

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E  
MATERIAIS – PPGE3M

**CONCRETO AMBIENTALMENTE MAIS SUSTENTÁVEL COM INCLUSÃO DE  
CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA E POLIPROPILENO  
PÓS-CONSUMO**

Priscila Marques Correa

Tese para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E  
MATERIAIS – PPGE3M

**CONCRETO AMBIENTALMENTE MAIS SUSTENTÁVEL COM INCLUSÃO DE  
CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA E POLIPROPILENO  
PÓS-CONSUMO**

Priscila Marques Correa

Engenheira de Materiais

Tese Apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

Julho, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Rui Vicente Oppermann

Vice-reitor: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-diretor: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carla Schwengber Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)

Correa, Priscila Marques

Concreto Estrutural Ambientalmente Mais Sustentável com Inclusão de Resíduos de Cinza de Casca de Arroz sem controle de queima e Flocos de Polipropileno/ Priscila Marques Correa– 2020. 153p..

Orientadora Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ruth Marlene Campomanes Santana

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2020. 1. reciclagem. 2. Concreto ambientalmente sustentável. 3. Resíduos. I. Santana, Ruth Marlene Campomanes, orient.

PRISCILA MARQUES CORREA

**CONCRETO AMBIENTALMENTE MAIS SUSTENTÁVEL COM INCLUSÃO DE  
CINZA DE CASCA DE ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA E POLIPROPILENO  
PÓS-CONSUMO**

---

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Ruth Marlene Campomanes Santana

---

Prof.<sup>a</sup> Co-orientadora: Angela Gaio Graeff

Aprovado em: \_\_/\_\_/\_\_

Essa tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti – IFRS

---

Prof. Dr. André Luis Catto – Univates

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho – UFRGS

Dedico este trabalho a minha vó, minha família e a todos os amigos que estiveram sempre ao meu lado

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me deu saúde e força para vencer mais esta etapa de minha vida.

Queria agradecer a minha família, principalmente minha vó (*In Memoriam*) pois sempre me incentivou e acreditou que poderia chegar onde cheguei e se não fosse a ela com certeza metade das minhas conquistas não seriam possíveis.

Agradeço ao meu companheiro Diego Guimarães por todo apoio ao longo da pesquisa e na vida, e por ter dado meu maior presente, Titi.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ruth M. Campomanes Santana pela orientação, dedicação, e pelo apoio e incentivo nas horas difíceis na realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Angela G. Graeff, por aceitar ser minha co-orientadora e disponibilizar os laboratórios de ensaio e modelos estruturais, e por sua confiança, amizade e grande auxílio.

À Paula Dartora, Debora Righi, Fernanda Costa, pela amizade, companheirismo, e apoio, ao longo dessa jornada.

À Micheli e a Ana Kelly pelo apoio e realização de várias análises.

Aos diversos alunos IC's que passaram pela minha vida, onde muitos se criaram laços de amizades.

A todos os professores que convivi e de quem fui aluno, em especial aos professores do LAPOL.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Annelise Kopp Alves pela utilização do goniômetro no LACER

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Agradeço a UFRGS, PPGE3M, LAPOL e LEME

Em especial aos meus amigos da vida “fora academia” que foram essenciais na minha vida e no apoio emocional por tudo que passei no período do doutorado: Patrícia, Dani, Tata, Dezza, Karine e Carine.

E por último e não menos importante a minha sogra que me ajudou a cuidar do meu filho para que a defesa da tese fosse possível.

Nunca pare de caminhar e sonhar, mesmo que o caminho seja desconhecido e o sonho inatingível. O importante é nunca desistir da Fé, porque ela dará sentido ao caminho e só ela tem o poder de alcançar o inatingível.

## **PUBLICAÇÕES**

Os resultados obtidos durante o período do doutorado foram publicados ou enviados para publicação nas seguintes revistas científicas:

Priscila M. Correa, Ruth M.C. Santana, Diego Guimarães & Angela G. Graeff: Post-consumer PP as partial substitute of sand: effect of surface treatment PP with surfactant on concrete properties, (2019): Artigo aceito para publicação no periódico **Composite Interfaces** em 06-12-2019. <https://doi.org/10.1080/09276440.2019.1702858>.

Priscila M. Correa, Ruth M.C. Santana, Diego Guimarães & Angela G. Graeff: Comparative study of the influence of the incorporation of PET flakes and PP post-consumer in concrete durability requirements. Manuscript aceito para o periódico: **Revista Matéria**.

Priscila M. Correa, Ruth M.C. Santana, Diego Guimarães & Angela G. Graeff: Reaproveitamento de cinza de casca de arroz e PP- pós consumo: avaliação da incorporação dos resíduos nas propriedades mecânicas do concreto. Manuscript aceito para o periódico: **UERGS**

## **PARTICIPAÇÕES EM CONGRESSOS**

Uma parte dos trabalhos realizados durante o doutorado foram publicados em vários congressos de âmbito nacional e internacional. Seguem a lista destas publicações:

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Influência da granulometria do PP na durabilidade do concreto estrutural. In: CBPol, 2017- Águas de Lindóia - SP.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Substituição parcial da areia pelo PP pós-consumo: propriedades mecânicas do concreto estrutural. In: CBPol, 2017- Águas de Lindóia - SP.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Viabilidade do emprego da cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural para a resistência da penetração de íons cloretos. In: CBECiMat, 2018- Foz do Iguaçu - PR.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Aproveitamento de resíduos de PP como agregado para concreto estrutural na construção civil. In: CBECiMat, 2018- Foz do Iguaçu - PR.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Investigation on durability of rice husk ash and polypropylene-modified concretes. In: XIX Congresso da Sociedade Portuguesa de Materiais and X International Symposium on Materials, 2019- Lisboa - Portugal.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A G. Production and optimization of concrete with the incorporation of rice husk ash and polypropylene. In: XIX Congresso da Sociedade Portuguesa de Materiais and X International Symposium on Materials, 2019- Lisboa - Portugal.

CORREA, P M.; GUIMARÃES, D.; SANTANA, R.M.C.; GRAEFF, A. Reaproveitamento da cinza de casca de arroz para a produção de um concreto sustentável. In: XXVII Jornada de jovens pesquisadores, 2019- São Carlos-SP.

## RESUMO

A construção civil teve um desenvolvimento significativo nos últimos anos, e esse aumento tem o efeito de aumentar a demanda por recursos naturais e a matéria-prima básica para a produção do material mais utilizado por esse setor, o cimento. No caso da construção civil, um dos componentes necessários é a areia extraída em larga escala de fonte natural, gerando impactos ambientais negativos como a incidência de processos erosivos, depreciação da qualidade da água e alterações na geomorfologia fluvial de cursos de água. Para a produção de concreto e argamassa é também necessário o uso do cimento. A produção de cimento tem um alto impacto em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com ênfase no dióxido de carbono, que corresponde a quase todas as emissões totais de GEE. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade do uso da cinza de casca de arroz (CCA) sem controle de queima, um dos resíduos agroindustriais mais abundantes no Rio Grande do Sul, como substituto parcial do cimento, além do uso do polipropileno pós-consumo (PP) como alternativa para reduzir o consumo de areia. A reciclagem deste resíduo polimérico é uma solução vantajosa do ponto de vista técnico e competitiva tanto em termos econômicos quanto sustentáveis. Para tanto, foi analisado o efeito da incorporação dos resíduos de PP (flocos) e de CCA sem controle de queima em dois traços de concreto com resistências de 40 MPa (Traço I) e 60 MPa (Traço II). Para melhorar a interação dos flocos de PP à matriz cimentícia, foi realizado tratamento superficial prévio ao PP com o uso de dois tipos de tensoativos (variando-se o teor e tempo). Com o auxílio do software estatístico Minitab, foi elaborado um plano experimental para definir as misturas analisadas, cobrindo diferentes níveis para as variáveis independentes (com teores mássicos de CCA entre 0% e 40% e em volume de PP entre 0% a 20%). Os tempos de cura considerados foram extrínsecos ao programa, sendo de 28 e 90 dias. Modelos com efeitos estatisticamente significativos foram obtidos. Verificou-se que todas as variáveis afetam as propriedades analisadas: resistência à compressão axial, tração na compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios, absorção por capilaridade, resistência à penetração de íons cloretos e velocidade de propagação ultrassônica. A inclusão de CCA teve um efeito maior, e sua adição melhora consideravelmente o procedimento das misturas utilizadas, principalmente quanto à durabilidade do concreto. Resultados satisfatórios foram obtidos nesta pesquisa, como a melhoria da resistência à penetração de íons cloretos quando incluídos ambos os resíduos nas propriedades estudadas. O tratamento superficial do PP com o tensoativo TS2 (0,2%-20s) apresentou uma boa eficiência na adesão do polímero à massa cimentícia. Observa-se que houve uma melhora nas propriedades mecânicas dos traços I e II, mais visível para as amostras com maiores teores de CCA. A durabilidade do traço I foi reduzida pela incorporação do PP, sendo compensada com a inserção de maiores teores de CCA. Já o traço II não teve sua durabilidade reduzida pela PP. A análise do teor ótimo das misturas analisadas constatou que, para atingir os mesmos valores de referência (sem inclusão de resíduos) para os Traços I e II, o teor considerado como ideal nesta pesquisa é de 18,13% de PP e 30,09% de CCA e 20% de PP e 8% de CCA, respectivamente.

**Palavras- chave:** cinza de casca de arroz sem controle de queima, polipropileno pós-consumo, reciclagem, concreto estrutural, tensoativo.

## ABSTRACT

Civil construction has had a significant development in the years, and this increase has the effect of increasing the demand for natural resources and the basic raw material for the production of the material most used by this sector, cement. In the case of civil construction, one of the components used is sand extracted on a large scale from a natural source, generating negative environmental impacts such as increased erosion processes, depreciation of water quality and changes in river geomorphology of water courses. For the production of concrete and mortar, the use of cement is also necessary. Cement production has a high impact in terms of supplying greenhouse gases (GHG), with an emphasis on carbon dioxide, which corresponds to almost all GHG bases. In this scenario, the present work aims to verify the feasibility of using rice husk ash (CCA) without burning control, one of the most abundant agro-industrial residues in Rio Grande do Sul, as a partial substitute for cement, in addition to the use of post-consumption polypropylene (PP) as an alternative to reduce sand consumption. The recycling of polymeric waste is a solution that is advantageous from a technical and competitive point of view, both in economic and sustainable terms. For this purpose, the effect of incorporating PP (flakes) and CCA residues without burning control into two concrete strips with resistances of 40 MPa (Trace I) and 60 MPa (Trace II) was analyzed. In order to improve the interaction of the PP flakes with the cementitious matrix, a surface treatment prior to the PP was carried out with the use of two types of surfactants (varying the content and time). With the aid of the Minitab statistical software, an experimental plan was developed to define how mixtures were analyzed, covering different levels for the independent variables (with CCA mass contents between 0% and 40% and in PP volume between 0% to 20 %). The curing times considered were extrinsic to the program, being 28 and 90 days. Models with statistically obtained effects were obtained. It was found that all variables affect the analyzed properties: resistance to axial compression, traction in diametrical compression, modulus of elasticity, water absorption, voids index, capillarity absorption, resistance to penetration of chloride ions and propagation speed ultrasonic. The inclusion of CCA had a greater effect, and its addition considerably improves the procedure of the mixtures used, especially regarding the durability of the concrete. Satisfactory results were obtained in this research, as an improvement of resistance to the penetration of chloride ions when both residues are included in the studied properties. The surface treatment of PP with the surfactant TS2 (0.2% -20s) shows a good efficiency in the adhesion of the polymer to the cementitious mass. It can be observed that there was an improvement in the mechanical properties of lines I and II, more visible for those with higher levels of CCA. The restoration of the trace was reduced by the incorporation of PP, being compensated with the insertion of higher levels of CCA. Trace II, on the other hand, did not have its durability reduced by PP. An analysis of the optimum content of the analyzed mixtures found that, to achieve the same reference values (without including residues) for Traces I and II, the theorized as ideal in this research is 18.13% PP and 30.09% CCA and 20% PP and 8% CCA, respectively.

**Keywords:** rice husk ash without burning control, post-consumption polypropylene, recycling, structural concrete, surfactant.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	22
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	25
2.1 OBJETIVO GERAL .....	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
3.1 CONCRETO .....	27
3.2 CONCRETO HÍBRIDO .....	27
3.3 AREIA .....	28
3.4 POLIPROPILENO (PP) .....	29
3.4.1 Tratamento superficial do PP .....	29
3.4.2 Polipropileno aplicado na construção civil .....	31
3.5 CIMENTO PORTLAND .....	32
3.5.1 Processos de fabricação do cimento Portland .....	32
3.5.2 Hidratação do cimento Portland .....	35
3.5.3 Principais tipos de cimento Portland .....	36
3.5.4 Produção nacional .....	36
3.5.5 Impactos ambientais causados pela produção de cimento .....	37
3.6 CINZAS DE CASCA DE ARROZ (CCA) COMO ADIÇÃO MINERAL .....	37
3.6.1 Características da CCA .....	40
3.6.1.1 <i>Composição Química</i> .....	41
3.6.1.2 <i>Características Físicas</i> .....	42
3.6.2 Tratamentos da cinza de casca de arroz .....	43
3.6.2.1 <i>Tratamento Térmico da CCA</i> .....	42
3.6.2.2 <i>Tratamento Físico da CCA</i> .....	44

3.6.3	Métodos para determinação da pozolanicidade.....	45
3.6.4	Influência da CCA nas propriedades do concreto .....	47
3.6.5	Microestrutura do concreto com CCA .....	48
3.7	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	49
3.7.1	Resistência à compressão axial.....	50
3.7.2	Resistência à tração do concreto .....	52
3.7.3	Módulo de elasticidade .....	53
3.8	DURABILIDADE.....	53
3.8.1	Propriedades de Absorção de água .....	54
3.8.2	Resistência aos cloretos .....	56
3.8.3	Avaliação da durabilidade do concreto através do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico .....	58
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
4.1	MATERIAIS .....	61
4.1.1	Polipropileno pós-consumo e seu beneficiamento.....	61
4.1.2	Cimento.....	62
4.1.3	Água de amassamento .....	62
4.1.4	Agregado miúdo .....	62
4.1.5	Agregado graúdo.....	62
4.1.6	Cinza de Casca de arroz (CCA).....	62
4.1.7	Aditivo .....	62
4.2	MÉTODO DE PESQUISA.....	66
4.2.1	1º ETAPA - Estudo preliminar da incorporação do PP.....	66
4.2.1.1	<i>Dosagem do concreto referência.....</i>	<i>67</i>
4.2.1.2	<i>Tratamento superficial do PP.....</i>	<i>67</i>
4.2.1.3	<i>Granulometria do PP .....</i>	<i>69</i>
4.2.1.4	<i>Dosagem dos traços contendo o PP tratado.....</i>	<i>69</i>

4.2.2 2º ETAPA- Avaliação das características físicas e químicas da cca .....	69
4.2.2.1 <i>Difração de raios x (DRX)</i> .....	70
4.2.2.2 <i>Adsorção de BET</i> .....	70
4.2.2.3 <i>Granulometria a laser</i> .....	70
4.2.2.4 <i>Determinação do Índice de Atividade Pozolânica</i> .....	70
4.2.2.5 <i>Massa Específica</i> .....	70
4.2.3 3º Etapa: Execução do planejamento de experimentos .....	70
4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	73
4.3.1 Matriz Experimental .....	74
4.3.2 Variáveis e composições estudadas .....	74
4.3.3 Análise de dados .....	75
4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO HIBRIDO .....	76
4.4.1 Ensaio do concreto no estado fresco.....	76
4.4.2 Ensaio do concreto no estado endurecido.....	77
4.4.2.1 <i>Resistência à compressão axial</i> .....	77
4.4.2.2 <i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	77
4.4.2.3 <i>Módulo de elasticidade</i> .....	78
4.4.2.4 <i>Determinação de absorção de água por imersão, índices de vazios</i> .....	79
4.4.2.5 <i>Determinação da absorção de água por capilaridade</i> .....	79
4.4.2.6 <i>Ensaio acelerado de penetração de cloretos</i> .....	80
4.4.2.7 <i>Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica</i> .....	82
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	83
5.1 RESULTADOS DA 1º e 2º ETAPA .....	83
5.1.1 Dosagem do traço referência .....	83
5.1.2 Tratamento superficial do PP.....	83
5.1.3 Avaliação da granulometria do PP tratado.....	86
5.1.3.1 <i>Resistência à compressão axial</i> .....	86

5.1.3.2 Absorção de água, massa específica e índice de vazios.....	88
5.1.4 Caracterização química e física da cinza de casca de arroz .....	89
5.1.4.1 Difração de raios x (DRX) .....	89
5.1.4.2 Distribuição granulométrica de CCA .....	91
5.1.4.3 Área Superficial Específica da CCA.....	91
5.1.4.4 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias .....	93
5.1.4.5 Massa Específica .....	93
<b>5.2 RESULTADOS DA 3ª ETAPA: CONCRETO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL.....</b>	<b>97</b>
5.2.1 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	97
5.2.1.1 Resistência à compressão simples .....	97
5.2.1.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	99
5.2.1.3 Módulo de elasticidade .....	104
5.2.1.4 Índice de vazios .....	107
5.2.1.5 Absorção de água.....	111
5.2.1.6 Absorção de água por capilaridade.....	114
5.2.1.7 Resistência à penetração de íons cloretos.....	117
5.2.1.8 Velocidade de propagação ultrassônica .....	121
5.2.1.9 Otimização dos resultados .....	125
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>127</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>130</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE A- TABELAS DE COMPOSIÇÕES QUÍMICAS E FÍSICAS DO CIMENTO</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE B- EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS.....</b>	<b>147</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção polida de um corpo de prova de concreto.....	26
Figura 2: Fórmula estrutural do PP .....	29
Figura 3: Fluxograma da fabricação do cimento Portland .....	32
Figura 4: Matéria- prima para a fabricação do clínquer a) calcário b) argila c) quartzito d) minério de ferro.....	33
Figura 5: Microestrutura da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento .....	35
Figura 6: Representação da liberação de calor em função do tempo .....	35
Figura 7: Produção nacional de cimento Portland.....	37
Figura 8: Emissão de CO <sub>2</sub> por tonelada de cimento para diferentes regiões do mundo.....	38
Figura 9: Produção nacional de arroz em diferentes anos .....	39
Figura 10: (A) Casca de arroz (B) Cinzas de cascas de arroz .....	40
Figura 11: Imagens de MEV para temperatura de queima a 500°C com diferentes taxas de resfriamento (a) amostra com resfriamento lento (b) resfriamento rápido.....	44
Figura 12: Hidratação do concreto com adição da CCA.....	49
Figura 13: Resistência à compressão axial de concretos com incorporação de resíduos poliméricos. ....	51
Figura 14: Resistência à penetração de íons de cloreto (C) em diferentes idades com diferentes teores de incorporação de CCA.....	56
Figura 15: Esquema das etapas da pesquisa .....	61
Figura 16: Flocos de PP beneficiados a partir de potes de sorvete pós-consumo. ....	62
Figura 17: Granulometria da areia.....	63
Figura 18: Granulometria da brita .....	64
Figura 19: Ação dos aditivos plastificantes.....	65
Figura 20: Representação esquemática da 1° Etapa .....	66
Figura 21: Ângulo de contato de gota sobre a superfície: a) Preparação das amostras; b) Teste de ângulo de contato com uso de tensiômetro, c) gotas depositadas na superfície ensaiada .....	68
Figura 22: Cálculo do ângulo de contato feito pelo software Surftens 3.0 TM .....	69
Figura 23: Representação esquemática da 2° Etapa .....	70
Figura 24: Representação em 2D das variáveis estudadas no projeto de experimentos.....	73
Figura 25: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	77
Figura 26: Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial .....	78

Figura 27: Registros do ensaio de resistência à compressão diametral.....	79
Figura 28: Corpo de prova durante o ensaio de módulo de elasticidade.....	79
Figura 29: Determinação da absorção de água por capilaridade.....	80
Figura 30: Corte do CPs para o ensaio de difusão de cloretos. ....	81
Figura 31: Ensaio acelerado de penetração de cloretos.....	81
Figura 32: Resistência à compressão axial para os corpos de prova do traço I e II em função do tempo de cura.....	84
Figura 33: Imagem da gota de água sobre a superfície: (a) PP sem tratamento; (b) PP com tratamento TS1; (c) PP com tratamento TS2.....	85
Figura 34: Absorção de água, massa específica e índice de vazios para os traços I e II.....	88
Figura 35: DRX das CCA com tempos de moagem: de: a) 0h b) 15 min c) 1h d) 2h e) 4h .....	91
Figura 36: Curva granulométrica das amostras de CCA com tempos de moagem de: (a) 15 min (b) 1h (c) 2h (d) 4h.....	93
Figura 37: Gráfico de Pareto da resistência à compressão axial: a) Traço I; b) Traço II.....	96
Figura 38: Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para o traço I.....	97
Figura 39: Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para o traço II .....	98
Figura 40: Gráfico de contorno de resistência à compressão axial para: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias .....	99
Figura 41: Gráfico de Pareto de RCD do a) Traço I; b) Traço II .....	101
Figura 42: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o traço I .....	102
Figura 43: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o traço II .....	103
Figura 44: Gráfico de contorno de RCD dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias .....	104
Figura 45: Gráfico de Pareto do Módulo de elasticidade do: a) Traço I; b) Traço II.....	105
Figura 46: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço I.....	106
Figura 47: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço II.....	107
Figura 48: Gráfico de contorno do Módulo de elasticidade dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias.....	108
Figura 49: Gráfico de Pareto do Índice de vazios (90 dias) do: a) Traço I; b) Traço II.....	109
Figura 50: Resultado do ensaio de índice de vazios do traço I.....	110
Figura 51: Resultado do ensaio de índice de vazios do traço II .....	110

Figura 52: Gráfico de contorno de Índice de vazios dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias.....	112
Figura 53: Gráfico de Pareto da Absorção de água (90 dias) dos corpos de prova do: a) Traço I; b) Traço II .....	112
Figura 54: Resultados do ensaio absorção de água do traço I.....	114
Figura 55: Resultados do ensaio absorção de água do traço II.....	115
Figura 56: Gráfico de contorno de Absorção de água do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias .....	116
Figura 57: Gráfico de Pareto da absorção de água por capilaridade (90 dias): a) Traço I; b) Traço II .....	117
Figura 58: Absorção de água por capilaridade do traço I.....	118
Figura 59: Absorção de água por capilaridade do traço II .....	119
Figura 60: Gráfico de contorno da absorção de água por capilaridade: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias.....	120
Figura 61: Gráfico de Pareto de carga passante: a) Traço I; b) Traço II .....	121
Figura 62: Carga passante do traço I .....	122
Figura 63: Carga passante do traço II.....	123
Figura 64: Gráfico de contorno da carga passante de íons cloretos: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias.....	124
Figura 65: Gráfico de Pareto de VPU: a) Traço I; b) Traço II .....	125
Figura 66: Resultados da VPUM para os corpos de prova do traço I.....	126
Figura 67: Resultados da VPUM para os corpos de prova do traço II.....	127
Figura 68: Gráfico de contorno de VPU do: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias.....	128
Figura 69: Plotagem do ponto ótimo para as propriedades avaliadas do traço I .....	130
Figura 70: Plotagem do ponto ótimo para as propriedades avaliadas do traço II.....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, resistência e custos. ....	27
Tabela 2: Composição química da CCA de acordo com diferentes autores .....	41
Tabela 3: Características físicas da CCA .....	42
Tabela 4: Efeito do aumento da temperatura na estrutura da CCA e sua área específica .....	43
Tabela 5: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade .....	46
Tabela 6: Desenvolvimento microestrutural de pasta de cimento Portland com CCA .....	48
Tabela 7: Classificação do concreto de acordo com a porosidade e absorção de água. ....	55
Tabela 8: Informações do aditivo superplastificante .....	65
Tabela 9: Traços de referência usados neste estudo .....	67
Tabela 10: Quantidade de corpos de prova para cada ensaio realizado .....	74
Tabela 11: Definição das misturas estudadas nesta pesquisa .....	76
Tabela 12: Classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloreto de acordo com a carga passante .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 13: Características físicas dos traços analisados: traços I e II .....	83
Tabela 14: Valores médios do ângulo de contato das amostras de PP utilizando-se o tensoativo	85
Tabela 15: Resistência à compressão axial dos corpos de prova com traço I de concreto com e sem flocos de PP com e sem tratamento de granulometrias de 1 e 4 mm. ....	86
Tabela 16: Resistência compressão axial dos corpos de prova com traço II de concreto sem e com flocos de PP de granulometrias de 1 e 4 mm.....	87
Tabela 17: Resultado da análise de BET das amostras de CCA antes e após moagem .....	92
Tabela 18: Resultados da compressão axial e do Índice de atividade pozolânica das amostras de CCA nos diferentes granulometrias.....	94
Tabela 19: Massa específica das amostras CCA antes e após moagem .....	95
Tabela A I: Composição química do cimento CPII-F42.....	144
Tabela A II: Características físicas do cimento CPII-F42.....	145
Tabela A III: Composição física do cimento CPV-ARI. ....	146
Tabela B I: Equação de regressão do ensaio de compressão axial.....	148
Tabela B II: Equação de regressão do ensaio de tração na compressão diametral.....	149
Tabela B III: Equação de regressão do módulo de elasticidade	87
Tabela B IV: Equação de regressão do índice de vazios.....	149
Tabela B V: Equação de regressão da absorção de água do concreto.....	150

Tabela B VI: Equação de regressão da VPum .....	150
Tabela B VII: Equação de regressão da absorção de água por capilaridade .....	151
Tabela B VIII: Equação de regressão da resistência à penetração de íons cloretos .....	153

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

a/c:	Relação água/cimento
AC:	Ângulo de contato
ANOVA:	Análise de variância
BET:	Brunauer, Emmett, Teller
CAD:	Concreto de alto desempenho
CCA:	Cinzas de casca de arroz
CP I:	Cimento Portland Comum
CP V:	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP's:	corpos de provas
DRX:	Difração de Raios X
Fck:	Feature Compression Know
FTIR/ATR:	Espectroscopia de infravermelho
IAP:	Índice de atividade pozolânica
LVDTs:	Transformador diferencial variável linear
PCSO:	Projeto Composto de Segunda Ordem
PP:	Polipropileno
RCD:	Resistência à tração por compressão diametral
ZT:	Zona de transição
ZTI:	Zona de transição interfacial

## 1 INTRODUÇÃO

O meio ambiente vem sofrendo alterações devido à intervenção do homem. Os recursos naturais vêm se esgotando, pois desde os primórdios são as matérias-primas usadas pelos seres humanos, e devido a isso, há uma necessidade de encontrar alternativas para reduzir o impacto ambiental ocasionado pela ação do homem. A construção civil é um dos setores que mais preocupa, devido ao elevado consumo de matérias-primas naturais, como é o caso da utilização da areia. Outra preocupação é o elevado consumo de cimento na produção do concreto. A produção do cimento gera um elevado nível de CO<sub>2</sub> que é liberado na atmosfera. A emissão de CO<sub>2</sub> varia de país para país e depende da tecnologia e matéria-prima empregada na produção. Em 2013, estima-se que a emissão de CO<sub>2</sub> para a produção de cimento Brasil foi de 610 kg CO<sub>2</sub>/ton. cimento. Com a demanda de 3,6 bilhões de ton/ano o consumo de cimento deverá aumentar 2,5 vezes até 2050. Hoje a emissão estimada chega a 5% do total de CO<sub>2</sub> [1].

No Brasil, em 2017, foram consumidas aproximadamente 39 milhões de toneladas de cimento, sendo 5% somente no estado do Rio Grande do Sul [2]. Em escala mundial, quase 90% das emissões de CO<sub>2</sub> provindas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação/descarbonatação da matéria-prima ou queima de combustíveis no interior do forno [3].

No propósito de diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera é necessário que o setor da construção civil incorpore alternativas sustentáveis, para reduzir esta problemática. A utilização de resíduos como substituto do cimento auxilia na redução da extração de recursos naturais não renováveis e dão destino a rejeitos de diversas origens [4].

A economia do estado do Rio Grande do Sul (RS) é vinculada à atividades agrícolas, sendo produzidos grandes volumes de arroz. Em 2018, o RS produziu 7,3 milhões de toneladas de arroz e, como consequência, geraram uma elevada quantidade de resíduos provenientes da atividade de processamento e beneficiamento, como as cinzas resultantes da queima da casca [5]. Estes resíduos impactam negativamente o meio ambiente quando descartados inadequadamente.

De acordo com a FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental), existem oito alternativas para o descarte do resíduo: armazenamento temporário para posterior descarte, utilização das cinzas de casca de arroz (CCA) no próprio processo industrial como combustível, destinação final em unidades licenciadas de terceiros, aterro próprio para a destinação da CCA, compostagem para

o processamento da casca de arroz, incorporação dos resíduos no solo em propriedades rurais, utilização em outros processos industriais já licenciados como carga ou matéria-prima e novas tecnologias para a utilização dos resíduos [6].

Cerca de 50 a 70% da massa de clínquer presente no cimento Portland pode ser substituída por diferentes materiais complementares. Esses materiais podem ser rejeitos industriais e/ou agroindustriais com ou sem beneficiamento, como por exemplo: cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, CCA entre outros. Nas pesquisas já realizadas com a incorporação de resíduos foi observado um melhor desempenho na durabilidade do concreto, através da redução do tamanho dos poros, diminuindo assim a probabilidade de corrosão da armadura [7,8,9].

As CCA podem ser produzidas com controle ou não de temperatura, apresentando assim características distintas:

- CCA produzida por combustão controlada: são altamente reativas, favorecendo maior resistência mecânica nas idades iniciais e um aumento da durabilidade.
- CCA produzida por combustão não controlada: é necessário um beneficiamento através da moagem para que possua a finura adequada para substituição do cimento, este material é rico em sílica (teor maior que 90%) [10].

Outro material muito consumido pela construção civil é a areia, utilizado para a produção de concretos e argamassas, um material de fonte não renovável que consumida em grande quantidade por esse setor, afeta negativamente o meio ambiente. A produção de areia para o setor da construção civil tem uma parcela fundamental na economia do setor por gerar diversos empregos. Todavia, gera problemas ambientais devido à utilização de várzeas e leitos de rios, criando sérios problemas para as lavras em operação. Em consequência, novas áreas de extração estão cada vez mais distantes dos locais de consumo, encarecendo o preço final dos produtos [11].

No estado do RS os principais rios que são utilizados para a extração de recursos minerais (como a areia) são os rios: Caí, Guaíba e Jacuí. Mas atualmente no rio Guaíba está proibida a extração, e nos demais rios há ressalvas quanto à profundidade que se pode ir para lavar a areia e à distância que se deve manter em relação às margens do rio [11].

Como alternativa para evitar o excesso de extração de areia das encostas dos rios, está sendo pesquisada, em substituição parcial da areia, a utilização de diferentes teores de resíduos poliméricos, como por exemplo: Polipropileno (PP) e Politereftalato de etileno (PET). Em

pesquisas onde foram adicionados polímeros como parte do agregado miúdo para a produção do concreto, pode-se verificar que a substituição da areia por um polímero com a metade da massa específica do agregado original proporcionou valores menores de resistência mecânica (compressão axial) quando comparado com a literatura[12].

A escolha de diversos autores em beneficiar resíduos poliméricos ocorre devido ao grande volume destes materiais descartados inadequadamente em aterro sanitário. Nesta pesquisa foi utilizado o polipropileno (PP) pós-consumo, em forma de partículas (flocos). O PP é o plástico mais comercializado, seguido do polietileno de alta densidade (PABD) e o policloreto de vinila (PVC). Em 2013 a demanda mundial do PP foi de aproximadamente 55 milhões de toneladas, e para 2021 existe uma previsão do aumento em até 6% da demanda [13].

