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 147: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para o percentual de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 2

- Teor de Sólidos

Tabela 211: Resultados da regressão para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	5,11	0,21	23,88	0,000
x_1	-0,70	0,17	-4,11	0,009
x_1^2	1,54	0,26	5,87	0,002
x_2	-0,08	0,17	-0,49	0,645
x_2^2	0,19	0,26	0,71	0,507
$x_1 \cdot x_2$	0,18	0,21	0,84	0,439

Fonte: Autor (2019)

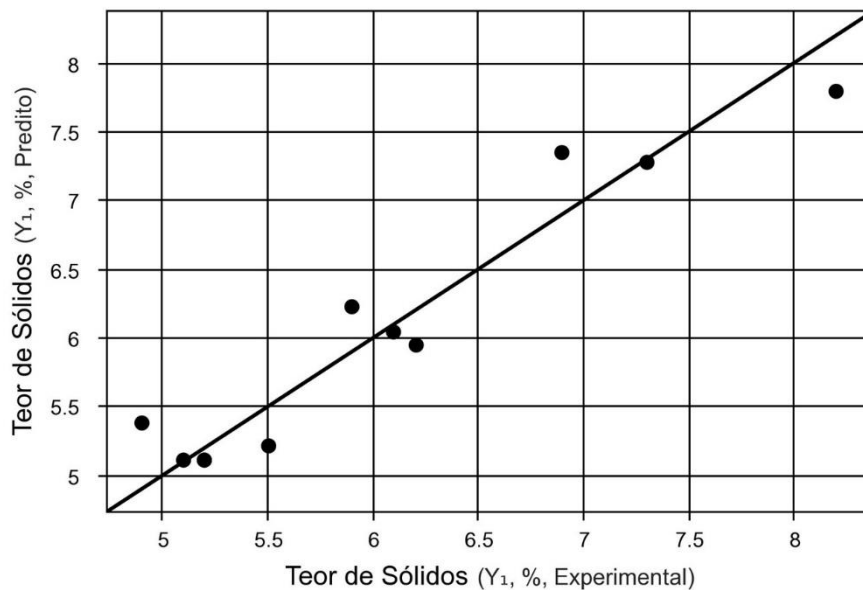
Modelo estatístico: $Y = 5,11 - 0,70 x_1 + 1,54 x_1^2 - 0,08 x_2 + 0,19 x_2^2 + 0,18 x_1 x_2$

Tabela 212: Análise de variância para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	10,1	5,00	2,01	11,58	0,009
Resíduos	0,9	5,00	0,17		
Falta de Ajuste	0,9	3,00	0,29	86,21	0,011
Erro Puro	0,0	2,00	0,00		
Total	10,9	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 148: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para teor de sólidos no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2



Fonte: Autor (2019)

RETA TIPO III: Polímero não iônico DFC 2

- Tempo de Desaguamento

Tabela 213: Resultados da regressão para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Nome	Coefficiente de Regressão	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	111,20	144,16	0,77	0,475
x_1	-4,50	114,73	-0,04	0,970
x_1^2	-211,82	176,56	-1,20	0,284
x_2	-153,35	114,73	-1,34	0,239
x_2^2	211,22	176,56	1,20	0,285
$x_1 \cdot x_2$	1,88	140,51	0,01	0,990

Fonte: Autor (2019)

Modelo estatístico: $Y = 111,20 - 4,50 x_1 - 211,82 x_1^2 - 153,35 x_2 + 211,22 x_2^2 + 1,88 x_1 x_2$

Tabela 214: Análise de variância para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	320196,2	5,00	64039,24	0,81	0,588
Resíduos	394883,4	5,00	78976,67		
Falta de Ajuste	394883,3	3,00	131627,78	6537803,46	0,000
Erro Puro	0,0	2,00	0,02		
Total	715079,6	10,00			

Fonte: Autor (2019)

Figura 149: Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo matemático para tempo de desaguamento no RETA tipo III polímero não iônico DFC 2