O PP é um polímero com ampla variedade de aplicações, sendo estas fundamentadas no tipo de polipropileno, que pode ser *homopolímero*, *copolímero randômico* ou *copolímero de impacto*. As principais aplicações do PP são em embalagens, rótulos, fibras para tecidos, peças automotivas, utensílios domésticos entre outros [14].

O PP é empregado em várias áreas, mas o setor de maior demanda é o setor de embalagens, responsável pela metade do consumo mundial do polímero. Como consequência, este setor também é o grande responsável pela geração do resíduo. Um terço do resíduo doméstico é composto por embalagens, e desta fração, 80% é descartada após o uso. Com isso, estas embalagens ocupam grandes volumes nos aterros e lixões e este material leva mais de 400 anos para se degradar [15].

Como parte de um projeto mais abrangente, este trabalho visa a avaliação experimental de algumas propriedades relacionadas à durabilidade e propriedades mecânicas de concretos produzidos com substituição parcial de agregados pela adição de PP beneficiados, assim como o emprego de resíduos de CCA para a substituição parcial do cimento.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um concreto ambientalmente sustentável com a substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz (CCA) sem controle de queima e da areia pelo polipropileno (PP) pós-consumo em concretos estruturais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o propósito de se alcançar o objetivo geral supracitado foram definidos os seguintes objetivos específicos

- Determinar a condição ótima do tratamento superficial do PP para a obtenção da maior energia superficial;
- Verificar a influência da granulometria do PP com e sem tratamento utilizado como parte do agregado miúdo juntamente com a areia. A granulometria com melhor desempenho será empregada no concreto híbrido (com adição de CCA e PP);
- Determinar a condição ótima da moagem da CCA em diferentes tempos e caracterização destes resíduos para a verificação da melhor granulometria a ser substituída posteriormente no concreto híbrido;
- Produção do concreto híbrido para a avaliação dos teores ótimos de PP e CCA.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CONCRETO

O concreto e o aço são os materiais mais usados pela construção civil. O concreto é considerado um material bifásico, sendo constituído por duas fases [16]:

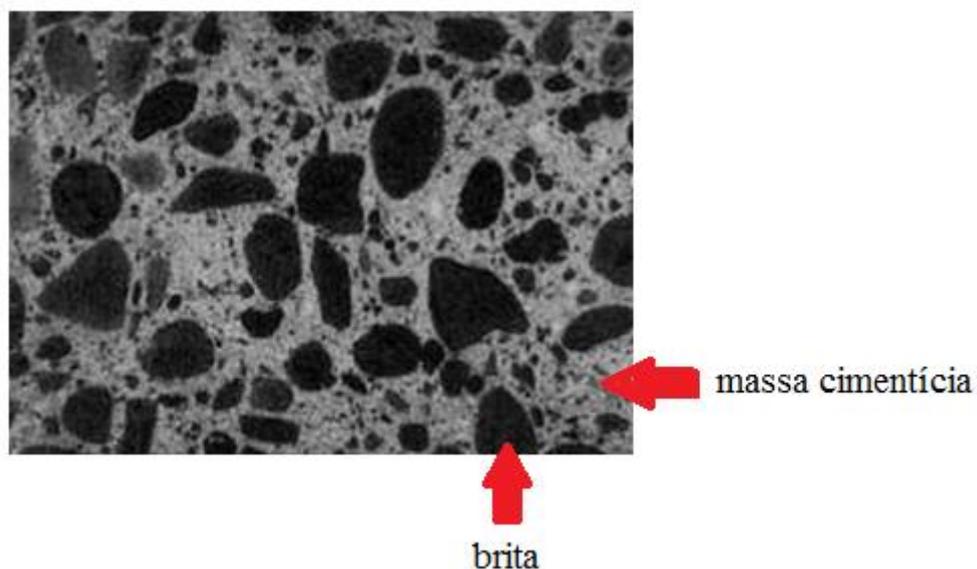
1° Fase: apresenta uma matriz constituída por uma fase elástica de elevada rigidez e partículas menos rígidas.

2° Fase: material de menor rigidez constituída por partículas de menor módulo de elasticidade. Atualmente a produção do concreto bem como a escolha dos materiais constituintes estão fortemente ligados ao estudo da microestrutura.

A análise da microestrutura permite caracterizar cada material que constitui o concreto e verificar a interação entre si. Assim é possível verificar o mecanismo responsável pela resistência, durabilidade e estabilidade dimensional do concreto.

As características do concreto são influenciadas pelas suas fases e também pela interface destas. As propriedades mecânicas do concreto como o módulo de elasticidade, por exemplo, são influenciadas pelas propriedades individuais dos materiais constituintes [17]. A Figura 1 apresenta uma seção polida de um corpo de prova de concreto, onde é possível observar as diferentes fases do material.

Figura 1: Seção polida de um corpo de prova de concreto



O concreto é um material composto basicamente pelo emprego dos de agregados graúdos (britas), agregado miúdo (areia), cimento e água, sendo estes últimos responsáveis pela reação de hidratação do concreto. Estes materiais que o compõe influenciam nas características do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, a determinação da proporção de cada material (traço) visa a obtenção de um concreto que seja trabalhável, e que tenha resistência conforme a exigência da aplicação, e que seja durável, isto é, mantenha as suas propriedades ao longo da vida útil [18].

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos parâmetros de dosagem em função da trabalhabilidade, resistência e custo do concreto.

Tabela 1: Parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, resistência e custos.

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto Fresco	Concreto Endurecido	Para redução do custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado miúdo	De preferência fina	De preferência grossa	Grossa
Relação graúdo/ miúdo	A diminuir	A aumentar	A maior possível
Consumo de Água	A aumentar até certo ponto	A diminuir	A aumentar
Granulometria total	Preferível contínua	Preferível descontínua	A disponível
Dimensão máxima característica do agregado	De preferência média	De preferência pequena	A maior possível
Geometria do grão de agregado graúdo	De preferência esférica (pedregulho)	De preferência irregular (brita)	Esférica (pedregulho)

Fonte: Helene et al., 1995 [19]

### 3.2 CONCRETO AMBIENTALMENTE MAIS SUSTENTÁVEL

A preocupação com o meio ambiente e a carência de recursos naturais têm aumentado a procura de opções sustentáveis e um aumento por parte de todos os segmentos da sociedade. Assim, nenhuma sociedade poderá alcançar a sustentabilidade sem que o setor da construção civil passe por mudanças, já que a sua cadeia produtiva exibe enormes impactos ambientais em todos os

passos de produção: consumo de matéria-prima, fabricação de materiais, construção, uso e demolição.

Com estas problemáticas é necessário o encontro de alternativas visando a redução do consumo de cimento e a areia, dois materiais que ao serem produzidos e extraídos, respectivamente, geram problemas ambientais.

Diversas pesquisas vêm empregando o uso da CCA como substituto parcial do cimento, devido suas características pozolânicas. Ganesan et al. (2005) mostraram que a incorporação de CCA no concreto aumenta a resistência à compressão quando comparada ao concreto convencional. O uso de CCA no concreto favoreceu o aumento da durabilidade do concreto e conseqüentemente aumentando a resistência à corrosão da barra de aço embutida no concreto [20].

Para a redução do consumo de areia, a ideia de substituição parcial da areia por PP favorece na redução da extração desta matéria-prima e contribui com uma destinação adequada das embalagens de PP pós consumo. Ismail et al. (2008) concluíram que os valores de resistência à compressão e à flexão dos resíduos de concreto contendo PP tenderam a reduzir abaixo dos valores do concreto de referência, com o aumento do teor de resíduos de plástico [21].

Yang et al. (2015) estudaram a influência da incorporação de partículas plásticas de PP nas propriedades do concreto leve auto-compactável. Os autores observaram que a densidade e o módulo de elasticidade diminuíram com o aumento do nível de substituição de areia [22].

### 3.3 AREIA

A areia é um recurso natural e seu uso está ligado inteiramente ao método de crescimento urbano e associado à demanda populacional. A exploração de areia tem impacto diversificado no panorama socioeconômico das cidades, situação agravada pelo crescimento das cidades, que intensifica o monopólio desse recurso. A problemática, em analogia ao consumo desse minério, relaciona-se a impactos diversos, sendo estes ambientais, topográficos, químicos, físicos e biológicos, que, logo, provocam o desequilíbrio da flora e fauna das áreas afetadas [23].

No Brasil o consumo de recursos naturais e energia tem aumentado nos últimos anos. Estima-se que 40% dos recursos naturais seja consumido pela construção civil, sendo este setor o que mais

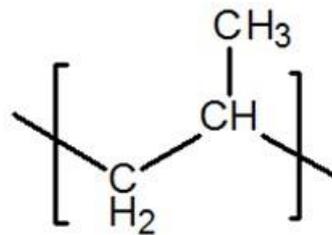
participa para alterar o meio ambiente. A previsão é que a demanda pela areia seja de no mínimo, o dobro dos níveis atuais até 2050 [24].

No Brasil, aproximadamente 1/3 dos recursos naturais é destinado à produção de materiais como o concreto e a argamassa. O uso de agregados é de aproximadamente 632 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a cerca de 3,31 toneladas por habitante. Em particular, os agregados miúdos que, em 2013, alcançaram um consumo de quase 377 milhões de toneladas. Salienta-se ainda que, no Brasil, 90% da areia consumida é extraída de leitos de rios [24].

### 3.4 POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno (PP) é um polímero da classe das poliolefinas, quimicamente inerte, razoavelmente estável termicamente, baixa massa específica e módulo de elasticidade similar ao da areia [25]. Possui uma característica apolar, o que o torna um polímero de baixa energia superficial (hidrofóbico). Tal fato resulta em uma pobre adesão a outros substratos, além de apresentar baixa dureza superficial [26]. A Figura 2 apresenta a fórmula estrutural do PP.

Figura 2: Estrutura química da unidade repetitiva do PP



#### 3.4.1 Tratamento superficial do PP

Como mencionado anteriormente, o PP, por ser apolar possui baixa adesão a outros substratos. Em virtude disso, se faz necessário realizar um tratamento superficial prévio no polipropileno para melhorar essa característica. Os tratamentos mais usados são plasma, onde o polímero é submetido à radiação UV ou elementos de plasma. As amostras tratadas por UV apresentam mudança química em sua superfície sem alteração da rugosidade. Ocorre também uma provável reticulação das

macromoléculas da superfície fazendo com que o ângulo de contato aumente. Já as amostras tratadas por plasma apresentam variações topográficas e químicas [27].

O tratamento por descarga corona é utilizado também como método para modificar a composição da superfície dos filmes de PP, fazendo com que ocorra um aumento do ângulo de contato. Através da espectroscopia de infravermelho (FTIR/ATR) e microscopia de força atômica, é possível verificar a mudança da superfície tratada pela presença de C=O e OH, também apresentando uma mudança considerável na morfologia da amostra. O ângulo de contato da superfície das amostras diminuiu após o tratamento corona, confirmando a formação de grupos polares [28].

Em uma análise utilizando o tratamento por plasma a baixa temperatura e pressão atmosférica, e com descarga de barreira dielétrica, em fibras de polipropileno utilizadas no concreto, no qual se buscava a verificação da hidrofiliabilidade do polímero, foi constatada pelos autores uma melhora de 20% da molhabilidade do polímero comparado com os tratamentos químicos convencionais tais como agente tensoativo. Para essa análise foi usado o método Washburn, que consiste na medida da taxa de penetração de líquidos no meio poroso [29].

Segundo alguns pesquisadores, adições de PP grafitizado com anidrido maléico em diferentes teores não interfere na densidade do PP, porém exerceu um grande aumento da energia de superfície do polímero, introduzindo sítios polares no PP e, conseqüentemente, aumentando sua polaridade [30].

Guttman et al. (1992) avaliaram o efeito do tratamento superficial da fibra de PP com o uso do tensoativo Triton X -100, com concentração de 0,1% por 10 s, e seco à temperatura ambiente. Este tratamento foi aplicado para melhorar a hidrofiliabilidade do polímero, onde constatou uma melhora da compatibilidade da fibra com a matriz cimentícia, indicando a eficiência deste tratamento [31].

Correa et al. (2019) avaliou o efeito do tratamento superficial do PP pós-consumo (como substituição parcial da areia em 10% em volume) com dois diferentes tenso ativos: TS1 (não iônico) e TS2 (detergente comum). Os flocos de PP com e sem tratamento foram caracterizados por teste de ângulo de contato e os corpos de prova de concreto foram caracterizadas por testes mecânicos e de durabilidade. Os resultados da análise do ângulo de contato mostraram que o PP com TS2 apresentou maior molhabilidade com o aumento da concentração do TS2 e do tempo de imersão da amostra (0,2% e 20 s). Os corpos de prova com adição de PP tratado apresentaram um aumento de 16% na resistência à compressão e de 8,9% na rigidez e uma diminuição de 24% no

índice de vazios e de 44,9% na absorção de água, quando comparadas aos corpos de prova não tratados. Os resultados mostraram que o tratamento com o tenso ativo TS2 contribuiu para a melhoria das propriedades analisadas [32].

#### 3.4.2 Polipropileno aplicado na construção civil

Alguns polímeros são utilizados na forma de fibras como reforço para aplicação no concreto que é um material utilizado no setor da construção civil devido suas características, como por exemplo: baixa massa específica que varia de  $0,92 \text{ g/cm}^3$  à  $1,4 \text{ g/cm}^3$ ; sua dureza e sua condutividade térmica inferior à dos metais, aliado a uma baixa absorção de água inferior a 1% [33].

As vantagens da aplicação de polímeros na construção civil, em especial em adição ao concreto, são as seguintes: melhoria da resistência à corrosão e da plasticidade, redução da densidade final, melhoria das propriedades de isolamento térmico, baixo peso específico, aliadas a um custo relativamente baixo.

Dentre os polímeros aplicados na construção civil, o PP é um polímero comumente incorporado na forma de fibras ao concreto, melhorando sua capacidade de absorver energia pós-ruptura. É incorporado no concreto também com o objetivo de reduzir a retração plástica, que ocorre nas primeiras 12 horas, antes que o concreto tenha desenvolvido uma maior resistência [34]. Essas fibras de PP são muito utilizadas para a produção de pisos industriais, revestimentos de túneis, entre outras aplicações.

Mohammed Belmokaddem et al (2020) avaliaram a incorporação de diferentes agregados plásticos, dentre eles o PP em diferentes teores de substituições: 25, 50 e 75% em volume da areia pelo polímero.

Colin et al (2018) avaliaram a incorporação de diferentes polímeros: PVC e PP, os autores constataram uma maior redução do módulo de elasticidade do concreto contendo PP quando comparado ao PVC devido aos seus respectivos módulos de elasticidade ( $2,7\text{--}3 \text{ GPa}$  e  $1,3\text{--}1,8 \text{ GPa}$ , respectivamente). Essa tendência pode ser atribuída ao fato de que os agregados plásticos, diferentemente dos agregados naturais, têm uma superfície lisa e são menos resistentes, enfraquecendo assim a coesão das forças na interface entre a matriz cimentícia e os agregados [163].

Correa et al. (2020) realizaram um comparativo da viabilidade do uso de polipropileno (PP) e tereftalato de polietileno (PET) como substituto parcial da areia no concreto (10% em volume). O

efeito da adição desses polímeros foi investigado aos 28 e 90 dias em termos de propriedades físicas, mecânicas, de durabilidade e químicas do concreto. A incorporação de PET e PP reduziu a resistência à compressão em 20%, enquanto a redução do módulo de elasticidade foi de 16% para os corpos de prova com PET e quase insignificante para os corpos de prova com PP. Os resultados de durabilidade mostram que os polímeros contribuíram para aumentar a resistência dos corpos de prova à penetração de cloretos em 15% e 57%, para corpos de prova de PET e PP, respectivamente; no entanto, houve um aumento no conteúdo vazio e absorção de água. No teste morfológico é possível observar uma menor adesão interfacial entre o PP e a pasta cimentícia em comparação ao PET, provavelmente devido à característica hidrofóbica do PP [39].

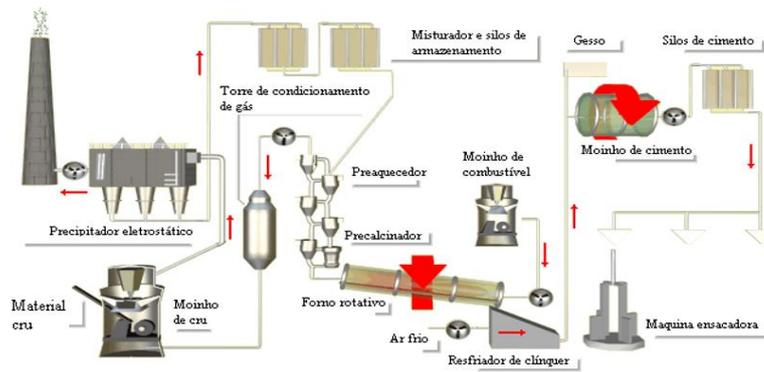
Ainda existem poucas pesquisas que utilizam a adição de PP em flocos, e a grande maioria das pesquisas que são encontradas utilizam PP em fibras [36,37,38]. Lima (2005) avaliou a influência da adição de fibras de PP ao concreto para o controle do deslocamento explosivo. O autor verificou que a adição das fibras na microestrutura compacta é uma solução para controlar o deslocamento que ocorre durante o aquecimento do concreto, assim favorecendo para a estabilidade da edificação [35].

### 3.5 CIMENTO PORTLAND

#### 3.5.1 Processos de fabricação do cimento Portland

O cimento Portland é um material fabricado através da moagem e misturas de clínquer e gesso, como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma da fabricação do cimento Portland



Fonte: Unochapecó, 2014 [40]

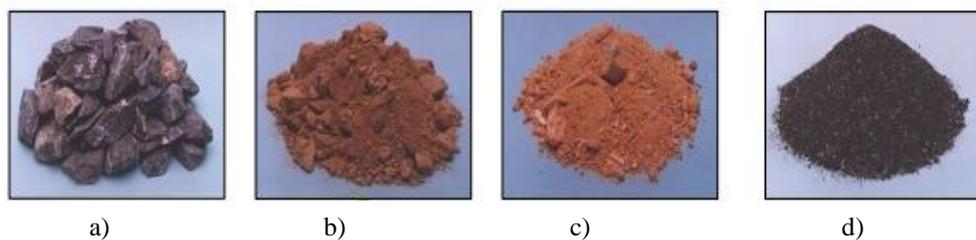
A fabricação do cimento envolve as seguintes etapas:

- 1) Dosagem, secagem e homogeneização das matérias-primas;

O clínquer apresenta um teor de calcário na faixa de 85-95%, sendo a principal matéria-prima para a fabricação do mesmo. Para a obter um clínquer de qualidade são adicionados ao calcário: argila, quartzito e minério de ferro. Estes materiais são moídos em um moinho vertical de rolos, onde ocorre a homogeneização e a secagem do material [41].

Cabe salientar que o cimento Portland consiste em quatro componentes do clínquer:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  (Alita) e  $C_4AF$  (Belita) que são moídos em conjunto com o gesso. Os teores de cada um destes compostos variam conforme o tipo de cimento (Figura 4).

Figura 4: Matéria- prima para a fabricação do clínquer a) calcário b) argila c) quartzito d) minério de ferro



Fonte: Unochapecó, 2017 [40]

- 2) Clinquerização

O material homogeneizado anteriormente é calcinado a 1450°C em forno rotativo, para a obtenção do clínquer.

### 3) Adições finais e moagem

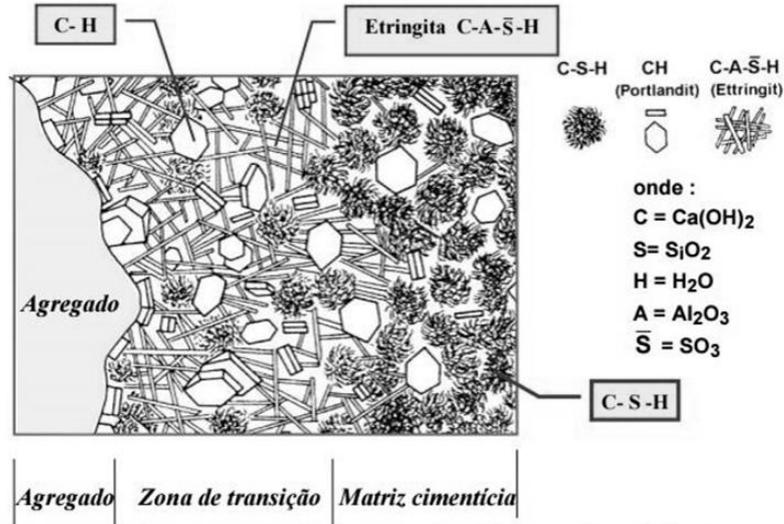
Para obter o cimento Portland, o clínquer é moído com diferentes adições: gesso, calcário, pozolana e escória. Esse processo de moagem é extremamente importante, pois influencia nas características como: hidratação e resistência inicial e final do cimento (UnoChapecó, 2010).

#### 3.5.2 Hidratação do cimento Portland

Durante a hidratação do cimento, composições químicas do cimento Portland reagem com a água, originando os produtos de hidratação, que formam compostos como C-S-H (silicatos de cálcio hidratado), CH (hidróxido de cálcio) e C-A-S-H (aluminosulfato de hidróxido de cálcio hidratado), que são responsáveis pela resistência do concreto. Nas reações de hidratação, o teor de silicatos de cálcio determina o tempo de pega, influenciando na velocidade de endurecimento da pasta [42].

Como dito anteriormente, a resistência mecânica da pasta decorre da hidratação do cimento. Os silicatos tricálcio ( $C_3S$ ) e o bicálcio ( $C_2S$ ) são silicatos que constituem aproximadamente 75% da composição do cimento Portland [42]. Esta reação de hidratação resulta na formação do hidróxido de cálcio que cristaliza após saturação da água da mistura e ocorre o início da formação dos silicatos de cálcio hidratados, que liberam calor. Após a completa reação pode-se obter a composição aproximada de  $C_3S_2H_2$  [43]. Na Figura 5 está apresentada uma microestrutura da zona de transição entre o agregado e a pasta, onde se podem observar as formações dos cristais que compõem a matriz cimentícia.

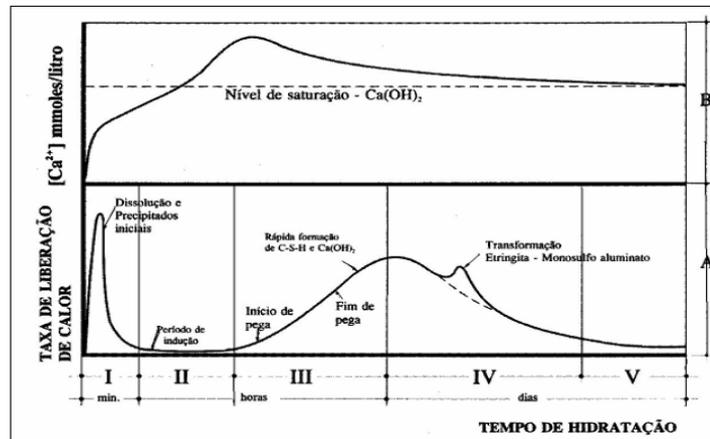
Figura 5: Microestrutura da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento



Fonte: Mehta e Monteiro, 2014 (Mehta, et al., 2014) [42]

O mecanismo de hidratação em função da liberação de calor ocorre em cinco etapas como apresentado na Figura 6: (I) dissolução e precipitados iniciais, (II) indução, (III) período de desaceleração, (IV) estágio final e (V) período de reação lenta.

Figura 6: Representação da liberação de calor em função do tempo



Fonte: Quarcioni, 2008 [43]

A velocidade de hidratação dos hidratos depende da composição cristalina do material de partida e da estrutura dos produtos formados durante a precipitação. A estrutura dos produtos é influenciada pela água disponível na mistura, pelo tempo de reação, temperatura e pelas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al(OH)}$  [44].

### 3.5.3 Principais tipos de cimento Portland

No Brasil existem cinco tipos de cimento Portland mais utilizados: comum, composto, de alto-forno, pozolânico e o de alta resistência inicial. As diferenças entre eles ocorrem principalmente em função de sua composição.

Cimento Portland Comum (CP I): material que não possui adições e é normalmente usado como referência para a comparação com as características e propriedades de outros tipos de cimentos [45].

Cimento Portland Composto: é um tipo de cimento onde pode ser adicionado material pozolânico, escória granulada de alto forno e fíller calcário. Este cimento possui uma melhor resistência ao ataque dos sulfatos [46].

Cimento Portland de Alto Forno: possui adição de escória de alto forno granulada ou moída. Essa adição aumenta a permeabilidade, o calor de hidratação e a retração por secagem do concreto. Em contrapartida, ocorre um aumento da resistência aos sulfatos e da resistência mecânica à compressão, entre outras melhorias [47].

Cimento Portland Pozolânico: apresenta adições de materiais pozolânicos, que podem ser as pozolanas naturais, artificiais, argilas calcinadas, cinzas volantes, entre outros tipos de materiais. A adição de materiais pozolânicos confere ao concreto maior resistência a meios agressivos, além de diminuir o calor de hidratação, a permeabilidade, a segregação de agregados e proporcionar maior trabalhabilidade ao concreto no estado fresco [46].

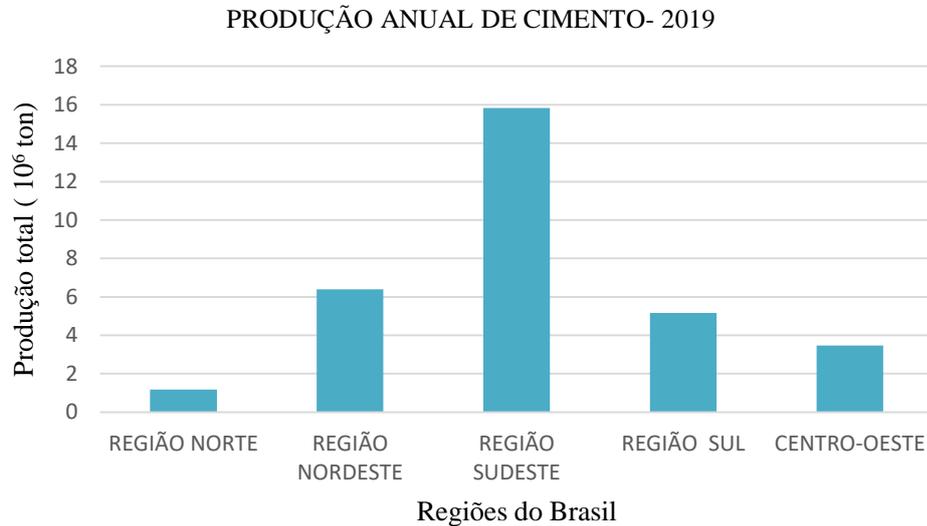
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial: apresenta valores de resistências elevados logo nos primeiros dias de idade. Essa propriedade é consequência da utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento (ABCP, 2015) [46].

### 3.5.4 Produção nacional do cimento Portland

O cimento tem grande importância para a sociedade, pois as obras e construções, especialmente nos maiores centros urbanos, fazem amplo uso deste material que se adapta a qualquer geometria, podendo ser utilizado em qualquer elemento estrutural. O consumo de cimento Portland cresceu consideravelmente nas últimas décadas, entretanto percebe-se um maior consumo na região

sudeste (Figura 7), que é a região com grande crescimento populacional e, conseqüentemente, onde há uma demanda maior por obras da construção civil. [48].

Figura 7: Produção nacional de cimento Portland



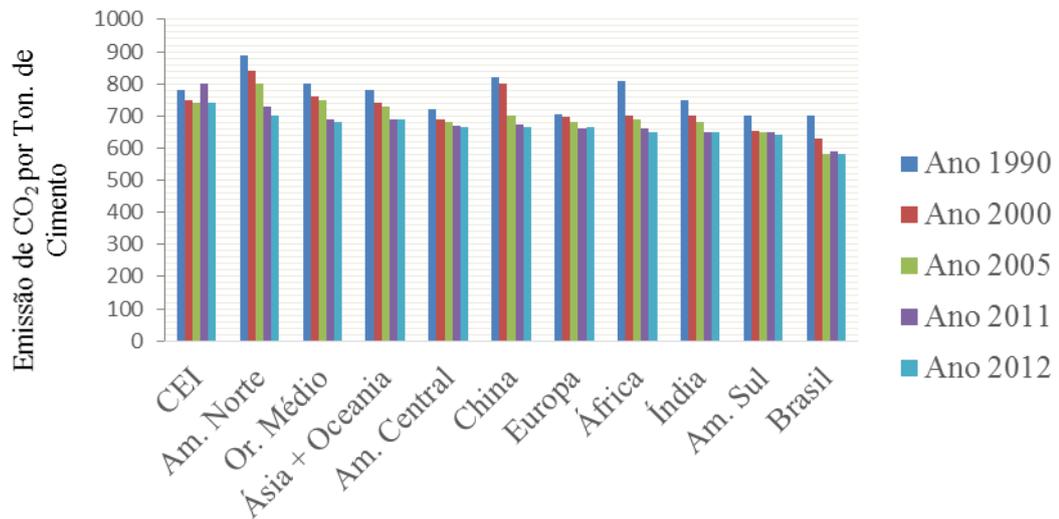
### 3.5.5 Impacto ambiental causado pela produção do cimento

Esse processo de fabricação do cimento promove liberação de gases poluentes na atmosfera, como por exemplo: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), material particulado (pó) e alguns metais pesados [49]. A liberação de CO<sub>2</sub> ocorre devido ao processo de descarbonatação das matérias-primas calcárias, conforme demonstrado na equação 1 (Soares, 1998) [50].



Estas emissões de gases afetam o meio ambiente e, conseqüentemente, a qualidade de vida da população, alterando o clima, fazendo com que ocorra o aumento da temperatura do ambiente, facilitando o aparecimento de tempestades, inundações, secas, além de reduzir a qualidade do ar, entre outros problemas climáticos [51]. Segundo dados do SNIC de 2015, a emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida é apresentada na Figura 8 para diferentes regiões do mundo. Comparativamente, o Brasil apresenta uma das menores taxas de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Figura 8: Emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento para diferentes regiões do mundo



Fonte: SNIC, 2015 [8]

O Brasil tem se destacado como o mais eficiente no controle das emissões de gases de efeito estufa durante a produção do cimento, devido à utilização de combustíveis alternativos (biomassa e resíduos) e pesquisas onde são utilizadas adições de materiais pozolânicos como: cinzas de casca de arroz, escória de alto forno, cinzas volantes, em substituição parcial do cimento para a produção do concreto, visando à redução da emissão de gases [8].

### 3.6 CINZAS DE CASCA DE ARROZ (CCA) COMO ADIÇÃO MINERAL

A cinza de casca de arroz é um resíduo agro industrial, resultado da queima da casca de arroz, sendo um produto facilmente encontrado em locais onde se produz esse cereal. A produção de arroz no Rio Grande do Sul (RS) é a maior do Brasil. Segundo dados do IBGE (2019), no ano de 2015, o RS alcançou 69% da produção nacional do grão. Na Figura 9 é observado o valor que prevê o total da produção brasileira de arroz que deverá alcançar ao menos 301,8 milhões de toneladas na safra 2027/28, quase 30% mais que no ciclo 2017/18 (232,6 milhões de toneladas [52]).

Figura 9: Produção nacional de arroz em diferentes anos

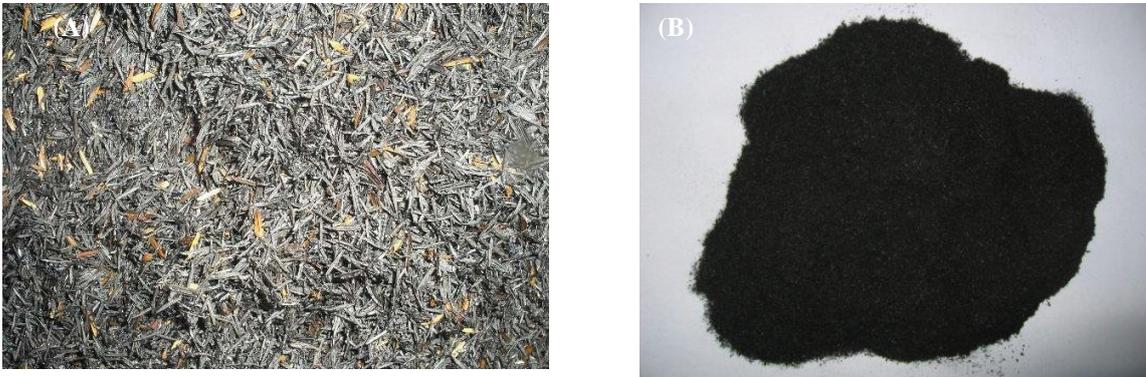


Fonte: IBGE, 2019 [52]

A casca do arroz, subproduto dessa produção, está sendo majoritariamente utilizada para fonte de energia dos parques industriais de diferentes ramos (agroindustrial, frigoríficos entre outros) devido ao seu elevado poder calorífico ( $\approx 3000$  kcal/kg). Mesmo utilizada como fonte de energia, aproximadamente 20% das cinzas produzidas são consideradas resíduos, sem uma destinação adequada, sendo descartadas em aterros, poluindo encostas de mananciais, ar e solo. Além disso, trata-se de um uso pouco nobre para o material, que possui potencial para outras finalidades, conforme descrito na sequência [53].

A cinza de casca de arroz (CCA) é um material que quando incorporado ao concreto reduz custos da utilização do cimento e as emissões de poluentes que a produção desse material gera na atmosfera. Conforme apresentado anteriormente, é relevante que se utilize esta cinza de casca de arroz, que ocorre em abundância aqui no RS, após o devido beneficiamento, de forma a contribuir com a melhoria das propriedades de concretos, bem como com a redução do descarte inadequado de toneladas do resíduo no meio ambiente. Para que seja utilizada na construção civil, a CCA deve atender a exigências físicas e químicas de acordo com normativas como, por exemplo: ser resistente, durável e trabalhável, atingindo características satisfatórias, quando comparada à matéria-prima já existente. Essas são características necessárias para se obter materiais de boa qualidade e duráveis [8,54]. Na Figura 10 é apresentada a casca de arroz e a cinza da casca após a queima sem controle de temperatura.

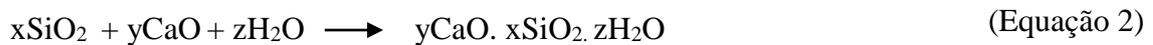
Figura 10: (A) Casca de arroz (B) Cinzas de cascas de arroz



### 3.6.1 Características da CCA

As CCA normalmente possuem um alto teor de sílica (entre 90 e 95%) e, por este motivo, vêm sendo empregadas no setor da construção civil como pozolana, de forma a agregar valor ao cimento. A CCA também pode ser utilizada na fabricação de tijolos e na indústria de cerâmicos e refratários [55,56].

A pozolanicidade da CCA depende do seu tipo de processamento, formando produto sílico-aluminoso, que no estado amorfo, se solubiliza em meio alcalino e reage em solução com íons  $\text{Ca}^{2+}$ , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados, conforme representado na equação 2 [54]:



A cinza pode conter um alto teor de sílica (> 92%), tornando-se uma matéria-prima valorizada para aplicações na construção civil. Esse teor de sílica é dependente da temperatura de processamento e do tipo de processamento, como mencionado anteriormente [57]. A CCA pode ser classificada de duas maneiras de acordo com sua reatividade:

- Altamente reativa: a queima ocorre por controle de temperatura e é constituída de sílica pura não cristalina e em estrutura celular;
- Pouco reativa: a queima ocorre sem controle e é constituída de silicatos cristalinos, sendo necessária a moagem para desenvolver algum grau de atividade pozolânica.

A caracterização das cinzas ocorre a partir de vários parâmetros, como a composição química e as características físicas.

### 3.6.1.1 Composição química

A estrutura da CCA é influenciada pela temperatura dos incineradores. Inicialmente, a casca de arroz contém cerca de 50% de celulose, 25-30% de lignina e 15-20% de sílica. Após a queima, a celulose e a lignina são removidas, deixando para trás a cinza de sílica. Com base na faixa de temperatura e duração da queima da casca são obtidas formas cristalinas e amorfas de sílica [58].

As formas cristalinas e amorfas de sílica têm propriedades diferentes e é importante produzir cinzas com especificações corretas para uso final específico. Quando a sílica possui uma estrutura altamente cristalina resulta em um material com baixa reatividade enquanto que na forma amorfa a reatividade é maior, portanto, é necessário garantir que a sílica esteja na forma amorfa, normalmente obtida através do processo de incineração controlada [59].

A CCA após a queima é composta basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em teores que variam de 74% a 97% em sua composição, e este fato independe do processo de queima a qual foi submetida [60]. Também pode ser observado na CCA a presença de dióxido de silício, ou sílica, e demais compostos químicos que são os óxidos:  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$ , presentes em pequenos teores como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da CCA de acordo com diferentes autores

Pesquisas	Composição típica em óxidos (% em peso)									
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$
Cook et al.,1977	93,00	0,60	0,15	Nd	0,42	0,43	0,04	1,05	Nd	Nd
Sallas et al.,1986	91,26	0,94	0,37	Nd	0,88	2,15	Nd	Nd	Nd	Nd
Cincotto et al., 1988	94,70	0,09	1,46	Nd	0,95	0,99	0,04	1,75	Nd	Nd
Guedert et al., 1989	93,11	0,92	0,40	Nd	0,85	0,52	0,12	1,12	Nd	Nd
Farias et al., 1990	91,78	0,60	0,34	Nd	0,52	0,50	0,11	1,30	Nd	Nd
Sugita et al., 1992	90,00	0,10	0,40	Nd	0,30	0,40	0,06	2,41	Nd	Nd
Isaia et al., 1995	78,60	2,30	2,30	Nd	0,80	1,00	0,01	0,56	Nd	Nd
Fonseca et al.,1999	83,68	0,17	0,17	0,66	Nd	1,03	Nd	3,65	Nd	1,34
Della et al.,2001	72,10	0,15	0,15	0,15	0,70	0,43	0,50	0,72	0,05	0,60
Qingge et al.,2005	92,40	0,40	0,40	0,40	0,30	0,70	0,07	2,54	Nd	0,11

Nd – não divulgado

A sílica ativa age em concretos e argamassas de duas formas distintas. Uma delas é na reação pozolânica, durante a reação do hidróxido de cálcio para formar os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que acabam por favorecer a resistência da pasta do cimento. Também pode agir com o “efeito filler”, pois devido às dimensões de suas partículas, ocorre o preenchimento dos vazios da estrutura, contribuindo para melhoria da coesão e compacidade do concreto fresco, também refinando a estrutura de poros do material, agindo como ponto de nucleação dos compostos de hidratação do cimento [61].

### 3.6.1.2 Características Físicas

As características físicas determinadas para a CCA são: massa específica, área superficial, distribuição granulométrica e perda ao fogo, e podem ser determinadas conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Características físicas da CCA

<b>Norma</b>	<b>Ensaio</b>
NBR 16605 – (ABNT, 2017)	Determinação da massa específica
NBR 5752- (ABNT, 2014)	Índice de atividade pozolânica (%)
NBR NM 18- (ABNT, 2012)	Perda ao fogo
NBR 16372- (ABNT, 2015)	Área superficial
NBR 248- (ABNT, 2003)	Distribuição granulométrica

A área superficial da CCA influencia diretamente nas propriedades pozolânicas deste material devido à finura do material, distribuição, rugosidade superficial e pela distribuição dos poros, onde estas características afetam o grau de atividade pozolânica [8]. Com a redução do diâmetro médio de partícula da CCA, ocorre um aumento da atividade pozolânica, quanto menor é o tamanho de partícula, menores são as diferenças de reatividade entre as cinzas amorfa e cristalina [9].

### 3.6.2 Tratamento da CCA

Tratamentos térmicos e físicos podem ser realizados nas CCAs com a intenção de aumentar a reatividade, clarear a cor e incrementar a atividade pozolânica.

#### 3.6.2.1 Tratamento térmico da CAA

A temperatura de queima da cinza é um fator importante e está diretamente relacionada com o IAP (Índice de Atividade Pozolânica). A CCA produzida com queima controlada à temperatura  $\geq 600^{\circ}\text{C}$  apresenta sílica amorfa em sua morfologia o que promove uma maior reatividade com o cimento e com o CH. Contudo, quando a queima acontece em elevadas temperaturas, são observadas fases cristalinas, o que não é desejável, pois diminui a reatividade com os demais compostos, tornando a utilização das cinzas pouco viável [62, 63].

Na Tabela 4 é apresentado um resumo do que ocorre com a estrutura da CCA com o aumento de temperatura de queima [64].

Tabela 4: Efeito do aumento da temperatura na estrutura da CCA e sua área específica

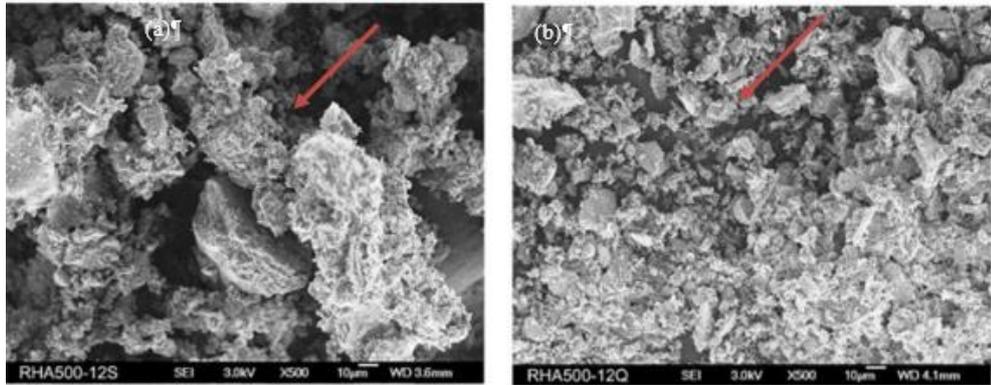
Temperatura (°C)	Estrutura da CCA	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)
Até 500	Forma esférica ou globular com estrutura porosa	0,5-2,1
500-600	Começo da transição do estado amorfo para o cristalino, com a presença de grãos porosos e menores que 1 $\mu\text{m}$	76-122
600-700	Partículas amorfas e o diâmetro dos poros maiores	100-150
700-800	Parcialmente cristalino, formação de cristais em forma de coral	6-10
800-900	Cristalino	<5
900-1000	Cristais em forma de coral com espessura menor	-

Fonte: Hwang et al., 1989 [64]

Cabe salientar que a qualidade da CCA é também influenciada pela estrutura porosa das partículas e da área específica da superfície. A taxa de resfriamento na qual os resíduos são submetidos

influencia no tamanho da partícula (Figura 11). Na Figura 11 (b) observa-se o resfriamento rápido, o tamanho de partícula aumenta consideravelmente quando comparado com o resfriamento lento da Figura 11 (a), onde observa-se através das setas o preenchimento da microestrutura devido ao aumento destas partículas.

Figura 11: Imagens de MEV para temperatura de queima a 500°C com diferentes taxas de resfriamento (a) amostra com resfriamento lento (b) resfriamento rápido



Fonte: Nai et al., 2008 [65]

### 3.6.2.2 Tratamento físico da CAA

Algumas propriedades físicas da CCA como o tamanho médio das partículas, área específica e a finura, podem afetar nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Pesquisas apontam que a área específica da CCA varia entre 2,05 m<sup>2</sup>/g a 2,53 m<sup>2</sup>/g, o que é relativamente menor que do cimento Portland, que varia de 3,10 m<sup>2</sup>/g a 3,14 m<sup>2</sup>/g. Isso implica em um maior volume de resíduo para um peso unitário de cimento [20, 66].

Para a eficácia da CCA como um material pozolânico, o resíduo deve ser moído até se obter uma elevada área superficial e este material deve ser finamente moído para contribuir para o desenvolvimento da atividade pozolânica [67,17]. Nestas pesquisas constatou-se que as maiores atividades pozolânicas foram alcançadas com uma área superficial de 0,7 m<sup>2</sup>/g, área superficial essa que não se encaixa na faixa citada anteriormente.

O tratamento físico realizado por diversos autores tem sido a moagem em moinho de bolas: via seca e úmida [18,24,68,69]. O tempo de moagem é uma variável importante a ser controlada, pois ela influencia no índice de atividade pozolânica (IAP). Além disso, diferentes tempos de moagem, quantidade de material inserido no moinho e o tamanho dos corpos moedores levam a diferentes áreas superficiais [70,71,63]. Não obstante, tempos muito altos tendem a reduzir o IAP. O tamanho

de partícula influencia na característica pozolânica, e para isso um tamanho médio de partícula de aproximadamente 8  $\mu\text{m}$  é recomendado [72]. A faixa de tamanhos que apresenta reações pozolânicas é de 5,6  $\mu\text{m}$  a 45  $\mu\text{m}$  [73,65]. A temperatura de queima da casca de arroz também influencia diretamente o tempo de moagem da CCA, pois com o aumento da temperatura ocorre o agrupamento das partículas, sendo necessário um tempo maior do processo[8].

### 3.6.3 Métodos para determinação da pozolanicidade

A pozolanicidade é medida através do ensaio chamado Índice de Atividade Pozolânica (IAP). Este ensaio serve para obter informações quanto ao teor ótimo de substituição do cimento por pozolanas [18]. Diferentes tipos de ensaios são aplicados para determinar o IAP.

Um destes ensaios é a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias preconizados pela NBR 5752 (ABNT, 2014). Neste procedimento são confeccionadas duas argamassas com traço 1:3 (cimento: areia). Na primeira argamassa é usado apenas cimento Portland e, na segunda, 35% do volume do cimento é substituído pelo material pozolânico. A cura inicial ocorre dentro dos moldes, em câmara úmida, com temperatura de  $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ . Após 24 horas, os corpos de prova são desmoldados e colocados em ambiente hermeticamente, e após 27 dias em câmara úmida realiza-se o ensaio de resistência à compressão axial. O IAP é a razão entre a resistência média dos corpos de prova (CPs) moldados com a substituição de pozolana pela resistência média dos corpos de prova moldados com cimento, sendo seu resultado apresentado em percentual. Limitação: os resultados podem ser influenciados pela composição do cimento usado e pela variação da relação água/materiais cimentantes [75].

Outro ensaio que é relevante é o da determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias que é realizado de acordo com a norma NBR 5751 (ABNT, 2015) [74]. Neste ensaio prepara-se uma argamassa de cal no traço 1:9 (hidróxido de cálcio: areia). Coloca-se, para a quantidade do material pozolânico a ser testado, o dobro do volume absoluto de hidróxido de cálcio. A água utilizada na mistura deve ser suficiente para atingir uma consistência de  $(225\pm 5)$  mm, pelo ensaio de *flow table*. São moldados três corpos de prova. A cura é realizada dentro dos moldes, durante sete dias. Nas primeiras 24 horas de cura, a temperatura deve ser de  $23\pm 2^\circ\text{C}$  e nos demais dias de  $55\pm 2^\circ\text{C}$ . Os CPs são desmoldados em 4 horas e 30 minutos antes do ensaio de resistência à compressão axial, para que sejam resfriados até a temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ . O IAP é obtido pela

média da resistência à compressão axial dos três corpos de prova, e seu resultado é expresso em MPa. Uma das limitações é a variação da qualidade da cal [75].

Existe o ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico que deve ser procedido de acordo com a NBR 5753 (ABNT, 2016). Esse ensaio também é conhecido como método de Fratini. O IAP é avaliado comparando a quantidade de óxido de cálcio (CaO) presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com quantidade de hidróxido de cálcio que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade. Em um cimento Portland pozolânico, a concentração de óxido de cálcio em solução é sempre inferior à concentração de saturação. Para o material ser considerado pozolânico, deve estar representado abaixo da curva de saturação [76].

O ensaio de determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado- Método Chapelle modificado de acordo com a NBR 15895 (ABNT, 2010) [77] consiste em colocar 2 g de CaO, 1 g do material supostamente pozolânico e 250 ml de água isenta de CO<sub>2</sub> dentro de um frasco e agitá-lo em banho-maria por aproximadamente 16 horas. A quantidade em mg de CaO reagida com 1g do material, corresponde ao valor de atividade pozolânica, sendo o consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> igual a 436 mg/g considerado o mínimo necessário para o material apresentar uma atividade pozolânica considerável para ser usada.

O método de Luxan consiste na avaliação do IAP através da variação da condutividade de uma solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub> antes e depois de 2 minutos da pozolana ser acrescentada e misturada de forma contínua na solução (5g de pozolana para 200 mL de solução). A classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade está representada na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade

Pozolanicidade do material	Condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanicidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanicidade	> 1,2

Fonte: Luxan, 1989 [78]

### 3.6.4 Influência da CCA nas propriedades do concreto

Na literatura é mostrada que a incorporação de CCA tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto, sendo algumas descritas na sequência. A adição de CCA, mesmo sem controle de queima (com faixas de temperatura e patamares de aquecimento definidos), pode favorecer um ganho de resistência à compressão axial de 40% quando comparada ao material referência [60]. A CCA propicia a formação de cristais e microestruturas entrelaçadas, envolvendo os poros do concreto e, conseqüentemente, reduzindo seu diâmetro. Isso pode ser observado através do MEV com EDS. Percebe-se que há um incremento na resistência à compressão axial até os 91 dias de cura quando as reações pozolânicas já apresentaram seu efeito [79].

A granulometria da CCA influencia no desempenho do concreto. Quanto menor a granulometria, maior a pozolanicidade da CCA e, por consequência, maior a resistência à compressão do concreto [63]. A utilização da CCA moída no concreto favorece para uma maior resistividade e condutividade elétrica, permeabilidade ao ar e água [7].

A CCA também é empregada para produzir o CAD (concreto de alto desempenho) reforçado com fibras. Para substituições de 10%, 20% e 30% do cimento pela CCA, quanto à avaliação das propriedades mecânicas, ocorreu um aumento da ductilidade do concreto e um acréscimo da resistência à propagação de fissuras [69]. E quanto à durabilidade do concreto, a adição deste resíduo favoreceu para que diminuísse a passagem dos cloretos e melhorou a resistência à abrasão do concreto [70]

Righi (2015) verificou a substituição de cimento por CCA residual (sem controle de queima) em diferentes teores: 10%, 20% e 30% em volume em diferentes tempos de moagem: 1,2,4,6 e 8h, em concretos do tipo *Engineered Cementitious Composites* (ECC). Foi realizada a análise do comportamento mecânico do concreto quanto à tração direta e flexão a quatro pontos, e para avaliar a durabilidade do concreto foram realizados ensaios de absorção de água e índice de vazios. Através da análise dos resultados a autora verificou que a substituição ideal é de 30% para um tempo de moagem de 4 e 8h [69].

Costa (2015) em sua pesquisa realizou a substituição parcial do cimento em concretos do tipo *Engineered Cementitious Composites* (ECC) pela CCA sem controle de queima em 30% (em volume) e 2% de fibra de PP (em volume). Foi avaliada a durabilidade do concreto quanto a: absorvibilidade, absorção e índice de vazios, absorção de água por capilaridade. Os resultados

obtidos pela autora constataram que a incorporação da CCA melhorou as propriedades do concreto quanto à conexão e solução dos poros [70].

Salienta-se que os trabalhos de Righi (2015) e Costa(2015) foram os primeiros realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturas (LEME) da UFRGS, a incorporar com sucesso a CCA sem controle de queima em suas misturas [69,70].

Pouey (2006) avaliou a incorporação de CCA (com controle de queima) após o beneficiamento, a partir de tratamento físicos, químicos e/ou térmicos. Para a caracterização do concreto foram realizados os seguintes ensaios: resistência à compressão, tempo de pega, pozolanicidade e expansibilidade à quente. As análises dos resultados indicaram que os tratamentos realizados no resíduo foram benéficos, tendo potencial para o emprego na produção de concreto. Para tanto, as cinzas devem ser beneficiadas, sendo pelo menos submetidas a tratamentos físicos para a redução da granulometria. Caso o aspecto visual seja de interesse, é necessária a realização do tratamento químico para a obtenção de uma CCA com coloração clara [63].

### 3.6.5 Microestrutura do concreto com CCA

O uso da CCA como substituto parcial ao cimento altera a microestrutura da pasta de cimento Portland devido à ação pozolânica e essas mudanças variam com o tempo. O aumento da hidratação do cimento com a adição de CCA ao longo do tempo se explica devido à estrutura porosa das partículas do resíduo, como pode ser observado na Tabela 6.

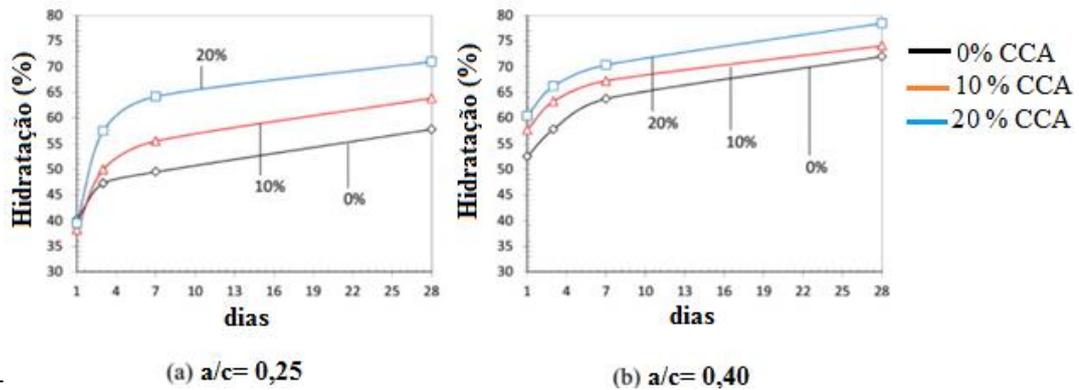
Tabela 6: Desenvolvimento microestrutural de pasta de cimento Portland com CCA

<b>Tempo</b>	<b>Desenvolvimento microestrutural</b>
Depois de 1 h	A superfície das partículas de CCA é coberta por produtos de hidratação
Após 1 dia	A maioria dos CH pode ter reagido com a CCA; Algumas placas hexagonais (cerca de 0,1 $\mu\text{m}$ ) crescem na superfície de partículas de CCA As agulhas de ettringita desaparecem e os cristais de CH diminuem devido à reação pozolânica
Após 3 dias	As fibras densas se ligam à matriz dentro de grandes poros
Após 7 dias	Os poros são preenchidos com o gel CSH
Após 28 dias	A matriz tornou-se mais densa e o cristal CH não decomposto obstrui a matriz
Após 60 dias	A matriz liga-se e a presença de CH

Fonte: Sivakumar et al., 2009 [86]

A porosidade da CCA absorve certa quantidade de água livre durante a mistura do concreto, diminuindo a taxa de hidratação do cimento no estágio inicial, assim disponibilizando uma menor quantidade de água para o cimento, principalmente para traços com baixa relação a/c. Para idades mais avançadas, a água absorvida é liberada do resíduo, compensando essa queda e promovendo a hidratação do cimento. Esse comportamento é observado na Figura 12

Figura 12: Hidratação do concreto com adição da CCA



Fonte: Cordeiro et al., 2009 [80]

O emprego da CCA com queima controlada em substituição parcial pelo cimento já foi comprovado através de resultados que indicam um aumento da resistência mecânica e da durabilidade do concreto [81,82].

O controle de queima e moagem da CCA são fatores que contribuíram para que o resíduo ganhasse menos importância no mercado, ao contrário de outras pozolanas como a cinza volante e sílica ativa, onde o método de desenvolvimento é mais fácil e menos oneroso. O elevado custo do controle de queima tem inviabilizado o uso desse resíduo como adição mineral, fazendo com que reduza a aplicação deste resíduo como substituto do cimento [9].

### 3.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O estudo de algumas propriedades do concreto no estado endurecido é de suma importância para o entendimento do comportamento do concreto e serão apresentadas neste capítulo.

### 3.7.1 Resistência à compressão axial

Um dos ensaios mais comumente utilizados é o de resistência à compressão axial de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2016) [83] por ser um ensaio de fácil execução e por permitir que outras propriedades possam ser deduzidas a partir desse dado. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) [84] preconiza equações de forma com que se possa obter o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a impermeabilidade através do  $f_{ck}$  (resistência característica do concreto à compressão).

A resistência à compressão axial do concreto é inversamente proporcional à porosidade do material, quanto maior é a relação a/c, maior é a porosidade do material, e conseqüentemente, menor a aderência entre a pasta e o agregado, com uma zona de transição (ZT) mais fraca [85].

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a ZT é local de interface entre o agregado graúdo e a pasta, que contém bastante água, fazendo com que seja o elo mais fraco do concreto. Notoriamente é uma região com muitos poros, salvo em concretos com alta resistência, onde a ZT é tão resistente quanto a pasta. Em concretos convencionais, este é o local por onde as fissuras se propagam [42].

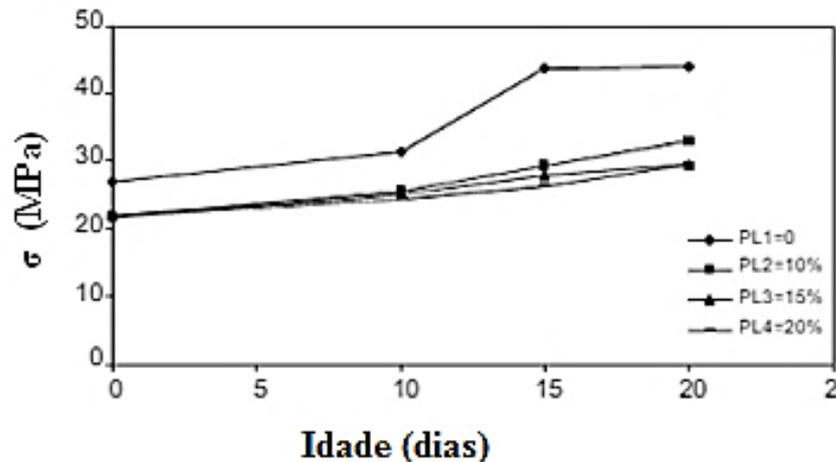
A dependência da relação a/c e a resistência à compressão do concreto varia conforme o tipo de cimento e o tempo e tipo de cura. O tipo de cimento é um fator importante, pois o uso de cimento com adições pozolânicas pode retardar a estabilização da resistência, em função das reações secundárias de hidratação, que são mais lentas [16].

Como já mencionado anteriormente, a incorporação de resíduos afeta o resultado final de resistência à compressão. Pesquisas que utilizaram relações a/c igual a 0,30 e a/c igual a 0,32, com 20% de substituição de cimento por CCA, obtiveram um aumento da resistência quando comparado ao concreto de referência, em diferentes idades como 7 dias, 28 dias e 90 dias [66,86].

Em idades avançadas (acima de 90 dias), a resistência do concreto com CCA é consideravelmente maior do que o concreto de referência, devido às reações pozolânicas serem mais lentas [59].

Na substituição da areia por materiais poliméricos, ocorre uma redução da resistência à compressão axial com o aumento do teor do resíduo plástico, como pode se observar na Figura 13. Essa redução ocorre devido à baixa adesão do polímero com a massa cimentícia, bem como o tamanho das partículas do resíduo. A característica hidrofóbica do polímero restringe a água necessária para as reações de hidratação do cimento, reduzindo a resistência do concreto.

Figura 13: Resistência à compressão axial de concretos com incorporação de resíduos poliméricos.



Fonte: Ismail et al., 2008 (Ismail, et al., 2008) [21]

Na literatura existem poucos trabalhos que utilizam partículas de PP para a produção de concreto, este material é utilizado em grande escala em forma de fibras e são utilizados como reforço secundário no concreto, controlando a abertura e propagação de trincas.

O concreto reforçado com fibras de polipropileno é empregado para a produção de túneis [87], laje [88] entre outras aplicações. A procura por este material é devido ao bom desempenho relacionado às suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão.

Srikar et al.(2016) avaliaram através do ensaio de compressão axial a influência da incorporação das fibras de PP, onde foi observado uma maior resistência para o traço com maior dosagem de fibra ( $6 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) quando comparado com o traço de referência [89]. Outros autores constataram que o teor ideal de fibra fica em torno de  $4\text{-}5 \text{ kg}/\text{m}^3$ [90].

Diversas pesquisas vem sendo realizadas para encontrar solução para os resíduos plásticos como substitutos parciais dos agregados usados na produção do concreto. Mohammed et al. (2020) estudaram a incorporação de resíduos de: PP, PEAD e PVC, em diferentes teores (25, 50 e 75%). Os resultados mostram uma redução da resistência com o aumento do teor, aos 28 dias, a resistência à compressão variou entre 12 e 26,9 MPa, 5,2 e 25,4 MPa, 4 e 19,5 MPa para os corpos de prova contendo PVC, PP e PEAD, respectivamente. A redução maior foi observado para o teor de 75% de PEAD. Os resultados obtidos indicam que a redução mais significativa da resistência à compressão para o PEAD ocorre devido a menor resistência à compressão ao maior volume de poros [91].

### 3.7.2 Resistência à tração do concreto

No dimensionamento de estruturas, não somente deve-se utilizar a resistência à compressão, mas também é necessária a consideração da resistência à tração do concreto. Na verificação das bielas comprimidas de vigas submetidas a esforços de cisalhamento, por exemplo, utiliza-se esta resistência calculada indiretamente a partir do Feature Compression Know. A NBR 6118 (ABNT, 2014) [84] preconiza fórmulas para se obter os resultados de tração para concretos convencionais ou de elevada resistência. Assim, deve-se buscar o entendimento de concretos com adição de CCA e PP já que os mesmos não são considerados na referida norma.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a quantidade de energia necessária para a ruptura à tração do concreto é bem menor que a energia requerida para a ruptura à compressão [42]. A relação entre a resistência tração e a resistência à compressão é em torno de 0,07 a 0,11, sendo que quanto maior a resistência à compressão maior será a discrepância entre as resistências.

A resistência à tração direta é um parâmetro no qual se tem dificuldade de medir diretamente, portanto, existem ensaios indiretos como a compressão diametral, preconizada pela NBR 7222 (ABNT, 2011) [92], e tração na flexão, preconizada pela NBR 12142 (ABNT, 2010) [93], com os quais se podem estimar os resultados de resistência à tração do concreto.

Isaia et al. (2010) estudaram a incorporação da CCA sem controle de temperatura e sem moagem, em substituição parcial do cimento pelo resíduo em diferentes teores: 15% e 25% em massa. A análise dos resultados apresentou a viabilidade da substituição de 15% de cimento por CCA sem perda significativa de resistência à tração aos 28 dias, com recuperação total a 91 dias [7].

Pereira et al. (2015) avaliaram composição do concreto com CCA em dosagens de 5% e 10% (em massa), em substituição ao cimento. A CCA foi produzida por meio da queima não controlada da casca do arroz. O processo de cura térmica a vapor dos corpos de prova foram realizadas em ciclos de 6 horas, a uma temperatura constante de 80°C. Os autores constataram que não houve um ganho de resistência significativo para esta propriedade independentemente da idade e do teor de substituição [62].

### 3.7.3 Módulo de elasticidade

Esta propriedade é uma medida da rigidez do concreto em relação sua deformação elástica. Assim, quanto maior é o módulo de elasticidade de um material, maior é sua rigidez. No caso do concreto,

em até 30% de sua resistência à compressão, seu comportamento tende a ser linear. Após, as microfissuras se unem e inicia-se uma queda no seu módulo de elasticidade. A adição da CCA pode aumentar em 25% o módulo de elasticidade, devido ao fato que a finura das CCA preenche os poros, resultando uma melhor zona de transição entre os agregados e a matriz cimentícia [94].

Pereira et al. (2015) investigaram o módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto, os valores obtidos para os traços ficaram na faixa de 40 e 41 GPa, independentemente do tempo de cura e teor de substituição [62]. Resultados corroborado por Silva et al. (2009) observaram que o módulo de elasticidade de concretos com adições minerais não sofreram aumentos significativos quando comparados com os aumentos observados para a resistência à compressão [54].

Mohammed et al. (2020) constataram uma redução no módulo de elasticidade à medida que ocorre o aumento do teor dos agregados poliméricos [91]. Isso é atribuído principalmente ao fato de que os polímeros estudado pelos autores: PP, PVC e PEAD, principalmente este último, apresentaram um menor módulo de elasticidade e também é resultado da baixa adesão entre a matriz cimentícia e o polímero, como consequência da diferença entre o módulo de elasticidade das partículas de polímero e o da massa cimentícia [95, 96].

### 3.8 DURABILIDADE

Os concretos devem ser duráveis frente às solicitações impostas durante sua vida útil. A durabilidade do concreto depende tanto de fatores externos, como sais, maresia, chuvas e umidade, quanto de seus materiais empregados, como o tipo de cimento, a relação a/c, as adições, os aditivos entre outros fatores. Este conceito de durabilidade está associado ao mecanismo de transporte ou da facilidade da penetração de diferentes agentes agressivos por meio de capilares, difusibilidade, migração iônica e permeabilidade [97].

Para garantir a durabilidade de um projeto estrutural, normas como a NBR 6118 (ABNT, 2014) [84], NBR 12655 (ABNT, 2015) [98] e a NBR 14931 (ABNT, 2004) [99] asseguram especificações, como a máxima relação a/c, a resistência à compressão mínima de acordo como o grau de agressividade e o consumo mínimo de cimento.

Os fatores químicos que influenciam na durabilidade do concreto são a lixiviação da pasta de cimento, as reações expansivas devido ao ataque de sulfatos e reações álcali-agregado [85].

A porosidade é um fator de risco para a durabilidade da estrutura. A absorção capilar depende da comunicação entre os poros. Essa comunicação dos vazios de água ou de ar torna o concreto permeável, favorecendo a passagem de agentes agressivos [100].

### 3.8.1 Propriedades de absorção de água

A absorção de água é diretamente proporcional ao total dos poros permeáveis na estrutura de concreto, já o índice de vazios, permite a passagem de água, assim podendo-se prever a durabilidade do material.

A presença de CCA no concreto leva a uma menor absorção de água e absorvidade, o que são características importantes para a durabilidade do concreto [101]. A presença da CCA reduz o diâmetro dos poros internos, e esses resíduos se dispersam na matriz cimentícia preenchendo os vazios. O tamanho de partícula influencia nessa característica. A inserção de uma partícula com tamanho médio de 5  $\mu\text{m}$  faz com que o concreto tenha uma redução na absorção de 20% de água quando comparado com o concreto convencional [54].

Na Tabela 7 está apresentada uma proposta com base em critérios gerais de durabilidade de uma classificação para concretos em função da porosidade e da absorção de água [102].

Tabela 7: Classificação do concreto de acordo com a porosidade e absorção de água.

Propriedade	Qualidade do concreto	<10%	10 a 15%	>15%
Porosidade	Concretos duráveis	X		
	Concretos normais		X	
	Concretos deficientes			X
		<4,2%	10 a 15%	>15%
Absorção de água	Concretos duráveis	X		
	Concretos normais		X	
	Concretos deficientes			X

Fonte: HELENE, 1983 [102].

A incorporação da CCA no concreto é frequentemente relatada por diversos autores como benéfica para a durabilidade do material com melhorias semelhantes às aqueles observados para pozolanas convencionais [103, 104].

A incorporação deste resíduo reduz a permeabilidade e porosidade do material, atuando como um material de enchimento, reduzindo a porosidade e permeabilidade [67]. Essa diminuição ocorre devido a formação do gel de hidrato de silicato de cálcio formado através da hidratação do cimento e da reação pozolânica secundária da CCA e do hidróxido de cálcio [105].

Sensale et al. (2006) constataram que o uso da CCA com queima controlada pode reduzir de 50 a 95% no coeficiente de permeabilidade, mas a CCA com queima não controlada pode resultar em uma redução de 95% na permeabilidade e um aumento de 150% no coeficiente de permeabilidade, dependendo da relação água / cimento [86].

Silva et al. (2013) estudaram a influência da incorporação de partículas de PP reciclado (PPPR) com e sem sílica ativa (SA). A designação dos dois conjuntos diferentes de SCHSC contendo partículas plásticas foi usada com base em uma proporção constante de água/cimento de 0,32. A areia foi substituída pelo PP em diferentes porcentagens: 0%, 10%, 20%, 30% e 40% em volume nos dois conjuntos de concretos. Os ensaios foram realizados 28 e 90 dias de cura. Os resultados dos ensaios mostraram uma redução da durabilidade do concreto, mas com a incorporação de SA as características de durabilidade foram notavelmente melhoradas [103].

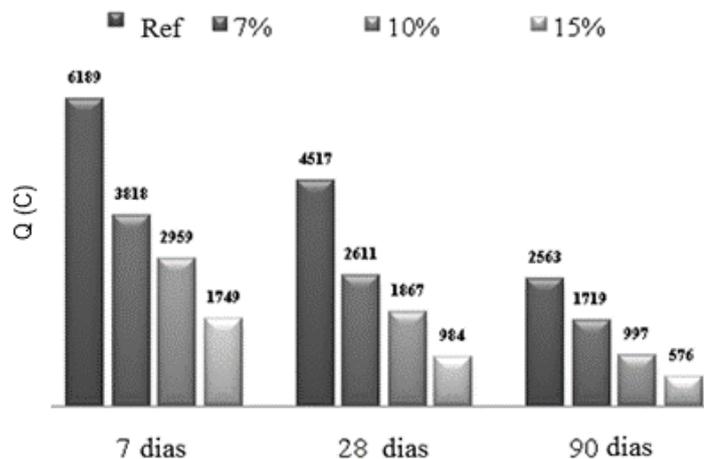
Albano et al (2009) estudaram o efeito de diferentes tamanhos e teores de substituição de agregados de PET provindos de garrafas trituradas. Os resultados indicaram valores mais altos de absorção de água com a adição de maiores tamanhos e teores de PET [96].

### 3.8.2 Resistência aos cloretos

A adição das CCA no concreto auxilia para o aumento da resistência do concreto à penetração de cloretos, sendo que a substituição de cimento pelo resíduo em até 40% favorece essa resistência, independente da relação  $a/c$  e do tempo de cura. Esse aumento da resistência ocorre devido à redução da porosidade e a estrutura dos poros mais fina [107].

Na Figura 14 é mostrada uma exemplificação da permeabilidade de cloretos em concretos contendo CCA onde se observa uma redução da penetração de íons cloretos do concreto com o resíduo em comparação ao concreto de referência. Essa redução é de aproximadamente 5 vezes maior para o teor de 15%. Aos 7 dias, o concreto de referência mostrou o maior valor de 6189 Coulombs (C) enquanto que a carga passava através do concreto com 15% CCA era 1749 C [107].

Figura 14: Resistência à penetração de íons de cloreto (C) em diferentes idades com diferentes teores de incorporação de CCA.



Fonte: Nehd et al., 2003 [107]

Pandey et al. (2019) estudaram os efeitos da cinza da palha de arroz (RSA) e da microsilica (MS) quanto à resistência à penetração de íons cloreto do concreto. Dez corpos de prova de concreto foram preparadas substituindo parcialmente o cimento por RSA e MS em vários teores. Observou-se uma redução significativa na penetração de íons cloreto em corpos de prova de concreto, com

o aumento do tempo de cura e com o aumento do teor dos resíduos. A redução máxima na penetração de íons cloreto foi observada para os teores de: 10% RSA e 7,5% MS quando comparado ao concreto convencional [108]. A maior resistência à penetração de íons cloreto no concreto deveu-se à densificação de sua estrutura de poros pelas partículas finas e também devido a melhora da zona de transição interfacial (ZTI) ao redor dos agregados [103, 109].

Faraj et al. (2019) avaliaram a permeabilidade ao íon cloreto em função das partículas de PP, bem como do tempo de cura. Os resultados obtidos demonstraram que a penetração de íons cloreto ficaram na faixa de 1092 a 4183 Columbus e 510 a 2993 Columbus aos 28 e 90 dias, respectivamente. A penetração de cloreto, fica classificado na categoria “baixa a muito baixa” de penetração de íons cloreto. A baixa permeabilidade foi atribuído ao refinamento dos poros ou transformação de poros grandes em poros finos devido aos efeitos de preenchimento [110].

Kou et al. (2009) em sua pesquisa avaliaram a resistência a penetração de íons cloreto com a incorporação de PVC em diferentes teores: 0%, 5%, 15%, 30% e 45% em volume, e observaram uma redução de 11,9%, 19,0%, 26,9% e 36,2% da permeabilidade de íons cloretos. Este redução da penetração de íons cloreto do concreto é atribuído aos grânulos de PVC impermeáveis que bloqueiam a passagem do íon cloreto [111].

Omrane et al. (2016) substituíram parcialmente a areia por PET tratado com uma solução de NaCl a 3%. Os autores observaram que a incorporação de até 6% de PET levou a uma redução de cerca de 55% na penetração de íons cloreto após 120 dias de cura. Os autores constataram que essa melhoria provém da natureza impermeável das partículas de PET, que favoreceu a redução da absorção de água e bloqueou a passagem de íons cloreto [112].

A carga total passante foi obtida por meio da Equação 1, sendo  $Q$  – carga total passante (coulombs, C);  $I_0$  – corrente (amperes) medida imediatamente após a aplicação da tensão; e  $I_t$  – corrente (amperes) medida nos intervalos “ $t$ ” em minutos. A partir do resultado obtido, foi possível classificar qualitativamente o concreto quanto ao risco de penetração de íons cloretos, conforme a Tabela 8, que está em conformidade com a norma ASTM C1202 (2019).

$$Q = 900. (I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 8: Penetrabilidade de íons cloreto

Carga passante (Coulombs)	Risco à penetração
------------------------------	--------------------

> 4000	Alto
2000-4000	Moderado
1000-2000	Baixo
100-1000	Muito baixo
< 100	Insignificante

### 3.8.3 Avaliação da velocidade de pulso ultrassônico

O ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) é um ensaio não destrutivo (END) de simples execução, que permite detectar a microfissuração interna e outras alterações decorrentes da degradação do concreto, e através do qual é possível também aferir a resistência do concreto [113].

A partir da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) é possível realizar o acompanhamento do estágio de endurecimento do concreto. A avaliação da evolução da VPU ao longo do tempo admite detectar resultados deletérios ocasionados pela presença de matéria-prima conflitante com o cimento, ou de adições que modifiquem a pega e o endurecimento do aglomerante. Na grande maioria dos casos, a VPU apresenta boa correlação com a resistência mecânica do material [114].

Rodrigues (2008) avaliou a velocidade do pulso ultrassônico – (VPU); de argamassas que passaram por três diferentes tipos de exposição: protegidas em laboratório, expostas em ambientes externos e submetidas a ciclos de imersão e secagem, em um tempo de cura de até cinco meses. O cimento utilizado para a produção do concreto foi substituído em 15% e 20% por CCA. Os maiores valores apresentados foram para as argamassas com 5% de CCA, valores esses que foram iguais ou muito próximos aos valores da referência e à medida que se aumentou o teor, houve uma queda nos valores de VPU. Os melhores resultados foram das argamassas expostas ao ambiente externo por um período de 5 meses [115].

Segundo Malhotra e Carino (2004) é importante realizar o ensaio de modo que possa ser repetido posteriormente e que apenas fatores resultantes da característica do concreto possam intervir. De acordo com os autores existem diversos fatores que podem influenciar nos resultados, tais como [113].

- Tipo, teor, tamanho e graduação do agregado graúdo;
- Tipo de cimento e aditivos;
- Relação água-cimento;
- Idade de cura;
- Acoplamento entre os transdutores e o concreto;
- Condições de umidade do concreto;
- Comprimento de propagação da onda;
- Tamanho e forma dos corpos de prova;

De acordo com a norma que preconiza o ensaio NBR 8802 (ABNT, 2019) [116] apresenta os fundamentais fatores que influenciam nos resultados do ensaio, tais como:

- Distância entre os transdutores
- Densidade do concreto
- Características dos agregados
- Tipo de cimento e grau de hidratação
- Tipo de adensamento do concreto
- Idade do concreto.

Cosme-Lopez *et al.* (2017) constataram que devido à alta correlação encontrada no seu experimento, os ensaios com ultrassom podem até substituir os de resistência à compressão para detectar a evolução da hidratação da pasta de cimento presente no concreto [164].

A análise dos resultados dos ensaios de VPU em diferentes concretos está classificada conforme a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Na tabela 9, é apresentada uma relação VPU e a classificação quanto a qualidade do concreto.

Tabela 9: Qualidade do concreto relacionado ao VPU

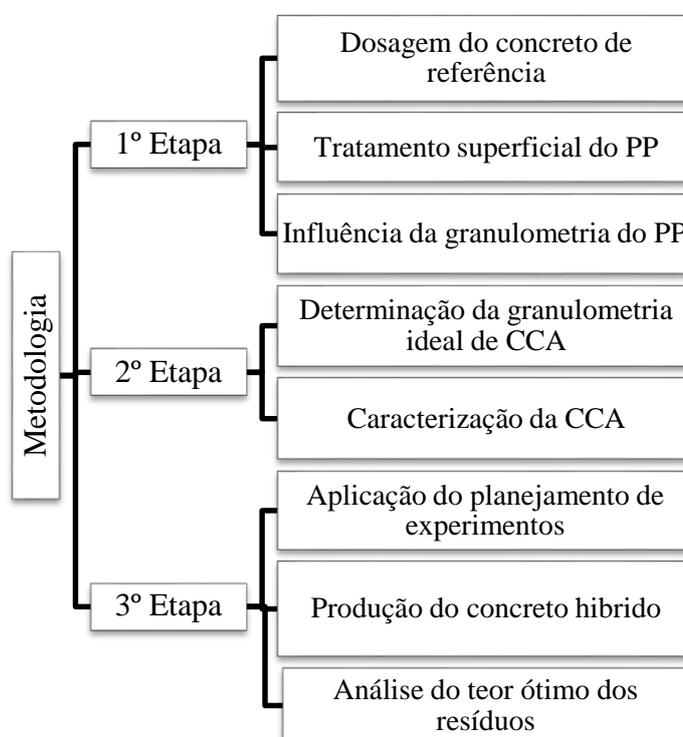
<b>Velocidade da onda ultrassônica (m/s)</b>	<b>Qualidade do concreto</b>
> 4500	Excelente
3500-4500	Ótimo
3000-3500	Bom
2000-3000	Regular
< 2000	Ruim

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são mostrados os materiais e métodos que foram utilizados neste estudo. Cabe salientar que a preparação e acondicionamento dos materiais, elaboração de corpos de prova para os ensaios e análises foram realizadas no LEME – UFRGS e no LAPOL – UFRGS.

A presente pesquisa foi realizada em três etapas como apresentada na Figura 15. Estas etapas serão detalhadas nos subitens subsequentes.

Figura 15: Esquema das etapas da pesquisa



### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Polipropileno pós-consumo e seu beneficiamento

O polipropileno (PP) pós-consumo utilizado na pesquisa foi oriundo da unidade de triagem U.T. COOPERTINGA da cidade de Porto Alegre-RS. A origem do PP era de potes de sorvete, que foram beneficiados para a utilização como agregado miúdo na produção do concreto (Figura 16). Os potes após a coleta foram lavados com água para remoção de impurezas impregnadas nas paredes da embalagem e, posteriormente, foram secos à temperatura ambiente. O material limpo

e seco foi triturado com o uso de um moinho de facas onde foram obtidos os flocos de PP moído e, posteriormente, estes flocos passaram por uma separação granulométrica com o uso de um sistema de peneiras, nas seguintes dimensões: 4,8; 2,4; 1,2;0,3; 0,15 mm. Nesta pesquisa foram utilizadas a granulometria máxima de 1,2 mm e 4,8 mm.

Figura 16: Flocos de PP beneficiados a partir de potes de sorvete pós-consumo.



#### 4.1.2 Cimento

Neste estudo foram usados dois tipos de cimento: o CII-F42 e o CPV-ARI da marca Votoran. O cimento CII-F42 foi utilizado apenas para o ensaio de índice de atividade pozolânica (como proposto pela NBR 5752, 2014) (TÉCNICAS, 2014 ) e suas propriedades químicas e físicas são apresentadas no apêndice A desta tese. O cimento CP V-ARI foi usado para as demais concretagens realizadas nesta pesquisa, e foi escolhido por apresentar menos adições de elementos quando comparado a outros cimentos presentes no mercado. Possui como característica a alta resistência inicial aliado com um alto calor de hidratação. As propriedades físicas são também apresentadas no apêndice A desta tese.

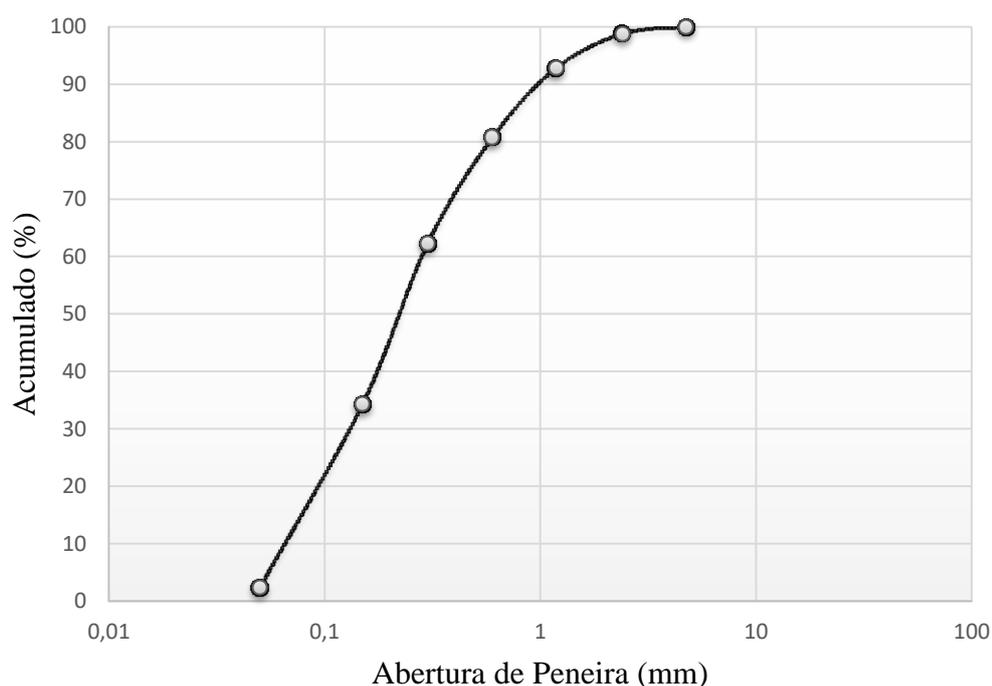
#### 4.1.3 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada nesta pesquisa para a produção do concreto é proveniente da rede de distribuição de água da cidade de Porto Alegre-RS.

#### 4.1.4 Agregado miúdo

A areia utilizada na pesquisa é de origem natural quartzosa do rio Jacuí e sua composição granulométrica é apresentada na Figura 17. A caracterização do agregado miúdo foi realizada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2009) e características principais propriedades deste material são: diâmetro máximo de 2,36 mm, massa específica de 2,39 g/cm<sup>3</sup> e módulo de finura de 1,97.

Figura 17: Granulometria da areia

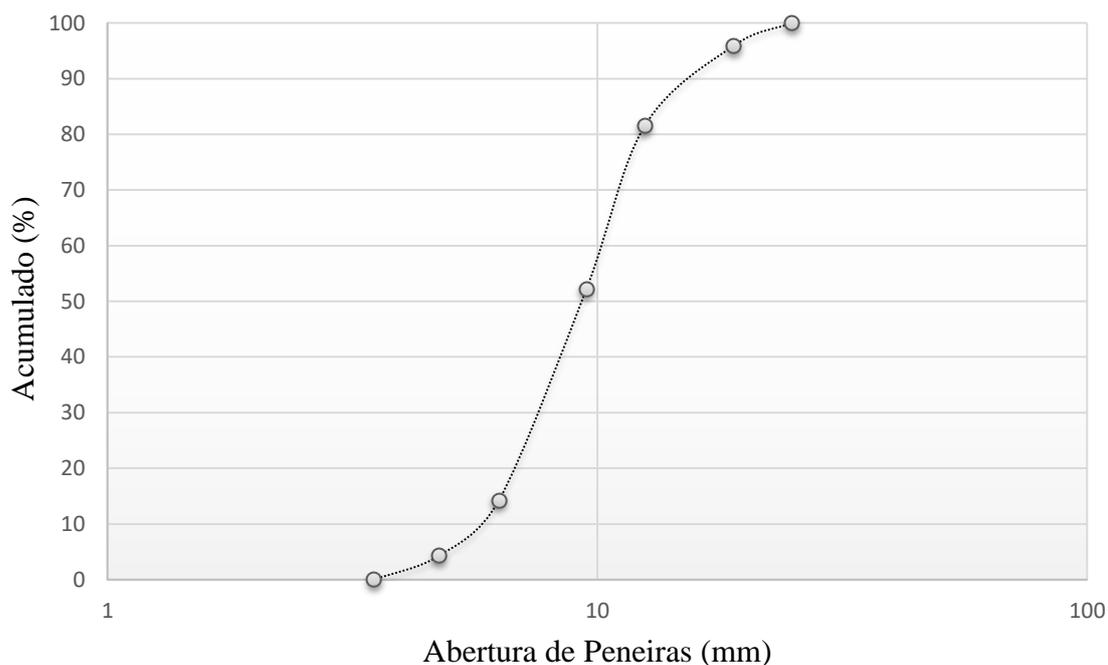


#### 4.1.5 Agregado graúdo

A brita (agregado graúdo) utilizada para a produção do concreto é de origem basáltica (tipo 1) e sua composição granulométrica se apresenta na Figura 18. A caracterização do agregado graúdo

foi realizada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2009) e as propriedades deste material são: diâmetro máximo de 25 mm, massa específica de 2,89 g/cm<sup>3</sup> e módulo de finura de 7,01.

Figura 18: Granulometria da brita



#### 4.1.6 Cinzas da casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) é obtida através da queima sem controle da temperatura da casca de arroz, de maneira instantânea em fornalhas. A CCA usada neste estudo foi fornecida pela cooperativa CAAL. As cinzas tiveram sua granulometria diminuída através da utilização de um moinho de bolas que apresentava as seguintes dimensões: 310 mm de altura e 275 mm de diâmetro. No moinho foram adicionadas 70 bolas com 38 mm de diâmetro cada. A capacidade máxima do moinho é de 1 kg de CCA, que foi moída em diferentes tempos: 15 min, 1h, 2h e 4h.

#### 4.1.7 Aditivo

Para a realização do experimento, foi utilizado um aditivo superplastificante, o TecFlow 8000 (Grace Construction Products), cuja composição é a base de Policarboxilatos. Este aditivo atende

aos requisitos da norma ASTM C 494 (ASTM, 2011) (TIPO A e F), ASTM 1017 (ASTM, 1998), NBR 11768 (ABNT, 2011) e algumas informações sobre o aditivo estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Informações do aditivo superplastificante

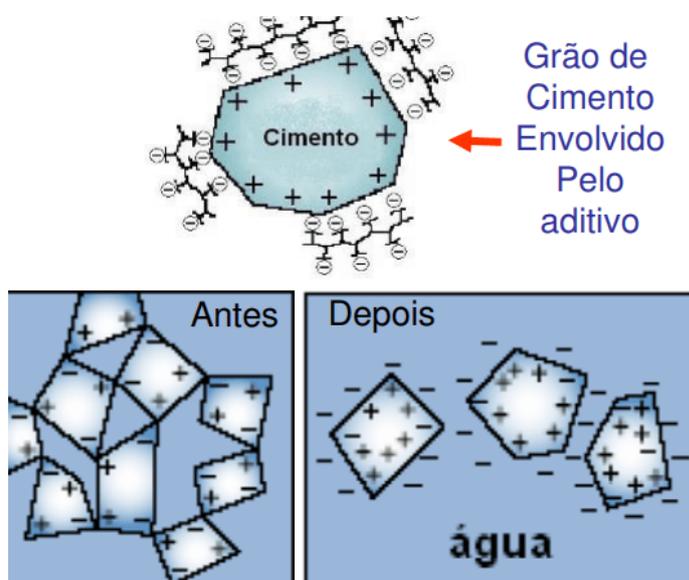
Dosagem recomendada (Sobre a massa do cimento)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) (ABNT 10908)
0,3 a 2%	1,10 ± 0,02

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante.

A principal finalidade do aditivo superplastificante é de aumentar a trabalhabilidade sem perder a resistência mecânica. O concreto possui uma relação a/c em que quanto maior é a quantidade de água na mistura menor a sua resistência, porém, reduzir esse volume de água do concreto pode fazer com que ele se torne difícil de manusear devido à redução da trabalhabilidade, prejudicando o adensamento e, por conseguinte, a concretagem.

Com esse tipo de aditivo é possível diminuir a quantidade de água empregada no concreto sem perder a sua trabalhabilidade. Na Figura 19 é apresentado como o aditivo se comporta ao ser incorporado na mistura do concreto, devida à diferença de polaridade da água e do aditivo, este repele a água, favorecendo com que ocorra o aumento da fluidez.

Figura 19: Ação dos aditivos plastificantes.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014) [42]

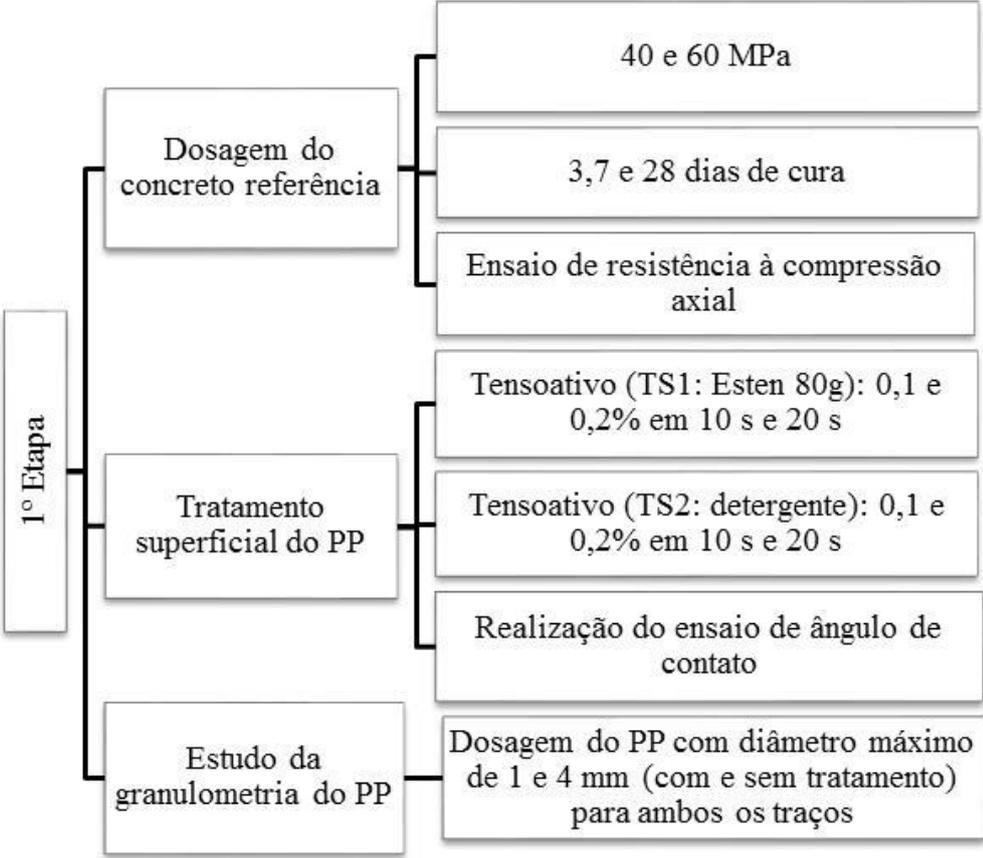
### 4.2 MÉTODO DE PESQUISA

A presente pesquisa foi dividida em três etapas, a primeira etapa consiste no estudo preliminar da incorporação do PP, a 2º etapa a avaliação das características físicas e químicas da CCA e a 3º etapa incide na aplicação do planejamento de experimentos para a obtenção do concreto híbrido. Essas etapas serão melhores descritas ao longo deste capítulo.

#### 4.2.1 1º ETAPA - Estudo preliminar da incorporação do PP

Nesta etapa foram realizados ensaios preliminares de dosagem do concreto de referência e do concreto contendo o PP. Na Figura 20 estão apresentados de modo esquemático os ensaios realizados neste estudo preliminar. Nos tópicos a seguir serão abordados detalhes de cada uma das sub etapas.

Figura 20: Representação esquemática da 1º Etapa



#### 4.2.1.1 Dosagem do concreto referência

Para o programa experimental foram empregados dois traços (40MPa e 60 MPa), denominados nessa pesquisa como Traço I e Traço II, respectivamente, além do traço de referência como base para posteriormente realizar a dosagem com os resíduos de PP e CCA. O concreto foi dosado pelo método EPUSP/ IPT e verificada a sua resistência à compressão axial aos 28 dias de cura.

A composição do traço em massa, considerando a proporção cimento: areia: brita, e a relação a/c, está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Traços de referência usados neste estudo

Proporção	Traço referência 40MPa	Traço referência 60MPa
Cimento: areia: brita	1:1,62:2,89	1:0,92:2,05
a/c	0,43	0,31

Os corpos de prova contendo os concretos dos traços de referência foram concretados conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015) [83]. Esses concretos foram moldados em moldes (10x20) cm, e após 24h foram desmoldados e acondicionados em recipientes com água e cal para a cura.

Após o término da moldagem dos corpos de prova, esses eram cobertos com sacos plásticos para que não houvesse contato com umidade externa, onde permaneciam por 24 horas. Depois do período, eram desmoldados e colocados em câmara úmida.

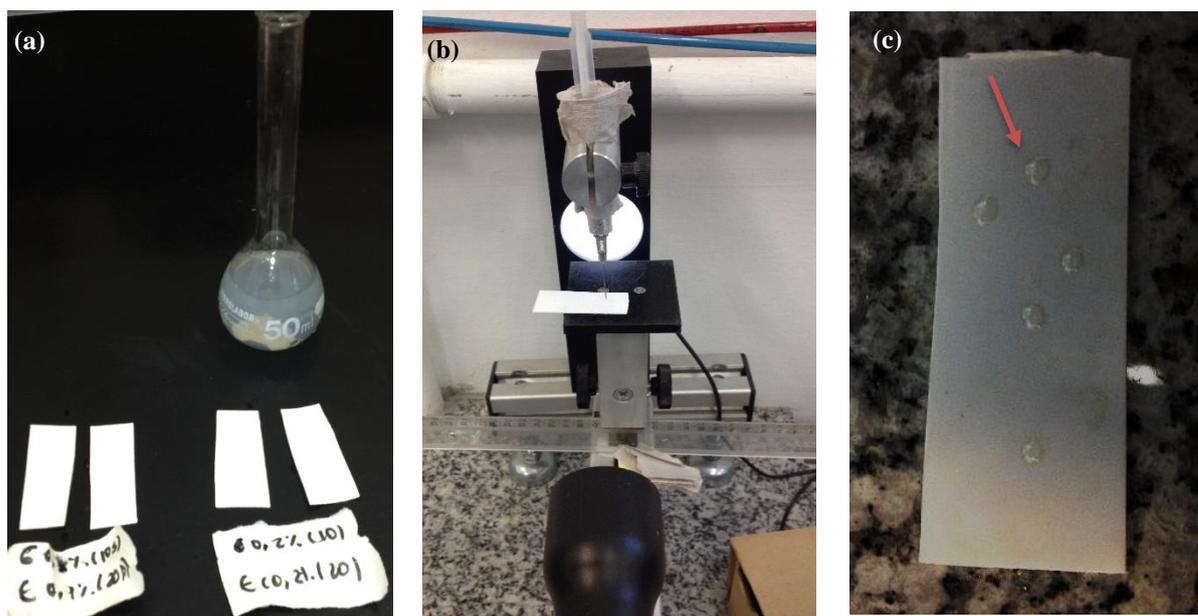
#### 4.2.1.2 Tratamento superficial do PP

Para o tratamento do PP, corpos de provas extraídos das embalagens de PP pós-consumo em formato retangular foram submetidos a tratamento superficial. Os CPs foram limpos e após foram submersos em uma solução de detergente não iônico (detergente e Esten 80G) com concentração de 0,1 e 0,2% durante 10 e 20s para cada concentração, e posteriormente as amostras foram secas na estufa por 50°C por 12h, conforme pesquisa literária.

O detergente usado tem como composição química: componente ativo/tensioativo aniônico (Linear Alquilbenzeno Sulfonato de Sódio), glicerina, coadjuvantes, conservantes, sequestrante, espessantes, corantes e água, pH: 5,5- 8,0, matéria ativa aniônica: 6,50 - 7,90 % [118] e o Esteng 80G é um surfactante não iônico, não tóxico, base óleo vegetal, da marca Tensac do Brasil.

Após o tratamento com os tensoativos as amostras foram avaliadas com o uso do tensiômetro para a determinação do ângulo de contato ( $\theta$ ) entre a superfície sólida, uma fase líquida e uma gasosa, (Figura 21), é o ângulo entre a interface sólido- líquido e a tangente à interface líquido-gás na linha de contato dessas três fases, que darão o valor do ângulo e se torna possível a classificação do material em hidrofóbico ou hidrofílico [73].

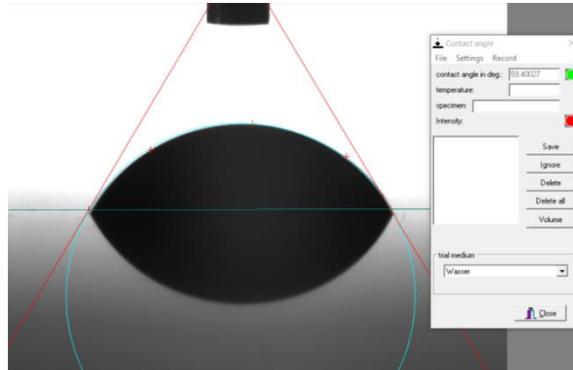
Figura 21: Ângulo de contato de gota sobre a superfície: a) Preparação das amostras; b) Teste de ângulo de contato com uso de tensiômetro, c) gotas depositadas na superfície ensaiada



Existem vários métodos para medir o valor do ângulo de contato. Neste trabalho utilizou-se o método de espalhamento, que consiste na deposição de uma gota de líquido em uma superfície plana de um sólido. O líquido forma uma superfície esférica, se espalhando na superfície do sólido até formar o ângulo de contato [119].

Medidas do ângulo de contato foram realizadas em temperatura ambiente com água destilada e, através de uma câmera a gota é captada e a imagem é exportada para o software Surftens 3.0 TM que calcula o valor do ângulo de contato (AC) de acordo com cinco pontos (representado por setas) determinados pelo usuário, como representado na Figura 22.

Figura 22: Cálculo do ângulo de contato feito pelo software Surftens 3.0 TM



Foram utilizadas nove amostras para a avaliação do ângulo de contato: amostra PP tratado e PP sem tratamento. Foram depositadas cinco gotas de água em posições diferentes da superfície das amostras.

#### 4.2.1.3 Granulometria do PP

Após a moagem do PP para a obtenção dos flocos de tamanho médio de 1 mm e de 4 mm, estes foram utilizados para substituição parcial pela areia em 10% em volume (volume obtido em estudos literários). As partículas de PP foram incorporadas nos traços referência com o intuito de avaliar a influência do tamanho do agregado reciclado nas propriedades do concreto.

Após 28 dias de cura imersa, esses CPs foram testados por compressão axial e determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009) [117].

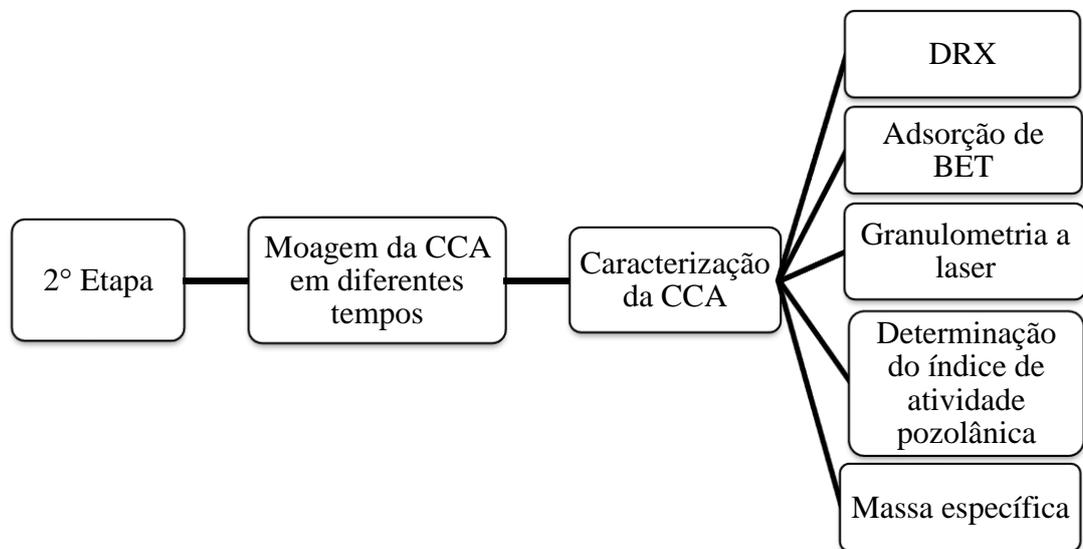
#### 4.2.1.4 Dosagem dos traços contendo o PP tratado

Traços de 40 MPa e 60 MPa contendo o PP tratado com o tensoativo que apresentou maior molhabilidade foram preparados. Após 28 dias de cura foi avaliado o efeito do tratamento com tensoativo com o intuito de verificar se teve uma melhora das características avaliadas: resistência à compressão axial, absorção de água, índice de vazios e massa específica.

#### 4.2.2 2º ETAPA - Avaliação das características físicas e químicas da CCA

As CCAs moídas nos diferentes tempos: 0h (referência), 15 minutos, 1 hora, 2 horas e 4 horas foram caracterizadas conforme as etapas a seguir, com objetivo de determinar a granulometria ideal, que foi depois utilizada para a Etapa 3. Na Figura 23 tem-se os processos que foram realizados nesta etapa. As caracterizações da CCA foram realizadas para todos os tempos de moagem.

Figura 23: Representação esquemática da 2º Etapa



##### 4.2.2.1. Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difratograma de raio x foi realizado para a verificação da cristalinidade da sílica da CCA onde a varredura é feita com velocidade de 1,5 grau/min, passo de varredura 0,02° e intervalo de medida na faixa de 5°-75°. O difratômetro utilizado foi o da marca Siemens, modelo D500.

##### 4.2.2.2 Adsorção de BET

Para a determinação da área superficial das CCA foi utilizada a técnica de BET (Brunauer, Emmett, Teller) que realiza medidas de área superficial específica. A determinação da área superficial foi realizada utilizando o analisador Quantachrome, modelo MP (Quantachrome Corporation) e foi usado nitrogênio como gás inerte.

#### *4.2.2.3 Granulometria a laser*

Para determinação da distribuição granulométrica da CCA foi adotada a técnica de difratometria a laser que usa água destilada como meio suspensor. O equipamento utilizado para realizar a difração a laser é o CILAS, Particle Size Analyser, modelo CILAS 1180 Liquid, no LACER/UFRGS.

#### *4.2.2.4 Determinação do índice de atividade pozolânica*

O ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica, estabelecido pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014) (TÉCNICAS, 2014), permite verificar o grau de pozolanicidade do material por meio da determinação da resistência à compressão simples. Neste ensaio ocorre a substituição de 35% de cimento por CCA. Especialmente nesse ensaio é utilizado o cimento CII-F42 com o traço de 1:3. Salienta-se que a norma requer a utilização do cimento CII-F32, mas por falta do produto esse foi substituído pelo cimento citado acima.

#### *4.2.2.5 Massa específica*

A determinação da massa específica da CCA foi realizada conforme os procedimentos da norma NBR 1660 (ABNT, 2017) [120].

### **4.2.3 3º ETAPA - Planejamento de experimentos para a obtenção do concreto híbrido**

A fim de aperfeiçoar o plano experimental, foi realizado um projeto de experimentos para reduzir o tempo com a realização dos ensaios e propiciar uma redução de custos, sem alterar a confiabilidade da pesquisa. O projeto de experimentos tem como vantagem o rendimento e a estabilidade dos processos produtivos, além de garantir que os fatores físicos controlados sejam estatisticamente independentes entre si, e as decorrências geradas por estes podem ser medidas individualmente [121]. Uma vez que o planejamento exige a realização de ensaios que serão posteriormente estudados estatisticamente, estes devem ser executados com atenção para assegurar que o que foi planejado seja executado corretamente.

Na 1º Etapa foram realizados a dosagem do concreto referência, bem como estudo da granulometria do PP com e sem tratamento dos tensoativos. Na 2º Etapa foi realizada a

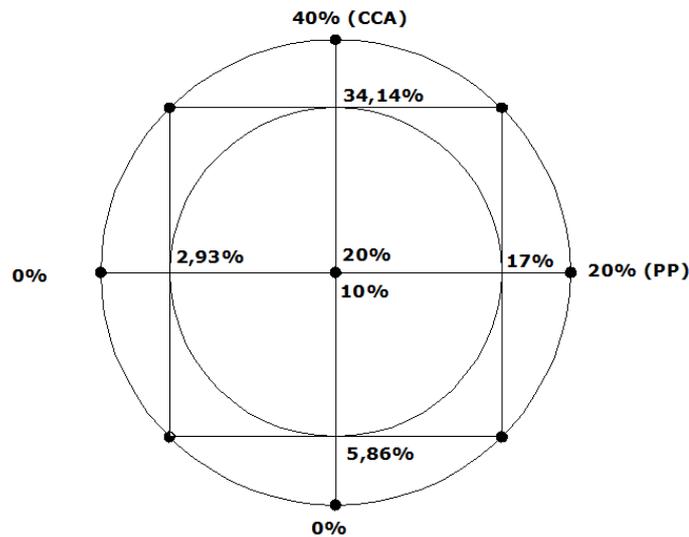
caracterização das CCA. Nesta etapa (3º) serão aplicadas as formulações obtidas pelo programa experimental.

Considerando que este trabalho tem como objetivo avaliar algumas propriedades mecânicas, físicas e químicas do concreto com a inclusão dos materiais reciclados, foram definidas as variáveis de resposta que serão estudadas:

- Resistência à compressão axial ( $f_c$ );
- Resistência à compressão diametral;
- Módulo de elasticidade ( $E_c$ );
- Determinação de água por capilaridade;
- Determinação de absorção de água por imersão, índices de vazios
- Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica;
- Resistência à penetração de íons cloretos.

Sabendo-se das variáveis que se deseja quantificar, foram definidos os parâmetros de processo que influenciam nas variáveis que se deseja analisar, principalmente em termos de percentuais de substituição de resíduos (CCA e PP), que foram definidos através do planejamento de experimentos (Figura 24). Também foram definidos outros parâmetros de processo, que estão relatados após a descrição das variáveis. O intervalo do fator CCA (teor de substituição do cimento por CCA em massa) foi de 0 a 40%, considerando a parte fatorial de (-1 e +1), e a parte da estrela (-1,41 e +1,41). Da mesma forma ocorreu para o teor de PP (teor de substituição da areia por PP em volume), considerando como parte fatorial (-1 e +1) o intervalo de 0 a 20% e a parte da estrela (-1,41 e +1,41). No ponto central da figura 24 as misturas são avaliadas seis vezes e as demais misturas representadas pelos outros pontos pretos, são avaliadas uma vez cada. O parâmetro de confiabilidade se dá pelas misturas centrais, o que justifica sua repetição.

Figura 24: Representação em 2D das variáveis estudadas no projeto de experimentos.



As variáveis analisadas na pesquisa são:

- *Percentuais de substituição*: da areia e cimento por flocos de PP e CCA, respectivamente, que foram definidos através do planejamento de experimentos.
- *Granulometria dos resíduos*: para a definição da granulometria ideal, foram realizados ensaios preliminares, sendo que para as cinzas de casca de arroz foram realizados quatro tempos diferentes de moagem: 15 min, 1h, 2h e 4h. E para os flocos de polipropileno foi utilizada uma granulometria de 1 e 4 mm (tamanho médio das partículas).
- *Tratamento superficial do PP*: foi realizado o tratamento superficial dos flocos de PP com dois diferentes soluções de tensoativos (detergente *Limpol* e *Esten 80g*) com concentrações (0,1 e 0,2%) e tempo de imersão (10 e 20s), para posterior análise de sua adesão na interface com a massa cimentícia.

Depois de determinadas as variáveis a serem analisadas, foram definidos os parâmetros que devem ser constantes durante a execução do experimento.

- *Idade de cura*: foi estabelecida uma idade padrão de 28 dias para as análises dos ensaios preliminares deste trabalho (Etapa 1). Entretanto, para a análise das propriedades mecânicas e de durabilidade dos traços do planejamento de experimentos, foram avaliados em dois tempos de cura: 28 e 90 dias de cura, visando avaliar a influência destes tempos, nas propriedades do concreto com CCA e do PP.

- *Tipo de cura*: para todos os corpos de prova de concreto a cura será utilizada em câmara úmida.
- *Traços*: foram utilizados diferentes traços de resistência 40 MPa e 60 MPa, a fim de otimizar a incorporação dos resíduos de PP e de CCA (o projeto de experimentos foi duplicado para cada um dos traços).

Nesta etapa foi realizada a substituição dos resíduos (CCA e PP) pelo cimento e areia, respectivamente. A Tabela 12 apresenta a quantidade de corpos de prova por ensaio, totalizando em 372 CPs para ambos os traços.

Tabela 12: Quantidade de corpos de prova para cada ensaio realizado

Ensaio	CPs por ensaio
Resistência à compressão simples	62
Resistência à tração por compressão diametral	62
Módulo de elasticidade	62
Velocidade de propagação ultrassônica	31*
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	62
Absorção de água por capilaridade	62
Resistência à penetração de íons cloretos	31
<b>TOTAL</b>	<b>372</b>

\*Os corpos de prova ensaiados para a determinação da velocidade de propagação ultrassônica foram reaproveitados para os ensaios de resistência à penetração de íons cloretos

#### 4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental é de suma importância para avaliação dos experimentos, para que se obtenha um menor custo e uma maior quantidade de informação sobre os fatores a serem considerados. Quando não é usado planejamento, utiliza-se um maior número de repetições para obter as mesmas conclusões que poderiam ser obtidas com um menor número de amostras, além de economia de insumos. Por outro lado, um número menor de amostras gera incertezas que impossibilitam qualquer conclusão sobre os efeitos estudados.

O objetivo da utilização desse planejamento é para contribuir com os estudos de dosagem do concreto que está sendo estudado, estabelecendo valores de referência para as propriedades mecânicas, físicas e químicas. Para fins desta pesquisa, o planejamento é utilizado em misturas

com adição dos resíduos de CCA e PP. Para que se tenha uma confiabilidade dos resultados, é necessário que haja uma quantidade de variáveis e níveis significantes ou de significância. Como a pesquisa encontra barreiras como a limitação da quantidade de resíduos disponíveis para a pesquisa e ao tempo para a obtenção do mesmo, é necessário otimizar o projeto de pesquisa, utilizando o planejamento de experimentos. Salienta-se que é mais interessante estudar um menor número de variáveis, com um conjunto menor de ensaios, e aos poucos ir acrescentando variáveis e níveis, eliminando dessa forma variáveis que não são significativas. Com essa ação se reduz o número de ensaios, favorecendo apenas os ensaios realmente influentes. Desta forma, se obtém a confiabilidade dos resultados e a possibilidade da realização da pesquisa em etapas.

Os fatores determinantes para a realização do planejamento experimental nesta pesquisa são: quantidade de resíduos (CCA e PP), tempo para a elaboração de todos os ensaios, verificação do comportamento do concreto com adições extremas das variáveis analisadas. Com essa ferramenta é possível o desenvolvimento de um método de dosagem [123].

#### 4.3.1 Matriz experimental

Para a construção da matriz experimental devem ser considerados o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis do processo. Nesta etapa são definidos o número de réplicas, as restrições dos experimentos e as interações entre os fatores que estão sendo avaliados.

O planejamento fatorial é indicado para quando se deseja estudar diferentes variáveis. No presente trabalho serão usados níveis maiores que 2, então serão realizados ajustes de modelos quadráticos; para isso é necessário a utilização de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO) [123].

O PCSO é a soma de um experimento  $2k$ , mais uma estrela ( $2^*k$ ), mais pontos centrais. Sendo que os pontos da parte fatorial ( $2k$ ) possibilitam a estimativa de termos lineares e interações e os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros [124].

#### 4.3.2 Variáveis e composições estudadas

Para fins desta pesquisa foram definidos como variáveis os teores de PP e de CCA, foi fixado o tempo de cura em 28 e 90 dias e também dois traços, com 40 e 60 MPa. A matriz experimental definida foi um PCSO composto por quatro fatores, quantitativos (A: teor de CCA, B: teor de PP, C: traço e D: tempo de cura). Na Tabela 13 pode ser verificada a representação das misturas analisadas, que correspondem aos pontos em preto, anteriormente apresentados na Figura 24.

Tabela 13: Definição das misturas estudadas nesta pesquisa

Resíduos		Traço I (40 MPa)		Traço II (60 MPa)	
PP (%)	CCA (%)	Cura (dias)	Cura (dias)	Cura (dias)	Cura (dias)
17,07	34,14	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
2,93	5,86	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
17,07	5,86	28	90	28	90
2,93	34,14	28	90	28	90
0,00	20,00	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
20,00	20,00	28	90	28	90
10,00	0,00	28	90	28	90
10,00	20,00	28	90	28	90
10,00	40,00	28	90	28	90

#### 4.3.3 Análise de dados

Nesta etapa foi utilizado o software MINITAB para a obtenção dos resultados a partir do planejamento estatístico. Essa avaliação ocorre para cada ensaio, e com os resultados obtidos o programa informa a influência das variáveis e a relação entre elas para verificar os efeitos nas respostas observadas. Essa análise é realizada por meio de parâmetros numéricos, modelos e gráficos.

#### 4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO HÍBRIDO

A moldagem dos CPs foi realizada conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2016) [83], em moldes (10x20) cm, com adensamento na mesa vibratória. Os CPs foram imersos em água saturada de cal para cura em dois diferentes tempos: 28 e 90 dias.

##### 4.4.1 Ensaio do concreto no estado fresco

Foi avaliada a trabalhabilidade do concreto com a adição dos resíduos (flocos de PP e CCA) e do concreto de referência. Para avaliar esta propriedade, foi utilizada a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998) [125], para todos os traços utilizados na pesquisa (Figura 25).

Figura 25: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.



Este ensaio é qualitativo e serve para a avaliação da fluidez do concreto, e é sempre desejável que se tenha um abatimento de tronco de cone (*slump*) sem que ocorra segregação dos materiais, sendo que o concreto no estado plástico não deve estar muito fluido, nem muito seco.

#### 4.4.2 Ensaio no concreto no estado endurecido

##### 4.4.2.1 Resistência à compressão axial

Os CPs foram ensaiados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) [126], nas idades definidas no programa experimental em uma prensa Shimadzu, com capacidade para 2000 kN (Figura 26), com velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. Os CPs foram retificados, para que houvesse uma regularização das superfícies para a aplicação da carga. Os ensaios foram realizados em triplicata para a 1ª etapa e para a 3ª etapa foi seguido conforme o planejamento experimental-

Figura 26: Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial



##### 4.4.2.2 Resistência à compressão diametral

A resistência por compressão diametral foi executada conforme a NBR 7222 [92]. A prensa computadorizada utilizada é da marca Shimadzu de 2000 kN (Figura 27). Para o traço considerado na pesquisa como ponto central (10-20%) foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

Figura 27: Registros do ensaio de resistência à compressão diametral



#### 4.4.2.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto foi realizado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008) [127]. O ensaio foi realizado considerando a aplicação de carga até 30% da resistência última, com uma velocidade de carga controlada de 0,45 MPa/min, no qual se afere os deslocamentos verticais dos CPs com auxílio de LVDTs (Transformador diferencial variável linear), conforme mostra a Figura 28. Para o traço considerado na pesquisa como ponto central foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

Figura 28: Corpo de prova durante o ensaio de módulo de elasticidade



#### 4.4.2.4 Determinação de absorção de água por imersão, índices de vazios.

O ensaio para obtenção de absorção de água por imersão e índice de vazios, foi realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005) [117]. Os ensaios foram realizados em triplicata para a 1º etapa e para a 3º etapa foi seguido conforme o planejamento experimental: ponto central foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

#### 4.4.2.5 Determinação da absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012) tendo como objetivo verificar aspectos ligados à permeabilidade do concreto dos corpos de prova (Figura 29). Para o traço considerado na pesquisa como ponto central foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

Figura 29: Determinação da absorção de água por capilaridade



#### 4.4.2.6 Ensaio acelerado de penetração de cloretos

O ensaio descrito pela norma C1202 (ASTM, 2019) (Materials, 2019) tem a finalidade de medir a carga passante em um corpo de prova de concreto ( $\varnothing$  10,0 x 5,1 cm), conforme apresentado na Figura 30, e submetido a uma tensão de  $60,0 \pm 0,1$  V, durante um período de 6 horas. As faces do cilindro são expostas uma à solução de cloreto de sódio (3% em água destilada) e a outra à solução de hidróxido de sódio (0,3N em água destilada), nas quais são submersos eletrodos de cobre conectados em uma fonte de corrente contínua, permitindo a diferença de potencial no concreto (Figura 31). Para o traço considerado na pesquisa como ponto central foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

Figura 30: Corte do CPs para o ensaio de difusão de cloretos.

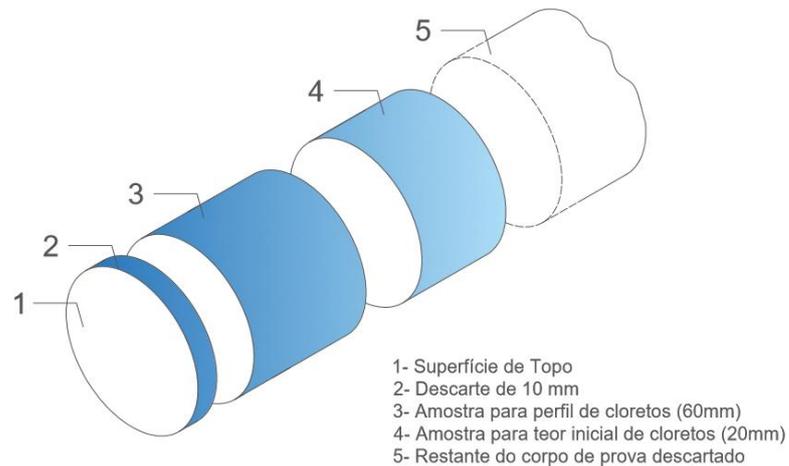


Figura 31: Ensaio acelerado de penetração de cloretos



Ao completarem 27 e 89 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao pré condicionamento prescrito pela referida norma, que incide em:

- Selagem da face curva do corpo de prova;
- Aplicação de vácuo por um período de 3 horas;
- Imersão em água deionizada por um período de  $18 \pm 2$ h.
- Após o condicionamento, os corpos de prova foram secos superficialmente e fixados nas células de acrílico com auxílio de cola a base de silicone. Com a finalização do ensaio (6h), foi então calculada a carga total passante (equação 3), constatando-se a categorização do concreto, quanto ao risco de penetração dos íons cloreto, de acordo com norma C1202 (ASTM, 2019)

#### *4.4.2 7 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*

Os ensaios foram feitos segundo os procedimentos descritos na NBR 8802 (ABNT, 2019) [116]. Este ensaio determina a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos através dos CPs de concreto. Para o traço considerado na pesquisa como ponto central foi utilizado seis CP's e para os demais um CP.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados nas etapas da pesquisa, além de apresentar os resultados estatísticos que descreve o comportamento do material de acordo com o teor de resíduos incorporado.

### 5.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA E SEGUNDA ETAPA

#### 5.1.1 Dosagem dos traços referência

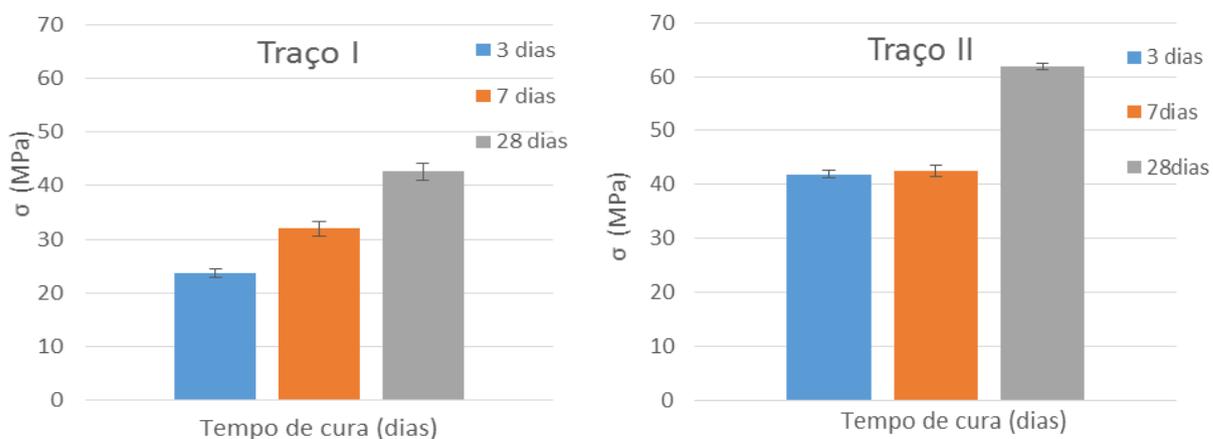
Na Tabela 14 apresentam-se as características físicas aferidas no estado fresco para o traço I (40 MPa) e para o traço II (60 MPa). Observa-se que o traço II comparado ao I é mais rico em consumo de cimento e, conseqüentemente, menos viável economicamente. Como a relação a/c do traço II é inferior ao traço I, houve uma redução da trabalhabilidade do traço II quando comparado ao traço I, mesmo utilizando-se aditivo superplastificante.

Tabela 14: Características físicas dos traços analisados: traços I e II

Traço	I	II
m (agregados) (kg)	4,51	2,97
Teor de argamassa ( $\alpha$ ) (%)	47,57	48,36
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	409,20	575,15
Aditivo superplastificante (%)	-	1,50%
Abatimento (cm)	10	7
Relação a/c	0,43	0,31

Na Figura 32 observam-se os resultados de compressão axial dos traços I e II em função do tempo de cura: 3, 7 e 28 dias. Nota-se como já esperado, um acréscimo da resistência conforme o aumento do tempo de cura. Aos 28 dias de cura se obteve uma resistência de 42,6 MPa para o traço I, sem a necessidade do uso de aditivo superplastificante.

Figura 32: Resistência à compressão axial para os corpos de prova do traço I e II em função do tempo de cura



Para o traço II observa-se que aos 28 dias foi alcançada a resistência de 61,8 MPa. Para se alcançar esta resistência utilizou-se uma baixa relação a/c, e devido a isso, foi necessária a utilização de aditivo superplastificante no percentual de 1,5% (em massa sobre a quantidade de massa de cimento) conforme sugerido pelo fabricante. Para alcançar a resistência de 60 MPa para o traço II foram realizadas 8 diferentes concretagens até ajustar o teor ideal de aditivo para garantir uma trabalhabilidade adequada da mistura.

### 5.1.2 Tratamento superficial do PP

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios dos ângulos de contato da água com a superfície das amostras de PP pós-consumo tratados por dois diferentes tensoativos. Observa-se que com o aumento da concentração dos tensoativos e do tempo de imersão da amostra (0,2%-20s), ocorre uma redução do valor do ângulo de contato, indicando uma superfície mais molhável. Pode-se ressaltar que ambos os tensoativos tiveram uma influência positiva nesta avaliação, porém o detergente apresentou um melhor resultado, ocorrendo uma maior redução do ângulo de contato da amostra.

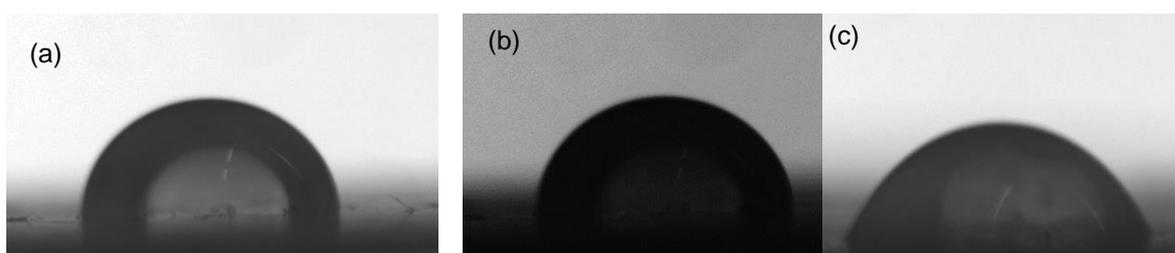
Tabela 15: Valores médios do ângulo de contato das amostras de PP utilizando-se o tensoativo

Amostra de PP pós-consumo	Ângulo de contato (°)	
	Tensoativo: TS1	Tensoativo: TS2
Referência (PP sem tratamento)	80,8 ± 1,7	80,8 ± 1,7
Tratada (0,1%-10s)	67,3 ± 3,4	71,7 ± 1,5
Tratada (0,1%-20s)	69,5 ± 1,2	61,4 ± 1,5
Tratada (0,2%-10s)	73,7 ± 5,0	69,9 ± 2,8
Tratada (0,2%-20s) -	64,6 ± 7,5	57,0 ± 1,2

As poliolefinas como o PP são compostas apenas de carbono e hidrogênio e apresentam natureza hidrofóbica. Segundo Gryta et al. (2009) estes materiais apresentam baixos valores de energia superficial e falta de grupos ativos em sua superfície indispensável para o desenvolvimento de ligações de hidrogênio com moléculas de água. Ao se utilizar um tensoativo, este aumenta a energia superficial do PP, tornando-o hidrofílico, e conseqüentemente, melhorando a adesão interfacial do PP e a massa cimentícia [130]. O espalhamento existe essa palavra? Reformule esta frase da gota é apresentada na Figura 33.

A Figura 33 mostra as imagens das gotas de água sobre a superfície das amostras sem e com tratamento com os diversos tensoativos. Observa-se uma redução do ângulo de contato da amostra, dando destaque à amostra tratada com o tensoativo TS2 (detergente), onde essa redução foi mais significativa.

Figura 33: Imagem da gota de água sobre a superfície: (a) PP sem tratamento; (b) PP com tratamento TS1; (c) PP com tratamento TS2



Com isso constata-se que o tensoativo mais eficiente para reduzir a tensão superficial do PP é o TS2, sendo este o tratamento a ser utilizado nas próximas etapas para melhorar a adesão do polímero ao concreto. Conforme já mostrado no referencial teórico deste trabalho 3.4.1 vários autores também observaram melhora da molhabilidade do PP ao utilizarem tratamentos com tensoativos, devido a modificação química e morfológica da superfície do PP [131, 132].

### 5.1.3 Avaliação da granulometria do PP tratado

Nesta etapa foi avaliada a influência da granulometria do PP tratado no concreto preparado com os traços I e II como referência nas propriedades de resistência à compressão axial, absorção de água, índice de vazios e massa específica.

#### 5.1.3.1 Resistência à compressão axial

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados do ensaio de compressão axial aos 28 dias de cura para os seguintes traços: Referência, PP com a granulometria máxima de 1 mm e 4 mm com e sem tratamento superficial, cuja as amostras tratadas é representada pela sigla “T”.

Tabela 16: Resistência à compressão axial dos corpos de prova com traço I de concreto com e sem flocos de PP com e sem tratamento de granulometrias de 1 e 4 mm.

Traço I (MPa)			
Granulometria do PP (mm)	Tratamento com tensoativo TS2	$\sigma$ (MPa)	Significância
0	-	42,58 $\pm$ 0,32	-
1,0	-	25,43 $\pm$ 0,45	N
4,0	-	24,80 $\pm$ 0,61	N
1,0	T	33,01 $\pm$ 0,52	S
4,0	T	31,62 $\pm$ 0,71	S

Observa-se uma redução da resistência dos traços contendo os flocos de PP quando comparado ao traço referência. Comparando o desempenho mecânicos entre os corpos de prova com PP, os tratados com tensoativos foram superiores do que as sem tratamento. É possível notar que não houve influência significativa do tamanho de partícula do polímero com e sem tratamento na

resistência à compressão do concreto, portanto, decidiu-se usar o tamanho de partícula maior para a segunda etapa, devido ao menor tempo de moagem gerando e conseqüentemente uma menor economia de energia por parte do moinho de facas.

Foi realizada análise de variância para o tratamento superficial do traço I com a inclusão do PP tratado sobre a resistência a compressão axial. O valor de “p” de 1,39E-05 indica que o tratamento superficial apresenta significância estatística, pois o valor de “p” é menor que 0,05 (5 %). Com isso foi concluído que o tratamento influenciou positivamente nessa característica.

Na Tabela 17 apresentam-se os resultados para o ensaio de compressão axial aos 28 dias de cura para o traço II. Observa-se uma redução de 17,5% da resistência à compressão axial com a incorporação do polímero quando comparado ao traço referência. As partículas de agregados leves são relativamente fracas, e sua resistência pode ser um fator limitante da resistência do concreto, pois ocorre a ruptura das partículas do resíduo na direção normal a carga aplicada [16].

Tabela 17: Resistência à compressão axial dos corpos de prova com traço II de concreto sem e com flocos de PP de granulometrias de 1 e 4 mm.

Traço II (MPa)			
Granulometria do PP (mm)	Tratamento com tensoativo, TS2	$\sigma$ (MPa)	Significância
0	-	61,79 ± 0,12	-
1,0	-	51,13 ± 0,25	N
4,0	-	51,86 ± 0,31	N
1,0	T	55,20 ± 0,22	S
4,0	T	57,90 ± 0,31	S

Assim como ocorrido no traço I, o traço II teve um efeito estatístico significativo para o tratamento superficial do PP, assim pode-se constatar a importância para o efeito do tratamento no polímero, apresentando um valor de “p” de 0,0046.

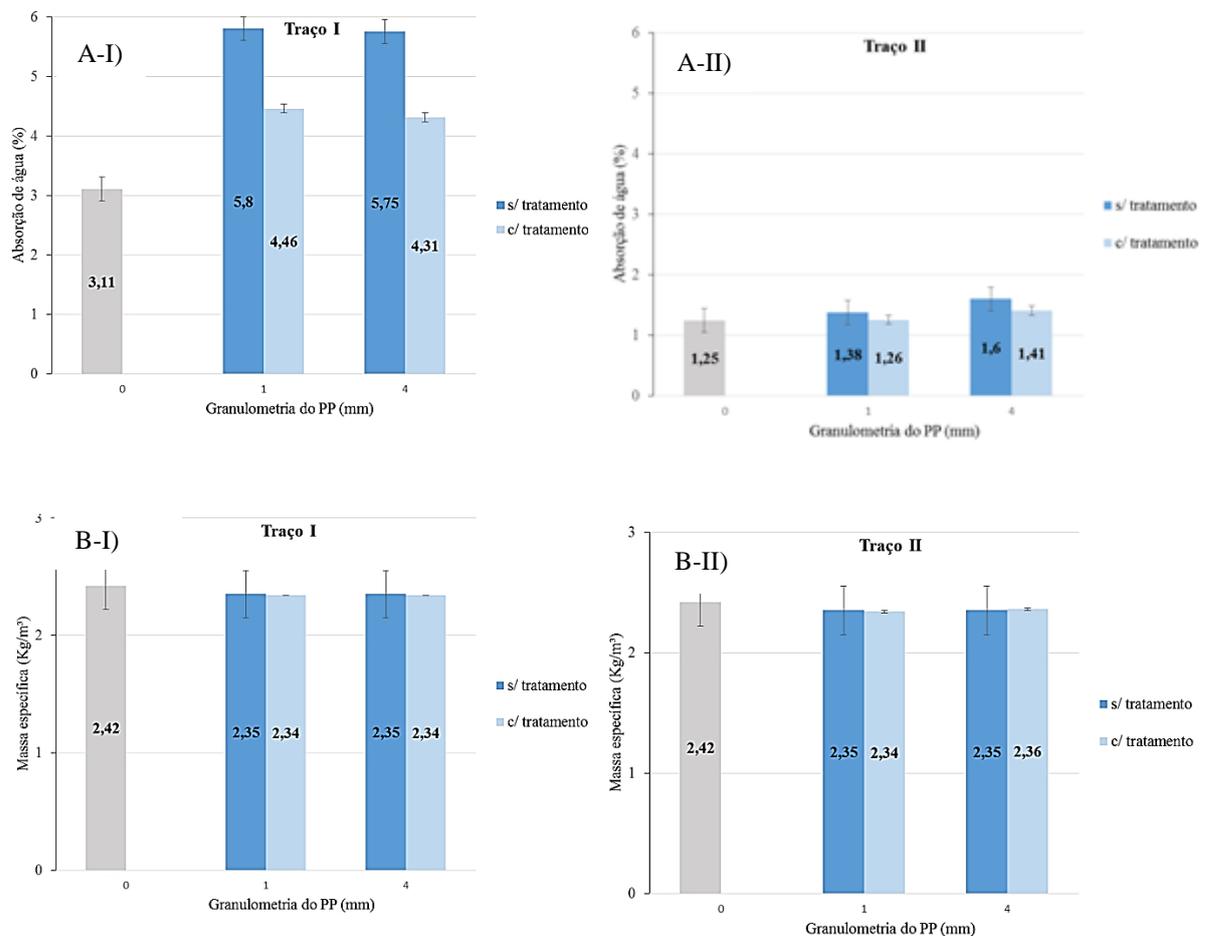
O tratamento superficial do PP contribui para a melhora da interface polímero/concreto. Este fato já foi constatado anteriormente pelas medidas de ângulo de contato. Conforme Buendia et al. (2013), o tratamento superficial modifica quimicamente a superfície do polímero, melhorando a adesão entre o PP e o concreto. Através da análise microscópica, os autores puderam observar um aumento significativo da rugosidade do PP tratado. Na literatura são facilmente encontrados

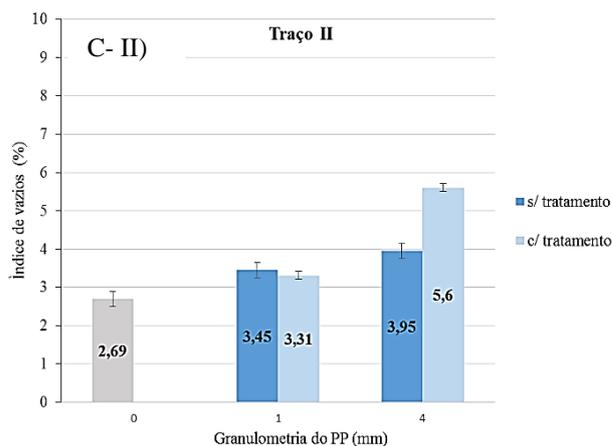
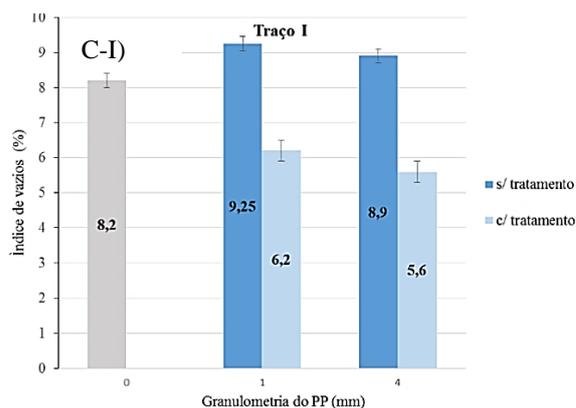
tratamentos de superfície em fibras de PP, para o uso como um reforço com o intuito de reduzir possíveis fissuras do concreto, aumentando, desta forma, à resistência tração na flexão [131].

### 5.1.3.2 Absorção de água, massa específica e índice de vazios

Na Figura 34 estão apresentados os resultados de absorção de água, massa específica e índice de vazios para os corpos de prova dos traços estudados. A granulometria não foi uma variável de grande influência na absorção de água e índice de vazios, principalmente para o traço I. Segundo Taharet al. (2017), além da areia possuir uma porosidade menor que os agregados reciclados, o uso destes resíduos favorece o aumento da porosidade, pois devido ao formato curvo (não planar) e rugosidade das bordas do floco de PP originadas pelo corte, há uma dificuldade na remoção do ar durante a vibração do concreto, favorecendo a formação de vazios [133].

Figura 34: Absorção de água (A-I e A-II), massa específica (B-I e B-II) e índice de vazios (C-I e C-II) para os traços I e II





É de conhecimento comum que estas propriedades são intimamente interligadas. A relação água/cimento de acordo com Parrott (1992) e Neville (2015) determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio de hidratação. Assim, tanto a relação água/cimento como o grau de adensamento têm influência sobre o volume de vazios do concreto. Com isso, observa-se que ocorre um aumento da absorção de água do concreto, e isso é mais evidente para o traço I onde a relação a/c é maior [134,16].

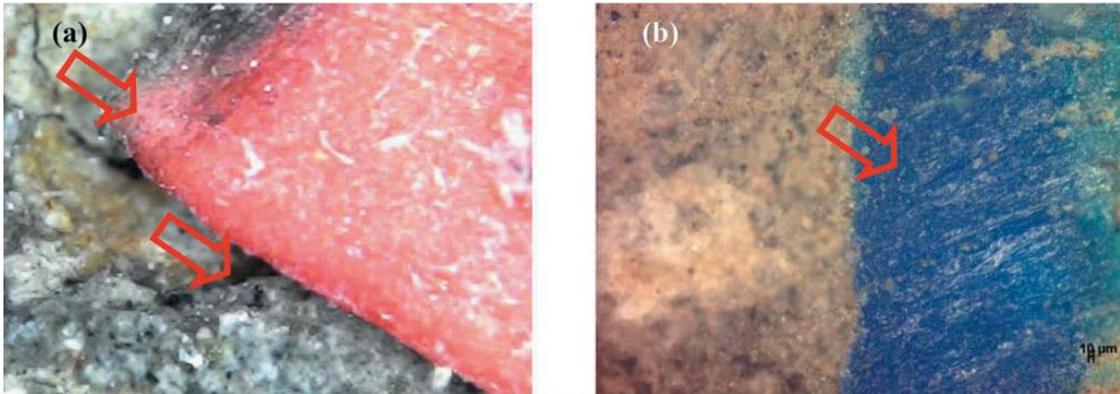
O tratamento superficial realizado no PP proporcionou uma redução no índice de vazios e absorção de água consideráveis, principalmente para o traço I, onde a substituição da areia pelo PP é maior (considerando que as proporções dos traços referência são diferentes) e, com isso, facilitando um maior número de vazios. Para o traço I, a redução do índice de vazios e absorção de água foi de aproximadamente 16% e 25%, respectivamente, e para o traço II, de 5% e 11%. Como já mencionado, essa redução é esperada devido à melhoria da adesão do PP ao concreto.

### 5.1.3.3 Morfologia

A Figura 35 mostra as micrografias correspondentes da superfície do concreto contendo PP sem e com tratamento (TS2). Na Figura 35 (a), observa-se a baixa adesão na interface entre o PP não tratado e a matriz cimentícia, o que leva à formação de vazios na interface. Além disso, a superfície lisa do floco de PP (cor vermelha) não apresenta a formação de cristais de hidróxido de cálcio. Por outro lado, a Figura 35 (b) mostra uma boa adesão na interface entre o floco de PP tratado (cor azul) e a matriz cimentícia, indicando que o tratamento com TS2 favoreceu essa interação na interface [165].

Esses resultados indicam que a baixa afinidade do PP sem tratamento no concreto é devido à sua característica apolar, o que dificulta a adesão do polímero [166] e isso está relacionado ao seu alto ângulo de contato.

Figura 35: Micrografias da superfície do concreto com *flakes* de PP (a) sem tratamento e (b) com tratamento



Uma micrografia da superfície do floco PP tratado com TS2 é mostrada na Figura 36, na qual a ocorre a deposição de cristais na superfície do PP tratado, como pode ser observado. O aparecimento desses cristais de silicato formados pela reação pozolânica na superfície do floco de PP tratado pode ser devido à maior molhabilidade da superfície e à superfície micro-rugosa [25]. A melhora da adesão dos flocos / concreto podem ser justificadas não ocorre apenas pela rugosidade, mas também pela formação de cristais de estrigita que contribui para a melhor molhabilidade com a massa cimentícia, bem como com a adesão. Há diferentes trabalhos que corroboram está melhoria [144, 167-172].

Figura 36: Precipitação de cristais de hidratação na superfície do PP tratado



#### 5.1.4 Caracterização química e física da cinza de casca de arroz sem controle de queima

#### 5.1.4.1 Difração de Raios X (DRX)

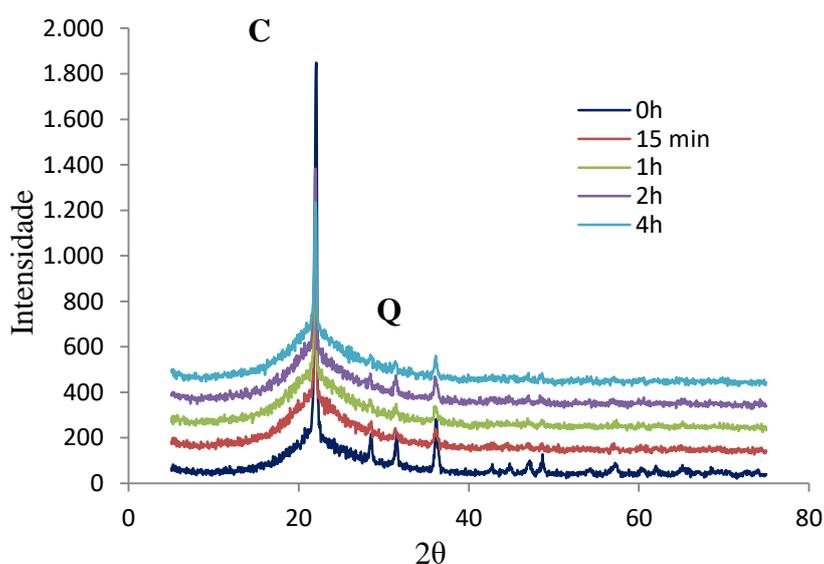
A análise de DRX das CCA (para os tempos de moagem de 15 min, 1h, 2h e 4h) e para as cinzas não moídas (0h) está mostrada na Figura 37 em forma de difratogramas das cinzas moídas.

No difratograma pode-se observar a existência de uma composição mineralógica pelas fases: Quartzo e Cristobalita. A presença de uma região alargada para o difratograma (0h) em torno de  $2\theta = 22^\circ$  corresponde à fração amorfa da cinza da casca de arroz -  $\text{SiO}_2$  amorfo. Conclui-se que a sílica contida nas cinzas sem moagem (0h) possui frações cristalinas e amorfas [135].

Para os difratogramas das cinzas moídas, observa-se um estreitamento do pico da cristobalita quando comparado com o resíduo sem moagem (0h), demonstrando que a sílica cristalina das amostras moídas está presente em uma menor proporção, e essa característica é mais presente para os picos de 2h e 4h de moagem.

As CCA podem conter outros compostos inorgânicos tais como  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , porém em quantidades menores sendo imperceptíveis nos espectros de DRX aqui apresentado [53]. Os autores Rêgo (2004) e Prudêncio (1996) verificaram a presença de fases cristalinas na sílica contida na CCA queimada a elevadas temperaturas, especialmente acima de  $500^\circ\text{C}$ , como ocorrido nos difratogramas das amostras analisadas [9, 136].

Figura 37: DRX das CCA com tempos de moagem



#### 5.1.4.2 Área superficial específica da CCA

As áreas específicas das amostras de CCA foram analisadas por meio de adsorção de nitrogênio (N<sub>2</sub>) pelo método de BET (Brunauer, Emmett, Teller). Na Tabela 18 estão apresentados os resultados da análise da área superficial das CCA após os diferentes tempos de moagem. É possível observar que, conforme o aumento do tempo de moagem (consequentemente a finura) ocorre um aumento da área superficial, com exceção do tempo de moagem de 4h, onde apesar de ter ocorrido uma diminuição do diâmetro médio, houve uma redução da área superficial em comparação com a CCA moída por 2h. Essa redução para um tempo menor de moagem no caso de 2h comparado a 4h é devido a menor granulometria e finura obtida por este último, o que favorece o agrupamento destes resíduos, aumentando a área superficial.

Tabela 18: Resultado da análise de BET das amostras de CCA antes e após moagem

<b>Tempo de moagem</b>	<b>Área superficial (m<sup>2</sup>/g)</b>
0h	14,42
15 min	37,87
1 h	37,75
2 h	48,04
4h	41,45

Em geral, a CCA contém sílica altamente porosa e de elevada área superficial em função das características da própria casca de arroz, lembrando que as CCA utilizadas nesta pesquisa não passaram por nenhum tipo de tratamento térmico.

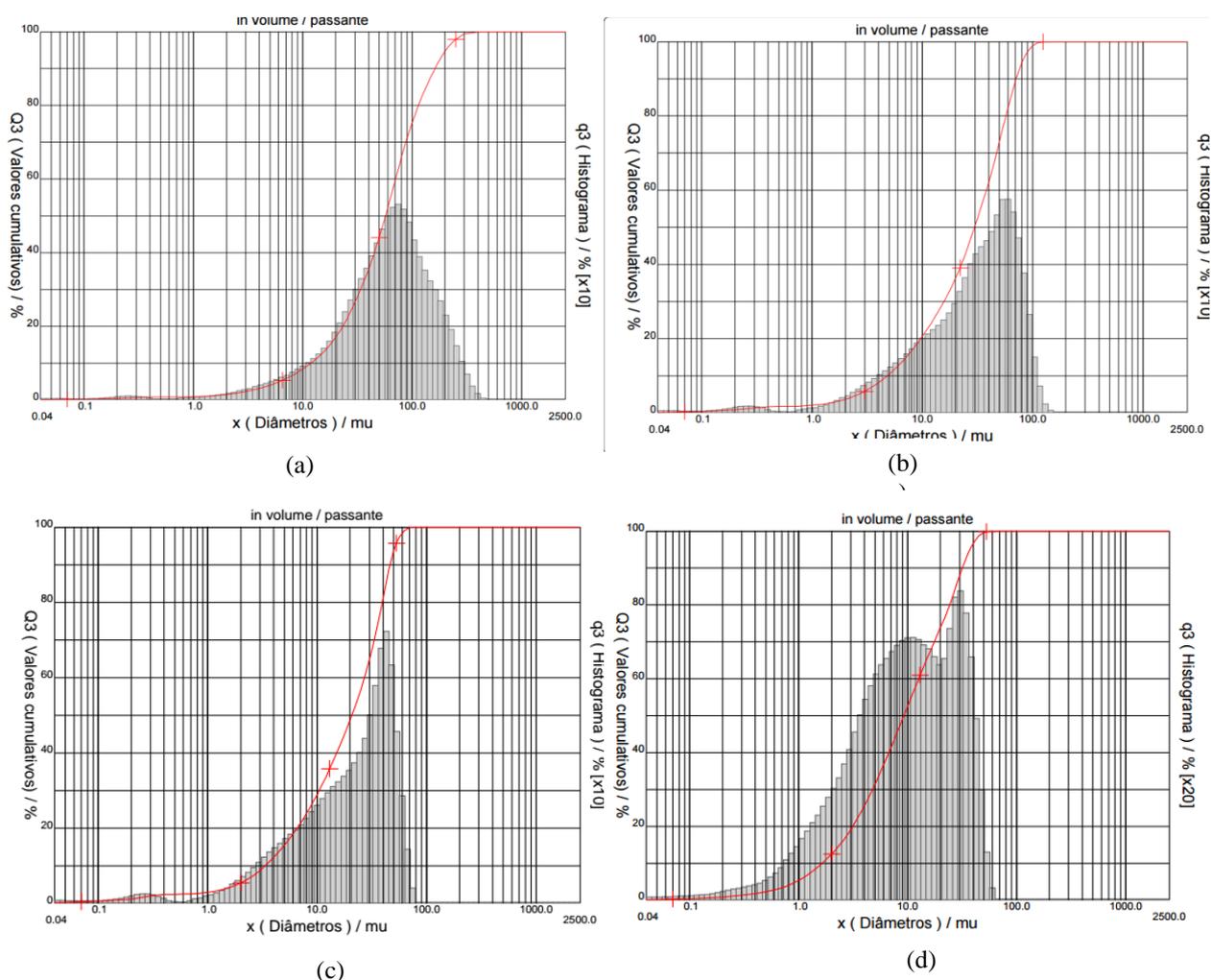
De acordo com Bezerra (2011) a área de superfície específica da CCA tem importante influência na atividade pozolânica, pois está diretamente relacionada à finura do material, interferindo no grau de atividade pozolânica; este comportamento é influenciado pela distribuição, forma e rugosidade superficial das partículas e pela distribuição dos poros existentes [8].

Della et al. (2002) trataram suas amostras a uma temperatura de 700°C por 6 h e por análise de BET, constatou um aumento da área de superfície específica das partículas de 54 para 81 m<sup>2</sup>/g [137]. Silva et al. (2007) observaram que as características da CCA podem variar bastante, conforme o processo de queima ao qual a casca é submetida [138].

### 5.1.4.3 Distribuição granulométrica de CCA

A Figura 38 apresenta a distribuição granulométrica da CCA realizada através da granulometria a laser. As Figura 38 (a) e Figura 38 (b) representam a proporção mássica em função do tamanho de partícula da CCA de moagem de 15 min e 1h, respectivamente. É possível observar que a concentração de partículas foi de aproximadamente 100%, com diâmetro médio de 73,83  $\mu\text{m}$  e 34,48  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Figura 38: Curva granulométrica das amostras de CCA com tempos de moagem de: (a) 15 min (b) 1h (c) 2h (d) 4h



As cinzas que foram moídas por 2h obtiveram um diâmetro médio de 23,21  $\mu\text{m}$  e para 4h de moagem 13,46  $\mu\text{m}$ . Estes resultados indicam que quanto maior é o tempo de moagem, menor é a granulometria da CCA, o que era esperado. De acordo com Tashima (2006) a granulometria é um fator importante para o efeito “filler”, que favorece no aumento da durabilidade do concreto [139].

O tempo ideal de moagem é variável, e depende se as cinzas foram tratadas ou não e a qual temperatura ocorreu a queima.

#### 5.1.4.4 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

Os resultados dos ensaios de compressão axial e do Índice de Atividade Pozolânica - IAP com cimento Portland aos 28 dias de cura, em função da granulometria da CCA estão apresentados na Tabela 19. A argamassa de referência que foi feita para comparar com as CCA com diferentes tempos de moagem obteve uma resistência à compressão de  $31,87 \pm 0,65$  MPa. Observa-se que apenas as cinzas sem moagem não estão em conformidade com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014). As demais cinzas obtiveram um IAP superior a 90%, conforme exigência da referida norma.

Tabela 19: Resultados da compressão axial e do Índice de atividade pozolânica das amostras de CCA nos diferentes granulometrias

Tipo de CCA	Tamanho médio de partícula ( $\mu\text{m}$ )	Resistência à compressão axial (MPa)	IAP* (%)
CCA- 0h	91,16	$31,87 \pm 0,65$	86,83
CCA- 15 min	73,83	$37,83 \pm 1,73$	103,06
CCA- 1 h	34,48	$38,23 \pm 1,15$	106,21
CCA- 2 h	23,21	$42,29 \pm 1,59$	115,22
CCA- 4 h	13,46	$38,60 \pm 0,28$	108,90

\*Limite da NBR 12653 (ABNT, 2014):  $\geq 90\%$

É possível observar que com o aumento do tempo de moagem se obtém um acréscimo na resistência, e também da área superficial (Tabela 19), indicando que o tempo de moagem favorece para o aumento da atividade pozolânica do resíduo. Os diferentes tamanhos de partículas levam a diferentes áreas específicas e, conseqüentemente, influencia na resistência. Algumas pesquisas constataram que após 4h de moagem ocorre um decréscimo da atividade pozolânica da CCA, mesmo ocorrendo o aumento da superfície específica. Esse fato pode ser explicado pela dificuldade da dispersão da CCA na argamassa. Kieling et al. (2008) e Righi (2015) constataram que uma redução brusca da granulometria favorece para que as partículas se agrupem e não reajam com o hidróxido de cálcio liberado no processo de hidratação do cimento, e com isso facilitando para a redução da durabilidade e das propriedades mecânicas [140, 69].

#### 5.1.4.5 Massa específica

Na Tabela 20 estão apresentadas as massas específicas das amostras de CCA para os diferentes tempos de moagem. Observa-se que com a diminuição do tamanho de partícula ocorre um pequeno aumento da massa específica, sendo esse comportamento também constatado na literatura. É importante ressaltar que as CCAs sem controle de temperatura apresentam uma maior massa específica quando comparadas com aquelas produzidas sob controle de temperatura.

Tabela 20: Massa específica das amostras CCA antes e após moagem

<b>Amostras</b>	<b>Tamanho médio de partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Massa específica (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>
CCA- 0h	91,16	1,88
CCA- 15 min	73,83	1,89
CCA- 1 h	34,48	1,99
CCA- 2 h	23,21	2,02
CCA- 4 h	13,46	1,99

Diante dos resultados obtidos nesta etapa, definiu-se a CCA- 23,21  $\mu\text{m}$  (2h) como sendo a finura “ótima”, e foi baseada como “ótima” também pela distribuição granulométrica e também no IAP do material, pois se buscava um material com uma menor finura para a obtenção de uma maior reatividade.

## 5.2 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA: CONCRETO HÍBRIDO

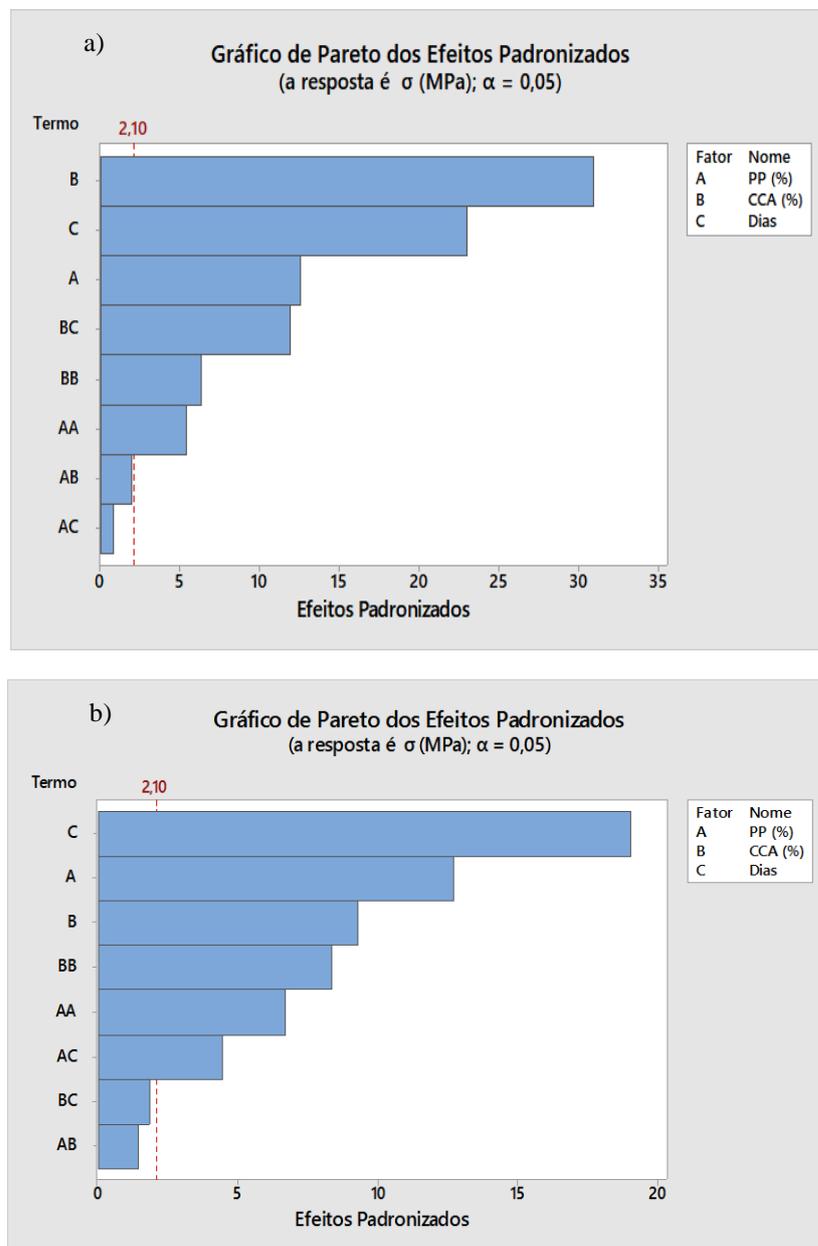
Nessa etapa foi empregado o planejamento de experimentos mostrado na Tabela 11, onde foram utilizados os resultados ótimos obtidos nas etapas 1 e 2. Na primeira etapa foi constatado que o PP com a granulometria de 4 mm tratado com TS2 apresentou resultados mais satisfatórios. Na segunda etapa constatou-se que o tempo de moagem da cinza que proporcionou melhores resultados foi o de 2 horas correspondente ao tamanho de partícula média de 23,21  $\mu\text{m}$ . Sendo assim, justifica-se o emprego destes dois resíduos no concreto com melhor desempenho para a realização da terceira etapa.

### 5.2.1 Avaliação do comportamento mecânico

### 5.2.1.1 Resistência à compressão simples

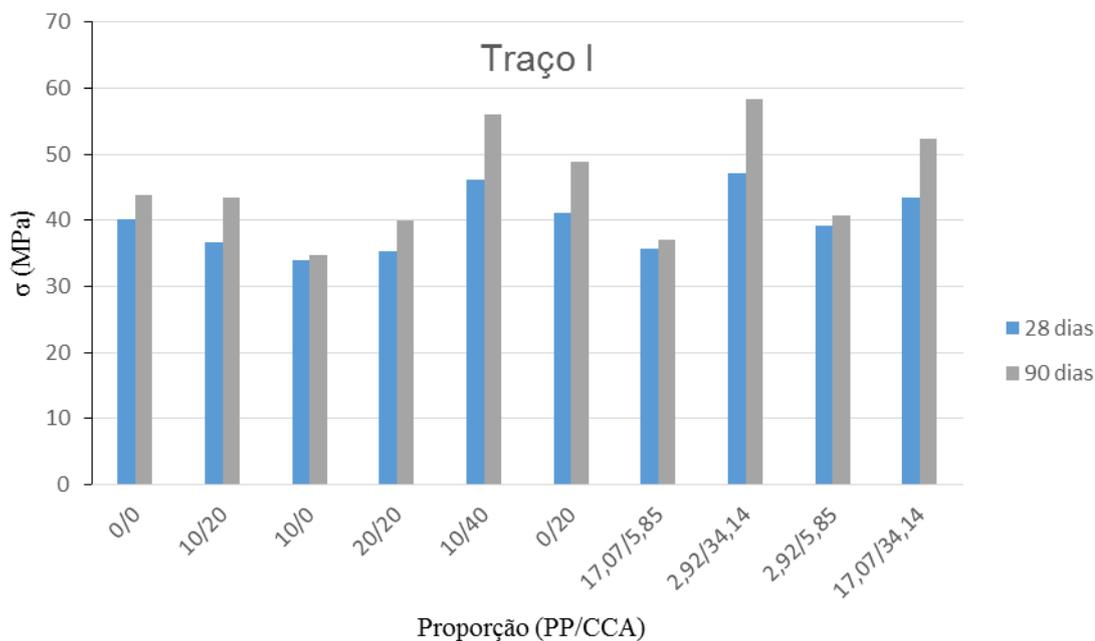
Na Figura 39 são apresentados os gráficos de Pareto para os traços estudados. Nota-se a influência da incorporação dos flocos de PP e CCA na resistência à compressão do concreto. Para o traço I a interação AC (PP/dias) e para o traço II a interação AB (PP/CCA) e BC (CCA/dias) não influenciaram de forma significativa nesta propriedade estudada.

Figura 39: Gráfico de Pareto da resistência à compressão axial: a) Traço I; b) Traço II



Na Figura 40 são apresentados os resultados da resistência à compressão para o traço I aos 28 e 90 dias de cura.

Figura 40: Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para o traço I



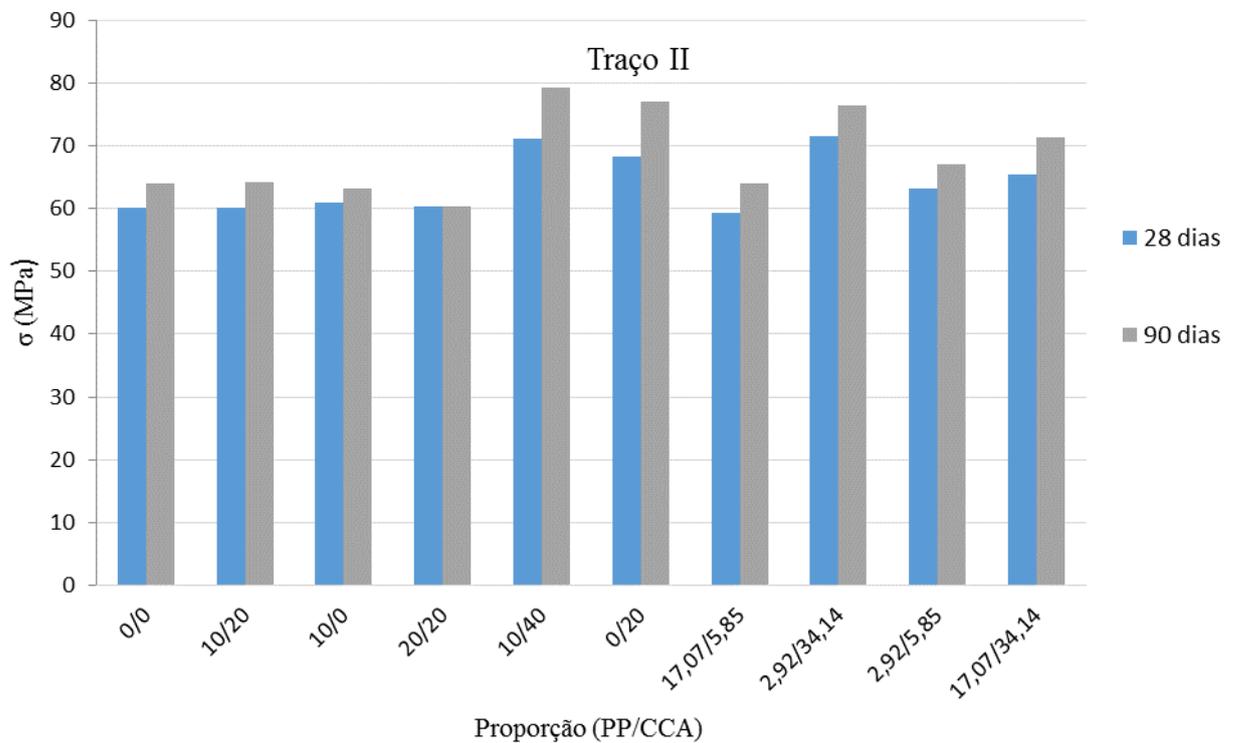
É possível observar que a maioria dos corpos de prova do traço I aos 90 dias de cura alcançaram a resistência de 40 MPa, com exceção aos traços PP/CCA de: (10%, 0%) e (17,07%, 5,85%), e entre esses, sendo o segundo com valor superior ao primeiro. O traço PP/CCA de: (2,92%, 34,14%) apresentou resistência próxima a 60 MPa.

Outros autores também avaliaram a influência da CCA na resistência à compressão axial e observaram que a curto prazo, o aumento da resistência do concreto com CCA é menor que a referência. No entanto, a longo prazo, os resultados indicaram maior atividade pozolânica no concreto com CCA. Em 3 dias de cura a resistência à compressão era de 65% do concreto convencional, e esse valor aumentou para 96% em 90 dias e 98% aos 180 dias, sugerindo que as avaliações devem ser realizadas acima de 90 dias de cura [141, 100]. Isso ocorre devido à absorção de água tardia pela CCA que, conseqüentemente, gera uma hidratação lenta, onde aos poucos essa água é liberada ocorrendo a hidratação e favorecendo o aumento da resistência à compressão aos 90 dias [142, 101].

Na Figura 41 tem-se os resultados de resistência à compressão axial para os corpos de prova do traço II. Nota-se que, diferentemente do que ocorre nos corpos de prova do traço I, a incorporação do PP não contribui fortemente para que ocorra uma redução drástica da resistência. Esse fato é

devido ao traço empregado, onde o volume de areia utilizado na mistura é menor e, consequentemente, um menor volume do polímero é incorporado. Todos os corpos de prova do traço II alcançaram a resistência mínima de 60 MPa, mesmo com maiores teores de substituições do PP, como no caso do traço PP/ CCA de: (17,07 %, 5,85%), para substituições com elevado teor de CCA, como o traço PP/ CCA de: (10 %, 40 %) que alcançou a resistência de 79,33 MPa aos 90 dias de cura.

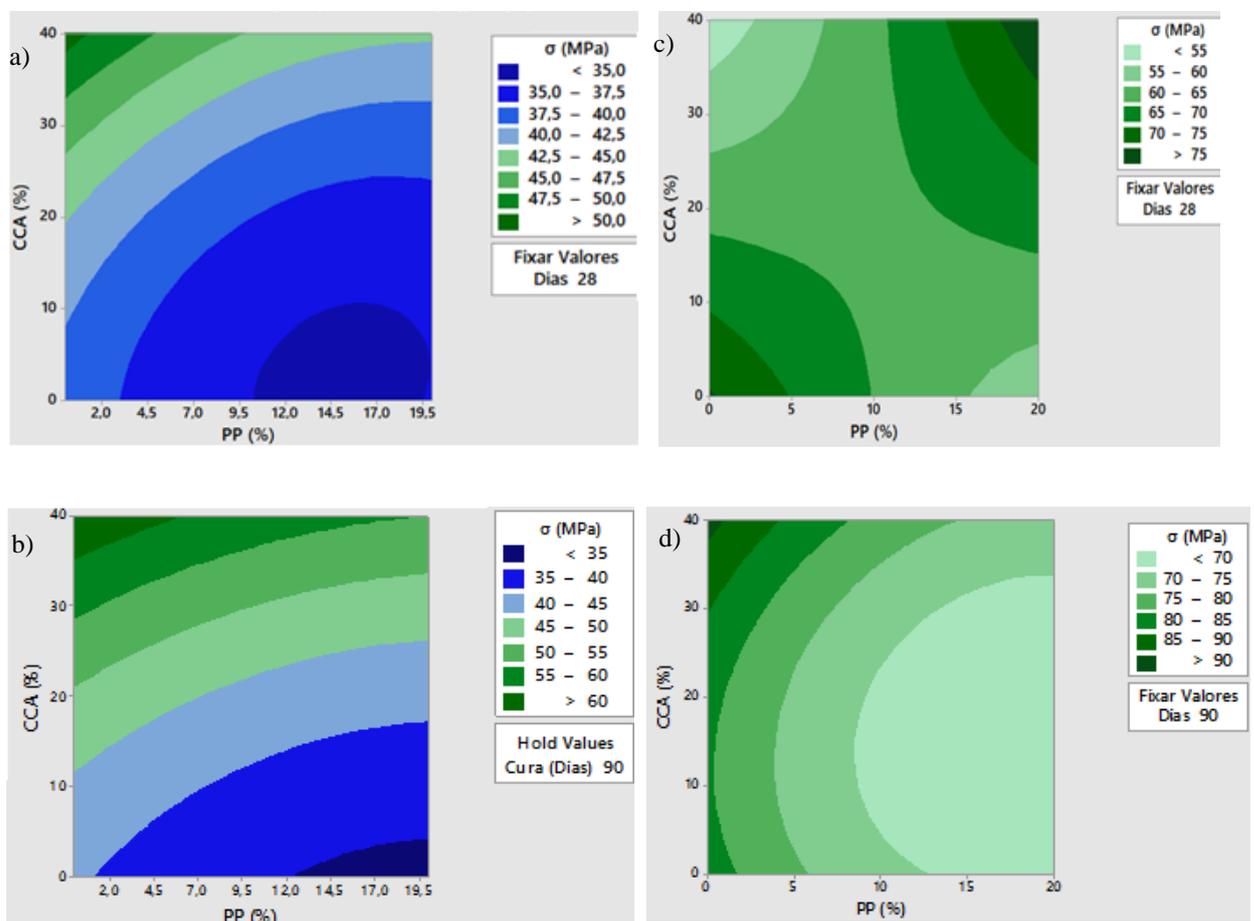
Figura 41: Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para o traço II



Neste ensaio foram realizados na ordem sugerida pelo Minitab, tomando-se os cuidados necessários com a moldagem, cura e realização do próprio ensaio. Os resultados foram fornecidos ao programa para a análise estatística, que originou o modelo de regressão com unidades não codificadas, além de identificar os fatores significativos e valores espúrios. Inicialmente foi realizada uma análise do resultado adquirido para os traços I e II, excluindo-se os fatores não significativos e corrigindo-se resultados atípicos, quando imprescindível. Ao final dessa análise, chegou-se a um modelo, composto de duas equações (uma amostra para cada traço empregado), para previsão da resistência à compressão simples das misturas estudadas e outras semelhantes, e estas equações estão apresentadas no Anexo B.

Na Figura 42 é possível confirmar que as maiores resistências das misturas são obtidas com maiores teores de CCA para ambos os traços. Além disso, pode-se relacionar um determinado teor de PP com um dado teor de CCA para verificar a resistência aproximada que a mistura pode atingir. Cabe ressaltar que esses gráficos podem ser obtidos para qualquer tempo de cura entre 28 e 90 dias, considerados no planejamento experimental, porém extrapolações com relação aos limites utilizados na pesquisa não devem ser realizadas.

Figura 40: Gráfico de contorno de resistência à compressão axial para: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



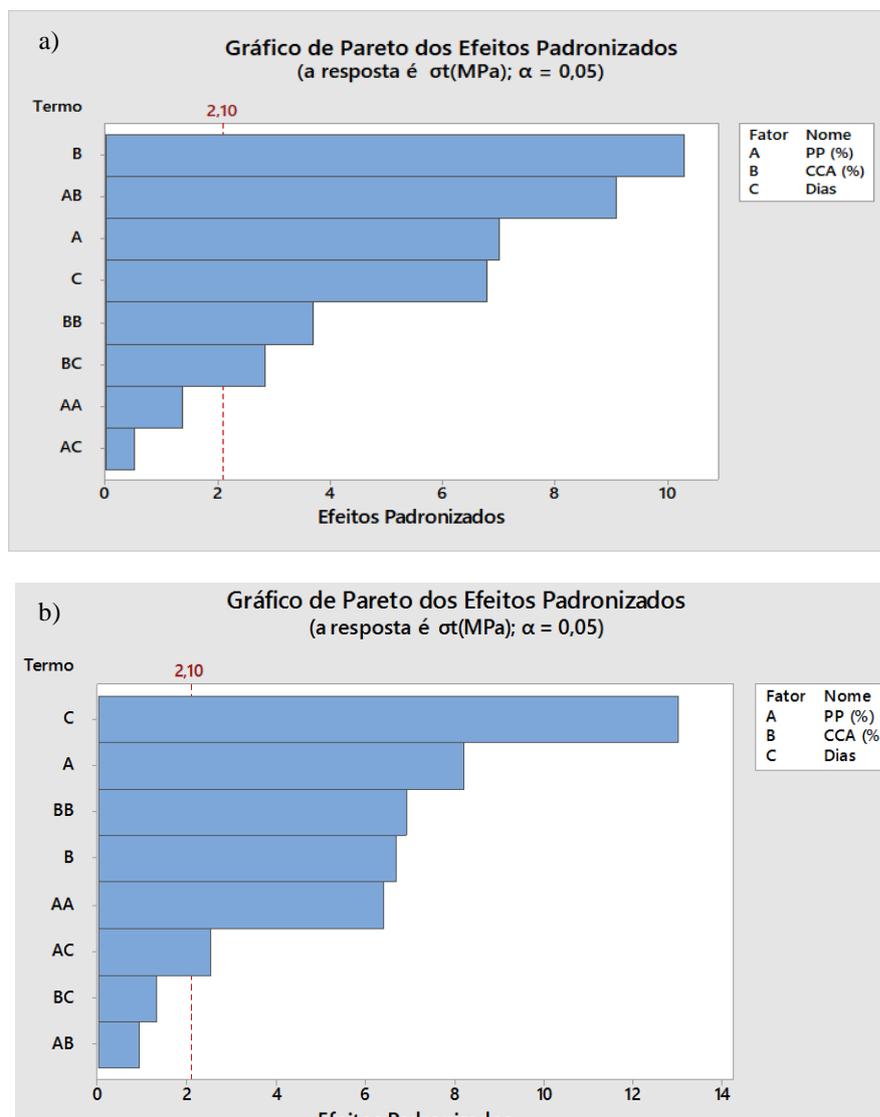
Observa-se que a superfície de resposta para o traço II-c é mais curva, e isso ocorre possivelmente devido a um ruído da leitura do software. Os maiores valores de classificação para a resistência axial estão no canto superior esquerdo do gráfico, que corresponde a altos teores de CCA, para um menor teor de PP, sendo esse comportamento observado para ambos os traços. Como mencionado

anteriormente o aumento da resistência à compressão com o tempo de cura ocorre devido às reações pozolânicas tardias.

#### *5.2.1.2 Resistência à tração por compressão diametral*

Na Figura 43 são apresentados os gráficos de Pareto para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD). Nota-se que os resíduos foram significativos para ambos os traços, sendo a CCA a variável de maior influência para o traço I, devido a este resíduo favorecer no empacotamento microestrutural, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a resistência. Importante mencionar que a interação entre os resíduos também foi significativa, pois os possíveis vazios gerados pela adição dos flocos de PP podem ser preenchidos pela CCA. Para os corpos de prova do traço II o tempo de cura teve uma maior influência devido às reações pozolânicas da CCA acontecerem tardiamente.

Figura 43: Gráfico de Pareto de RCD do a) Traço I; b) Traço II

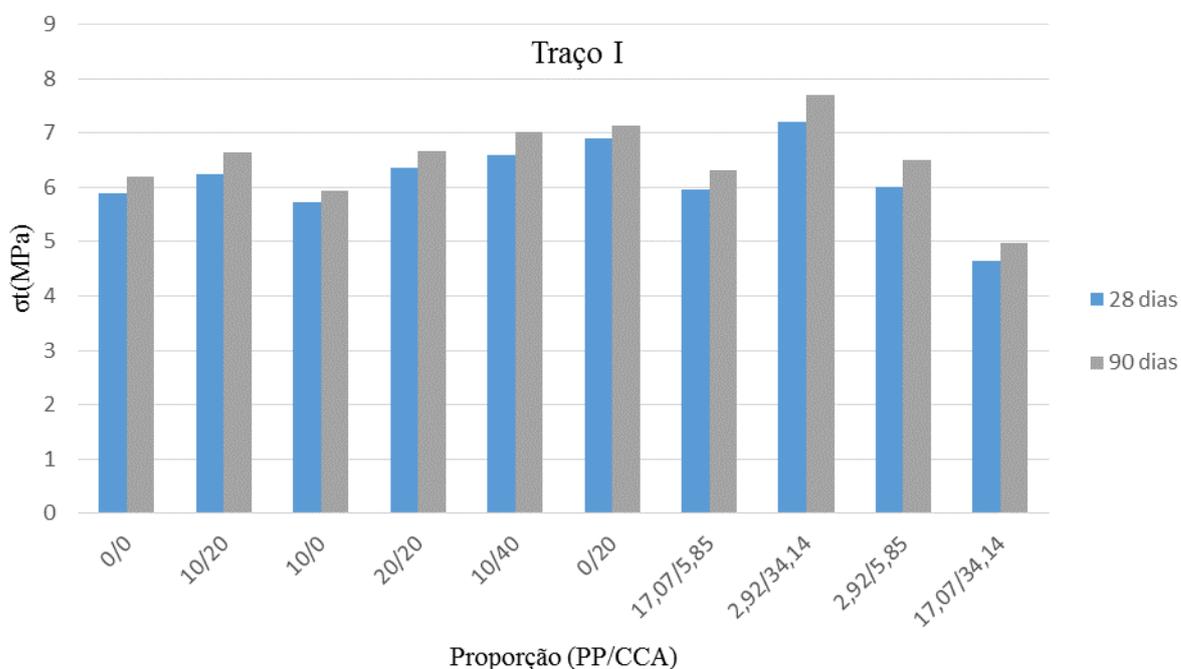


Na Figura 44 pode ser visualizado o resultado obtido para a resistência à tração por compressão diametral (RCD) do traço I. Com base nos resultados, constatou-se que a adição de PP e CCA influenciaram de forma significativa na resistência à tração por compressão diametral. Os traços com maiores teores de PP apresentaram uma resistência menor quando comparados ao traço referência.

Os traços com maiores teores de CCA apresentaram elevações dos valores obtidos ao incorporar o resíduo, independentemente da idade. E isso ocorre devido ao efeito micro *filler* juntamente com as reações pozolânicas das CCA. A partícula fina da CCA mostra maior atividade pozolânica

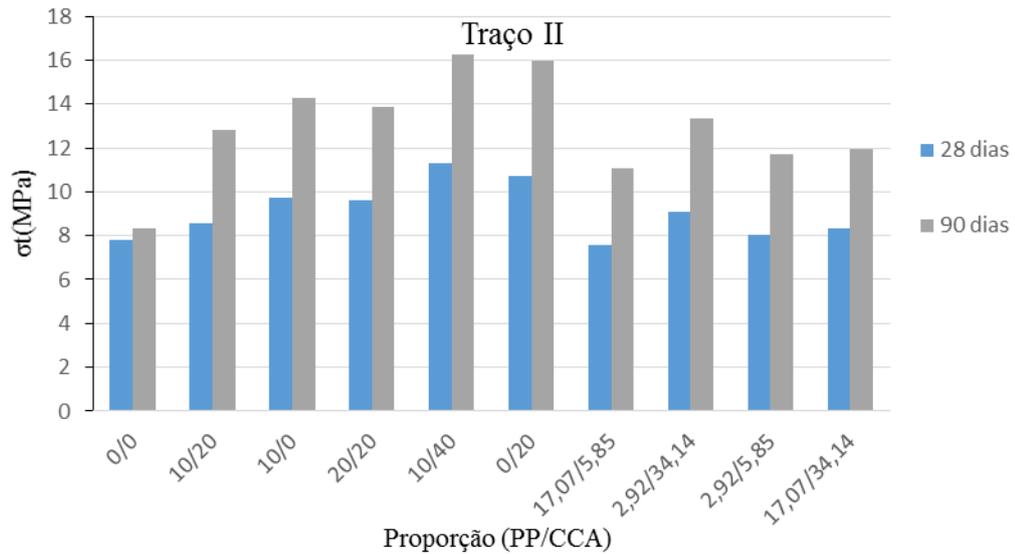
quando usada parcialmente com cimento. O concreto apresenta mudanças microestruturais notáveis devido à sua ação pozolânica e filler da CCA [143].

Figura 44: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o traço I



A Figura 45 apresenta a resistência à compressão diametral dos corpos de prova do traço II analisados aos 28 e 90 dias. A substituição da CCA e PP pelo cimento e a areia, respectivamente, mostrou alterar de forma significativa os resultados. Percebe-se que os valores de resistência à tração por compressão diametral dos traços ficaram na sua maioria muito próximos, apenas tendo uma redução de 3,3% no traço PP/CCA (17,07%-5,85%). Ainda é possível observar que a resistência tende a aumentar com o aumento da idade, sendo mais notório esse aumento para os traços com um maior teor de CCA. Pandey et al. (2019) verificaram o incremento desta propriedade com a incorporação da CCA, esta propriedade é fortemente relacionada ao ensaio de resistência à compressão axial [108].

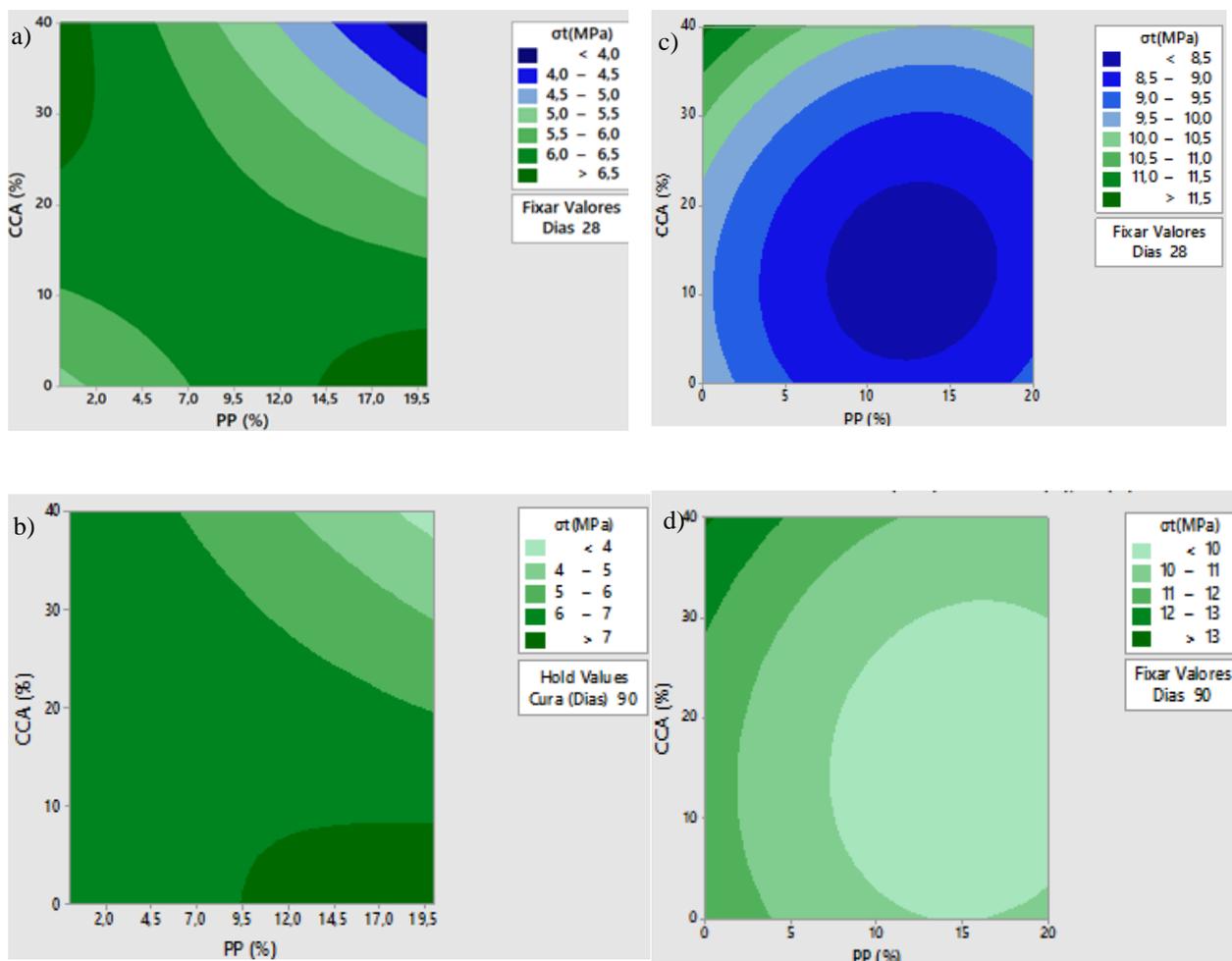
Figura 45: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o traço II



Com o aumento do teor de PP ocorre uma redução da RCD para ambos os traços. Comportamento constatado também por Al-Manaseer et al. (1997) que observaram uma queda na resistência à tração com o acréscimo do teor dos agregados de plástico. Os autores também expuseram que os corpos de prova de concreto contendo agregados plásticos, sob carga de compressão, não ofereceram ruptura do tipo frágil, como é comumente esperada no concreto convencional [144].

Na Figura 46 são apresentadas as curvas de nível do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, dos traços estudados. Para verificar o comportamento da interação entre duas variáveis, foram desenvolvidos gráficos de contorno considerando a relação entre o teor de PP e de CCA aos 28 e 90 dias de cura.

Figura 46: Gráfico de contorno de RCD dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



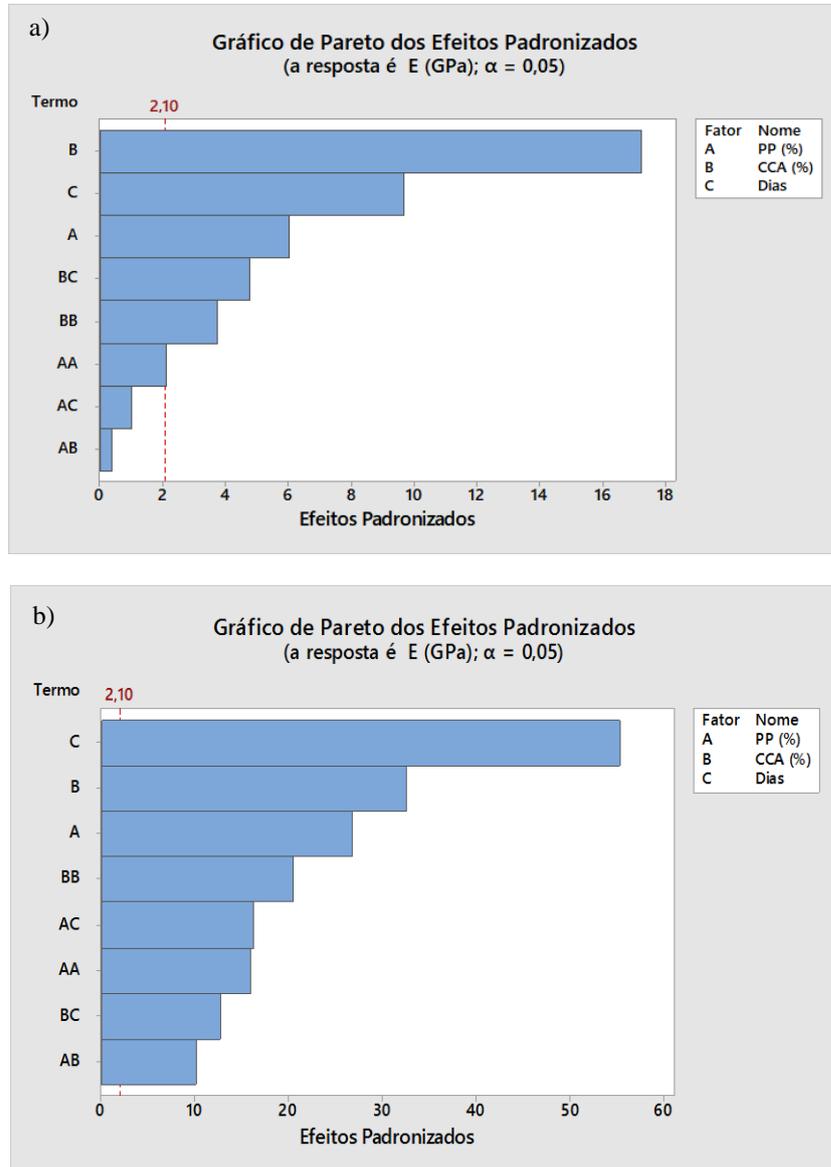
A partir da Figura 46, observa-se que o efeito da porcentagem de PP é menor para maiores teores de CCA. Além disso, há maior influência dos fatores analisados nos parâmetros de resistência à tração por compressão diametral no traço II, pois o intervalo de valores é diferente, e existem mais níveis dentro desse (8 níveis para traço II e 7 para o traço I aos 28 dias de cura), aos 90 dias os valores dos intervalos são diferentes e as mesmas quantidades de níveis: 5.

### 5.2.1.3 Módulo de elasticidade

Na Figura 47 são apresentados os gráficos de Pareto do módulo de elasticidade dos corpos de prova avaliados para apresentar a significância estatística dos resultados. Observa-se que para os corpos de prova do traço I a interação AC e AB não teve influência significativa, ao contrário que

ocorre para os corpos de prova do traço II, onde as variáveis e suas interações influenciaram significativamente nesta propriedade.

Figura 47: Gráfico de Pareto do Módulo de elasticidade do: a) Traço I; b) Traço II

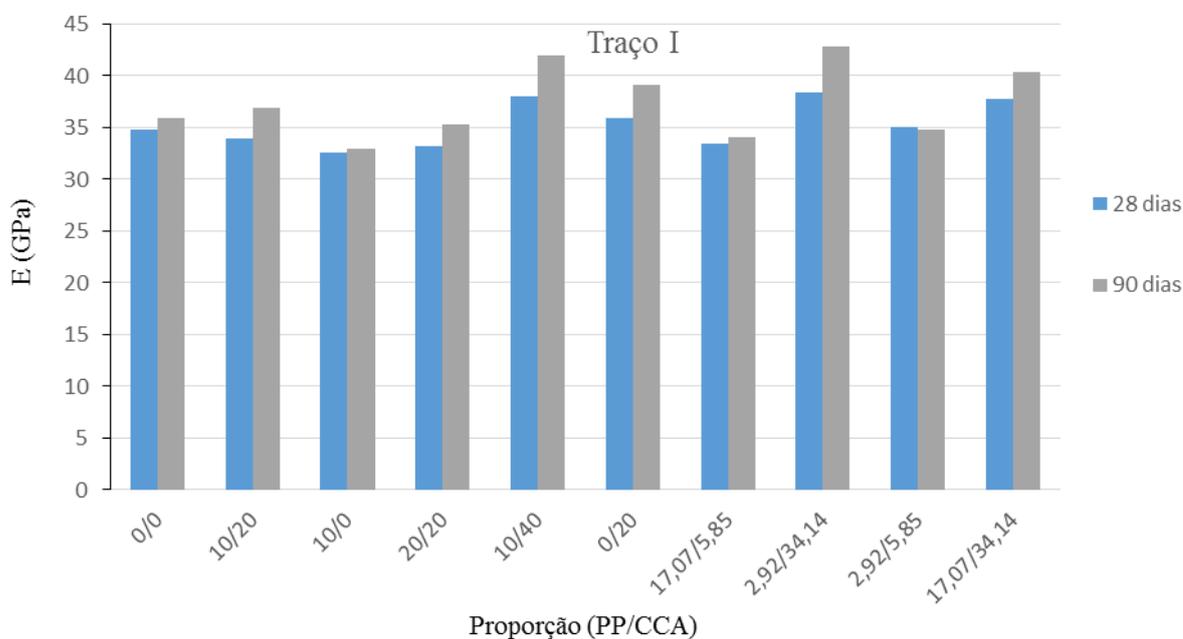


Foram realizadas leituras referentes ao módulo de elasticidade dos corpos de prova de ambos os traços. Foram ensaiados 28 CPs de cada traço (I e II) e 6 CPs do ponto central, resultando em um total de 62 CPs, o que gerou um modelo de regressão para cada traço que encontra-se nas Equações 9 e 10 (Traço I) e 11 e 12 (Traço II) no Anexo B.

Na Figura 48 são apresentados os resultados para os corpos de prova do traço I. É possível observar uma redução da rigidez do concreto com a incorporação do PP, principalmente para os maiores teores.

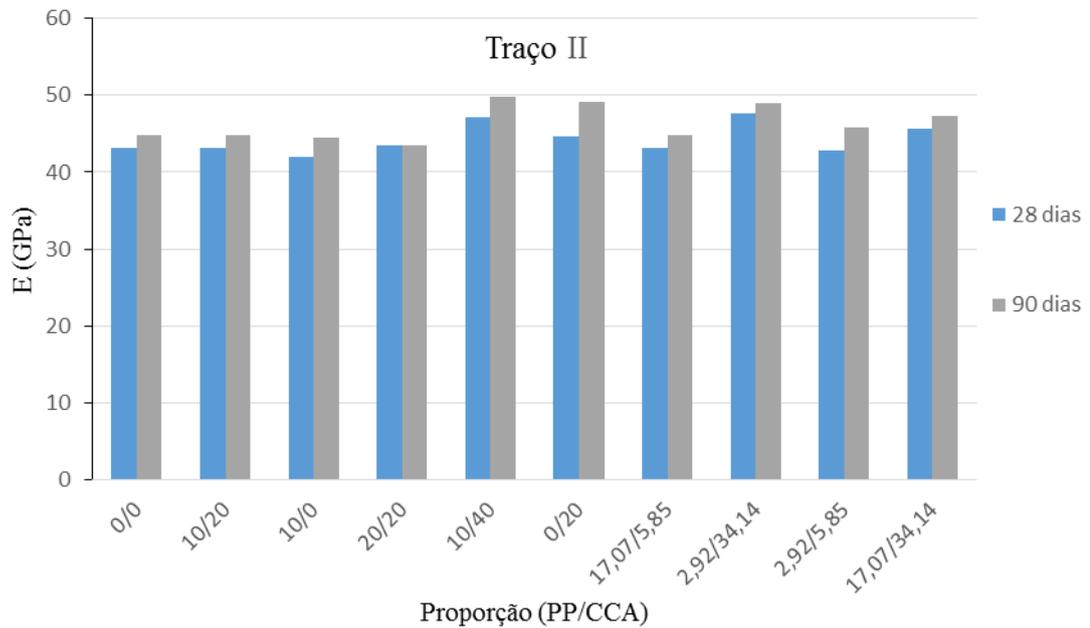
No entanto, trabalhos recentes na literatura mostram que misturas de concreto feitas com uma substituição parcial de areia pelo agregado plástico, onde apresentam um módulo de elasticidade menor que pode levar a uma mistura mais dúctil com capacidade aprimorada para resistir a impacto [171].

Figura 48: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço I



Na Figura 49 são expostos os resultados do módulo de elasticidade para os corpos de prova do traço II. Assim como ocorreu nos corpos de prova do traço I, a inserção do PP reduziu a rigidez quando comparado ao material referência, ao contrário do que ocorre com a incorporação da CCA, que para maiores teores apresentou uma elevada rigidez. O traço PP/CCA (10%-40%) aos 90 dias de cura apresentou um aumento de 11,3% quando comparado ao material referência.

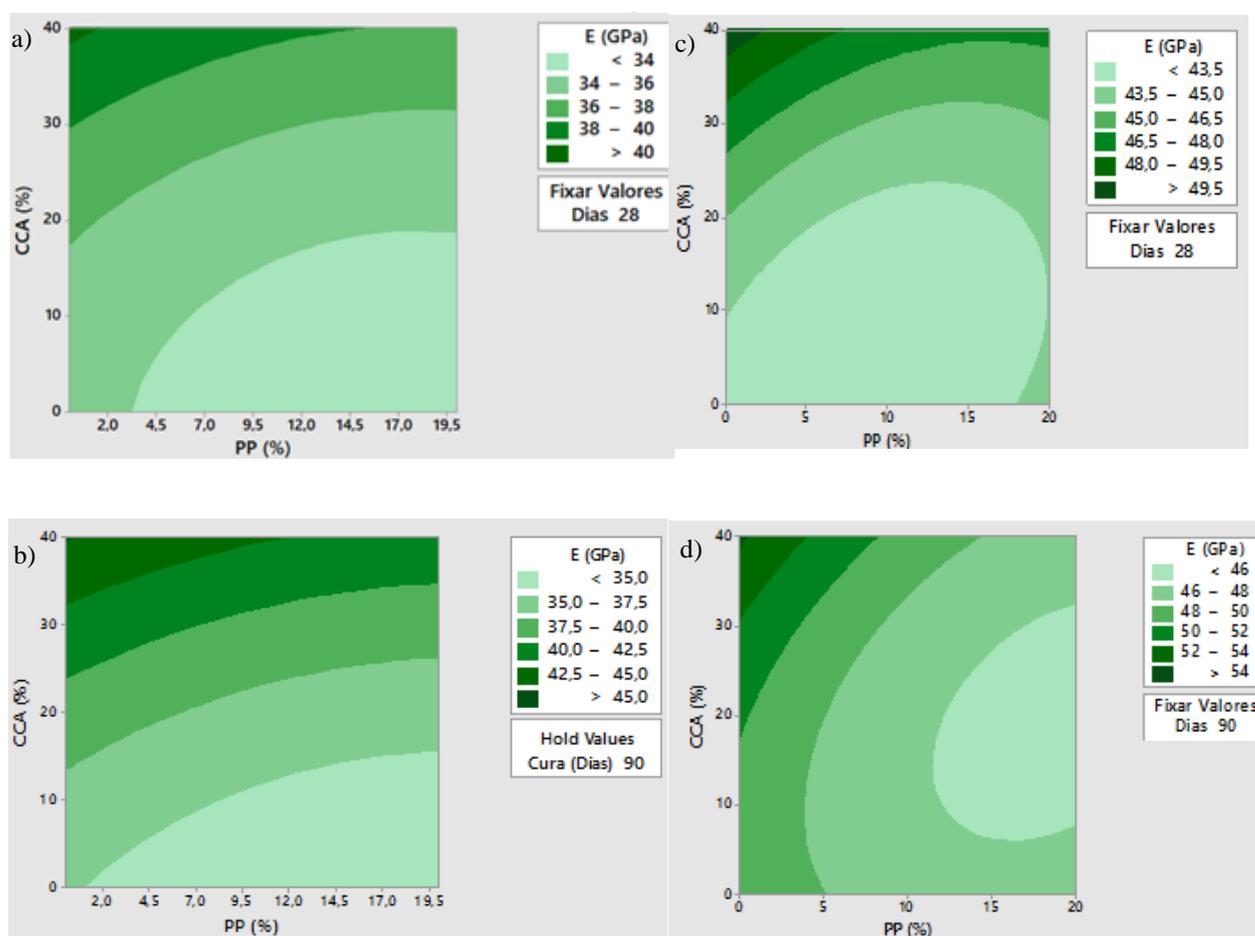
Figura 49: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade para o traço II



O aumento do módulo de elasticidade dos traços com teores mais elevados de CCA ocorre devido à sua maior superfície específica [145]. Esse aumento da rigidez também advém da reação pozolânica do resíduo que produz um “gel” de C-S-H adicional ao concreto, preenchendo os vazios presentes no concreto [146, 147].

Na Figura 48 observa-se que os resultados do traço II para 28 dias de cura apresentaram maior número de níveis quando comparados aos resultados do traço I no mesmo tempo de cura. Isso indica que para o traço II, os resíduos acrescentados interferem mais do que para o traço I, o que é corroborado pelo gráfico de Pareto (Figura 50).

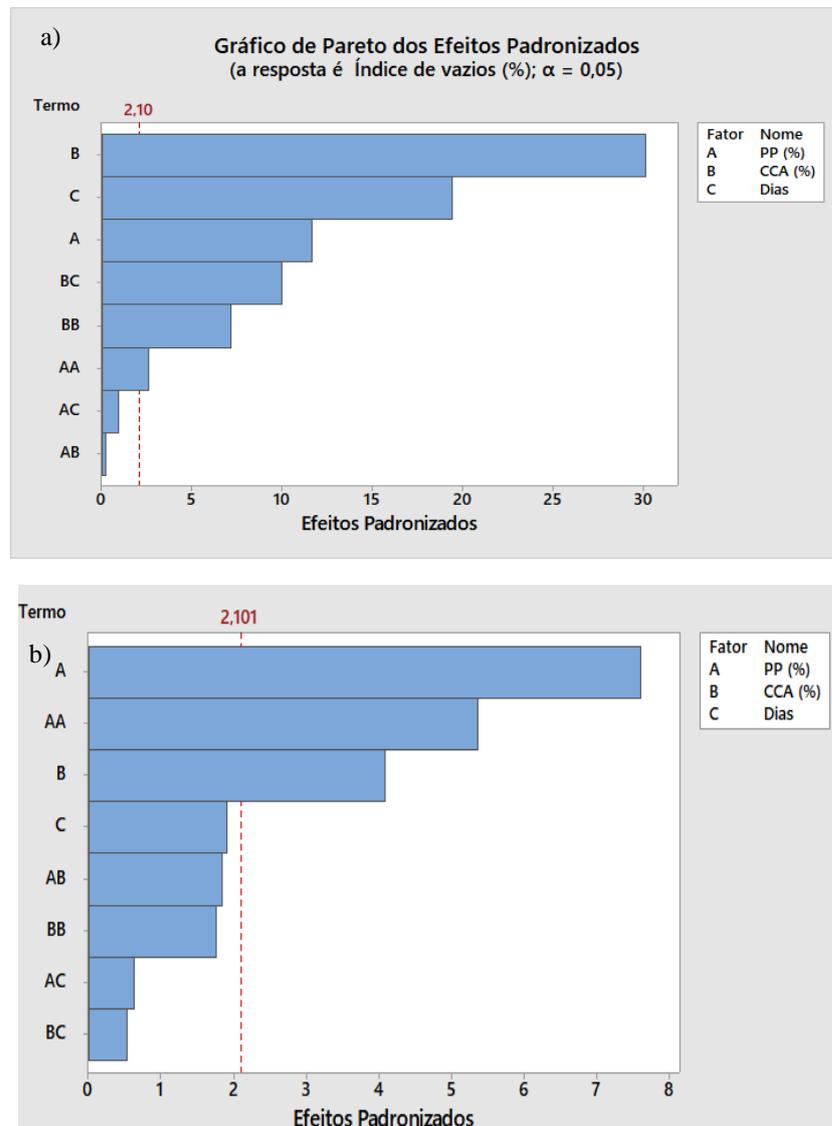
Figura 50: Gráfico de contorno do Módulo de elasticidade dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



#### 5.2.1.4 Índice de vazios

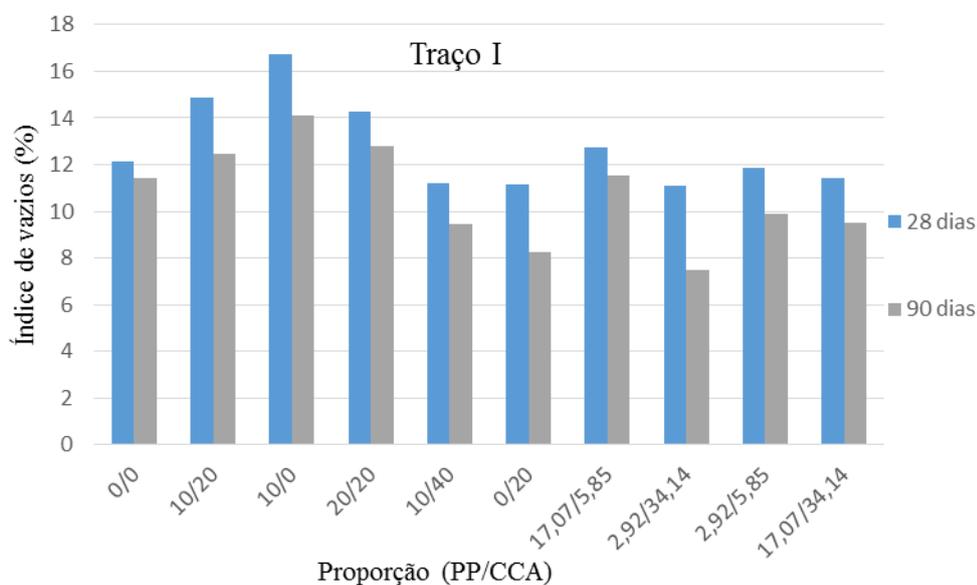
O gráfico de pareto mostrado na Figura 51 relaciona os resíduos incorporados ao concreto e o tempo de cura para o índice de vazios. O resíduo que mais influenciou os corpos de prova do traço I é a incorporação da CCA e, para os corpos de prova do traço II, a incorporação de PP, de acordo com o gráfico apresentado. Nota-se a influência dos resíduos e o tempo de cura para o traço I e também das interações: BC, BB e AA. Para o traço II os resíduos influenciaram significativamente, bem como a interação AA.

Figura 51: Gráfico de Pareto do Índice de vazios (90 dias) do: a) Traço I; b) Traço II



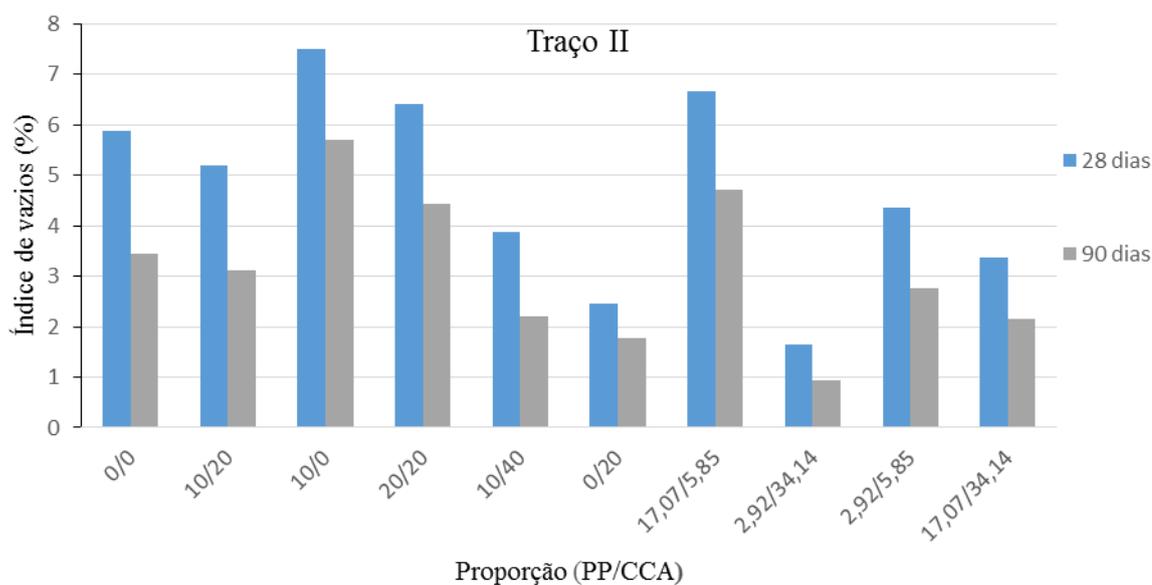
Os resultados para a determinação do índice de vazios para os corpos de prova do traço I estão apresentados na Figura 52. No gráfico é possível observar que a adição de CCA influenciou significativamente na redução dos vazios presentes nos corpos de prova, sendo também influenciado significativamente pelo tempo de cura. A adição de resíduos pozolânicos como a CCA melhora as propriedades de durabilidade do concreto devido a granulometria da CCA ser inferior ao do cimento. Segundo os autores Pandey et al. (2019) os vazios apresentados após o processo de hidratação são preenchidos pelas partículas mais finas, levando à densificação da microestrutura. [108]. A densificação melhora a zona de transição interfacial (ZTI) e consequentemente reduzindo o índice de vazios [148].

Figura 52: Resultado do ensaio de índice de vazios do traço I



Na Figura 53, que mostra os resultados de índice de vazios para o traço II, nota-se uma influência significativa da incorporação do PP na substituição parcial da areia pelo PP (traço PP/CCA de 10%-0%) favorecendo para um aumento de 65,2% do teor de vazios quando comparado ao material de referência.

Figura 53: Resultado do ensaio de índice de vazios do traço II

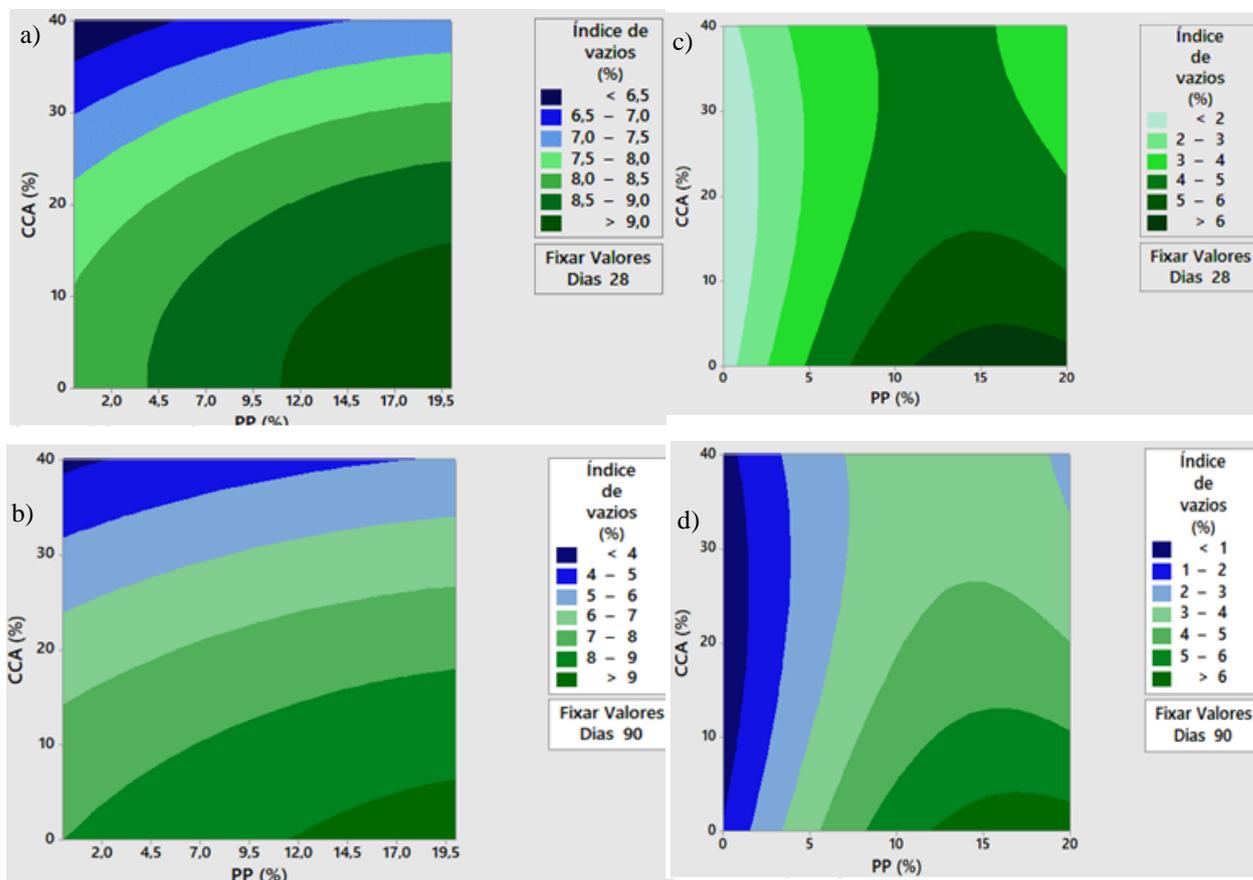


Há poucos estudos envolvendo agregados plásticos reciclados de PP em forma de grãos, a em grande parte é empregado em forma de fibras. A utilização do PP como agregado miúdo tende a aumentar o teor de vazios, devido ao formato das partículas de PP, que faz com que a pasta não consiga preenchê-los adequadamente, favorecendo por torná-lo um concreto mais poroso. Conforme a literatura uma geometria considerada ideal para o preenchimento dos vazios é do formato esférico e superfície rugosa, como é o caso da areia [149].

Para teores maiores de CCA o concreto apresentou menor índice de vazios, isso ocorre devido a reação de hidratação deste resíduo formando um gel de C-S-H como resultado da reação entre o hidróxido de cálcio com a CCA, favorecendo a melhora da durabilidade do concreto, pois preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução e conseqüentemente reduzindo os vazios [150].

Na Figura 54 são apresentados os gráficos de contorno para ambos os traços nos 2 diferentes tempos de cura: 28 e 90 dias. Nota-se que as combinações de menores valores de índice de vazios são quando se alinham os menores teores de PP com maiores teores de CCA. É possível observar que houve maior influência dos fatores analisados para o traço I aos 28 e 90 dias de cura, pois existem mais níveis dentro desse (7 níveis), e para o traço II aos 90 dias (7 níveis), é importante salientar na Figura 54-C e 54-d as curvas se diferenciam demais devido a um possível ruído experimental.

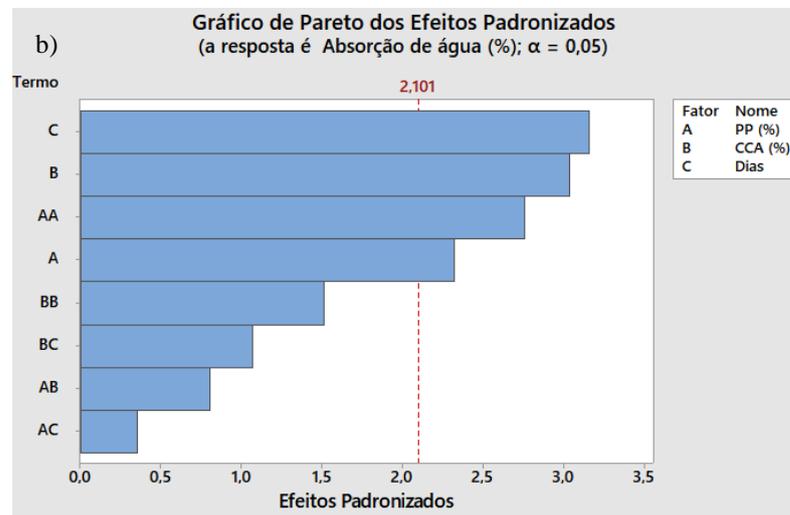
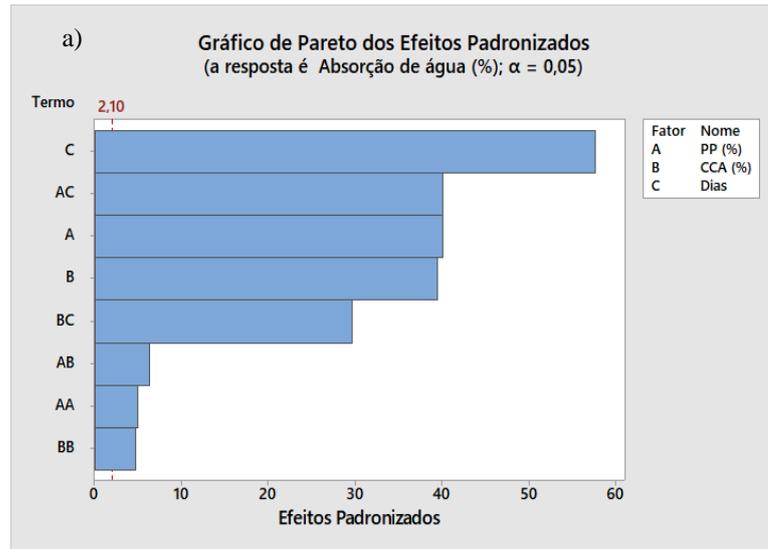
Figura 54: Gráfico de contorno de Índice de vazios dos corpos de prova do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



### 5.2.1.5 Absorção de água

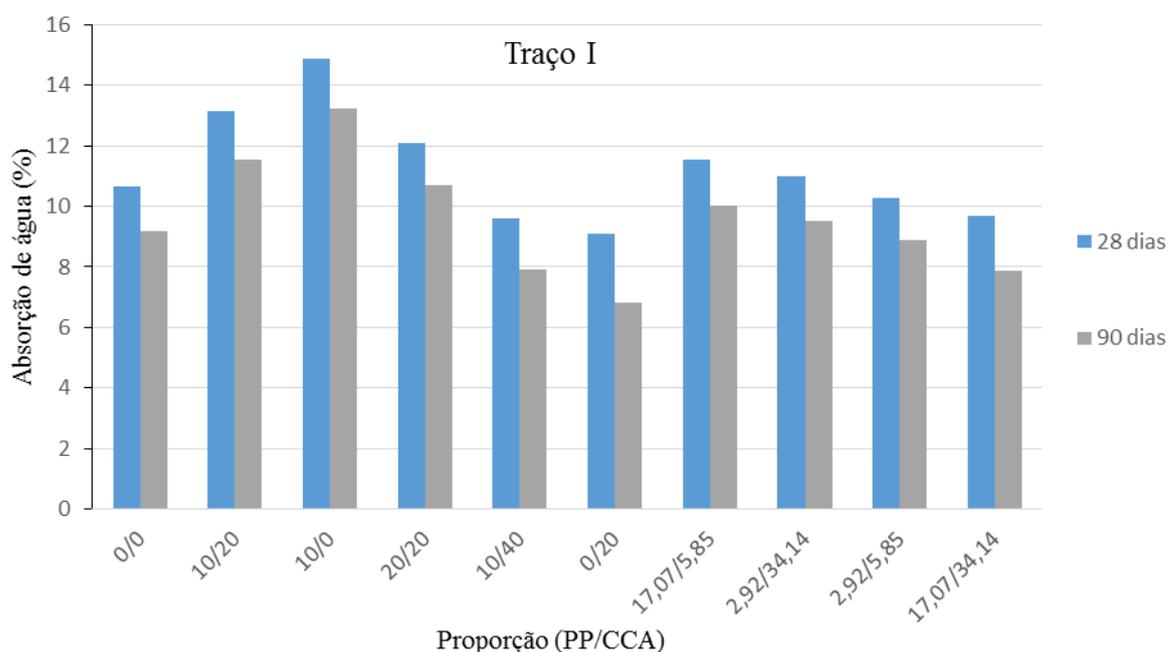
Nota-se através do gráfico de Pareto para os corpos de prova do traço I, que o tempo de cura teve uma influência significativa, bem como interação AC e BC. No traço II somente a interação AA foi significativa e as variáveis: tempo de cura, seguido da CCA e do PP influenciaram estatisticamente nesta propriedade do material (Figura 55).

Figura 55: Gráfico de Pareto da Absorção de água (90 dias) dos corpos de prova do: a) Traço I; b) Traço II



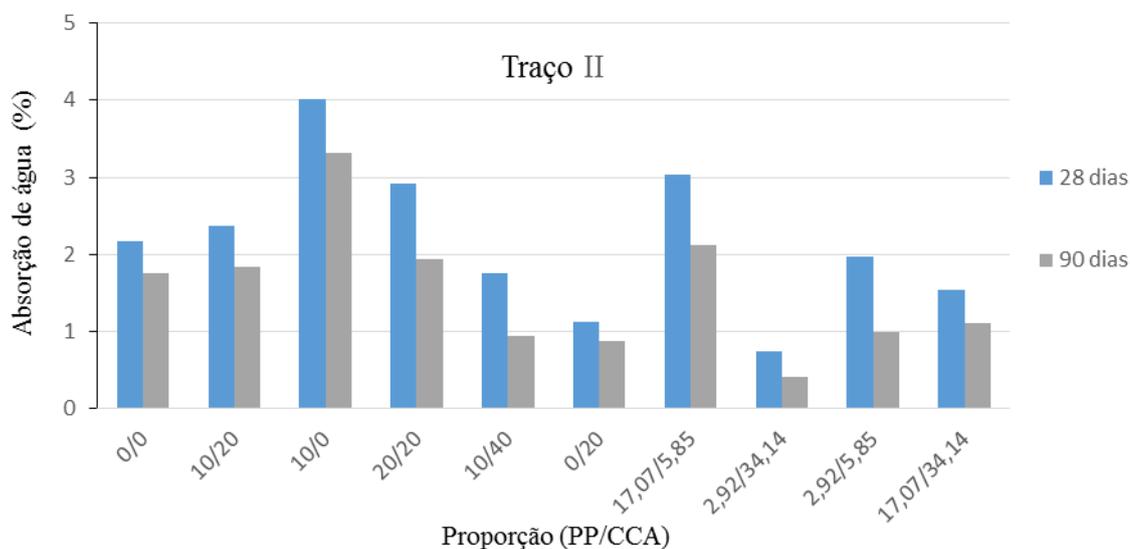
Na Figura 56 são exibidos os resultados de absorção de água para os diferentes traços estudados. O ponto central do experimento usados nesta pesquisa é referente ao traço PP/CCA (10%-20%) e apresentou um acréscimo de 17,6% aos 90 dias de cura. Nota-se que para o traço PP/CCA (10%-0%) o acréscimo da absorção de água foi de 44%, e para o traço PP/CCA (0%-20%) ocorreu uma redução de 26%, ambos comparados aos 90 dias de cura do material referência. Isso é um indicativo que ambos os resíduos e o tempo de cura são variáveis influentes no traço I.

Figura 56: Resultados do ensaio absorção de água do traço I



A absorção de água pelos corpos de prova do traço II aos 28 e 90 dias de cura pode ser observada na Figura 55. Através da análise dos resultados é possível observar a influência da adição da CCA e do PP. Quando ocorre somente a incorporação do PP, há um aumento da absorção de água em 89% aos 90 dias de cura. Já quando incorporado 20% de CCA em substituição ao cimento, no traço PP/CCA (10%-20%), a redução foi de 45% aos 90 dias de cura, apresentando valores semelhantes ao material referência. O traço PP/CCA com teores de 2,92%-34,14%, foi o que apresentou uma menor absorção de água, devido ao maior teor de CCA incorporado na mistura. Porém, ressalta-se que um teor elevado de CCA favorece para a redução da trabalhabilidade do concreto no estado fresco, devido à sua finura.

Figura 57: Resultados do ensaio absorção de água do traço II



Conforme os resultados apresentados é possível observar a redução da absorção de água nos traços com maiores teores de CCA, esse resultado é corroborado pelos pesquisadores Malhotra e Mehta (2004) que estudaram a substituição do cimento por CCA com uma menor granulometria, onde originou em um concreto com uma menor absorção de água em maiores teores do resíduo [113]. Este comportamento é similar ao proposto por Modak et al. (2012) e Mauro et al. (2007) que demonstraram que a absorção de água do concreto foi diminuída com maior teor de substituição do cimento por CCA e isso foi atribuído à maior finura do resíduo [151, 152].

A substituição da areia pelo PP levou ao aumento da absorção de água, sendo menos impactado negativamente quando dosado em conjunto com a CCA. Isso ocorre pois o PP, ao ser moído, obtém uma geometria mais alongada e plana, o que favorece o aparecimento de vazios no concreto e, por conseguinte, o acréscimo na absorção de água.

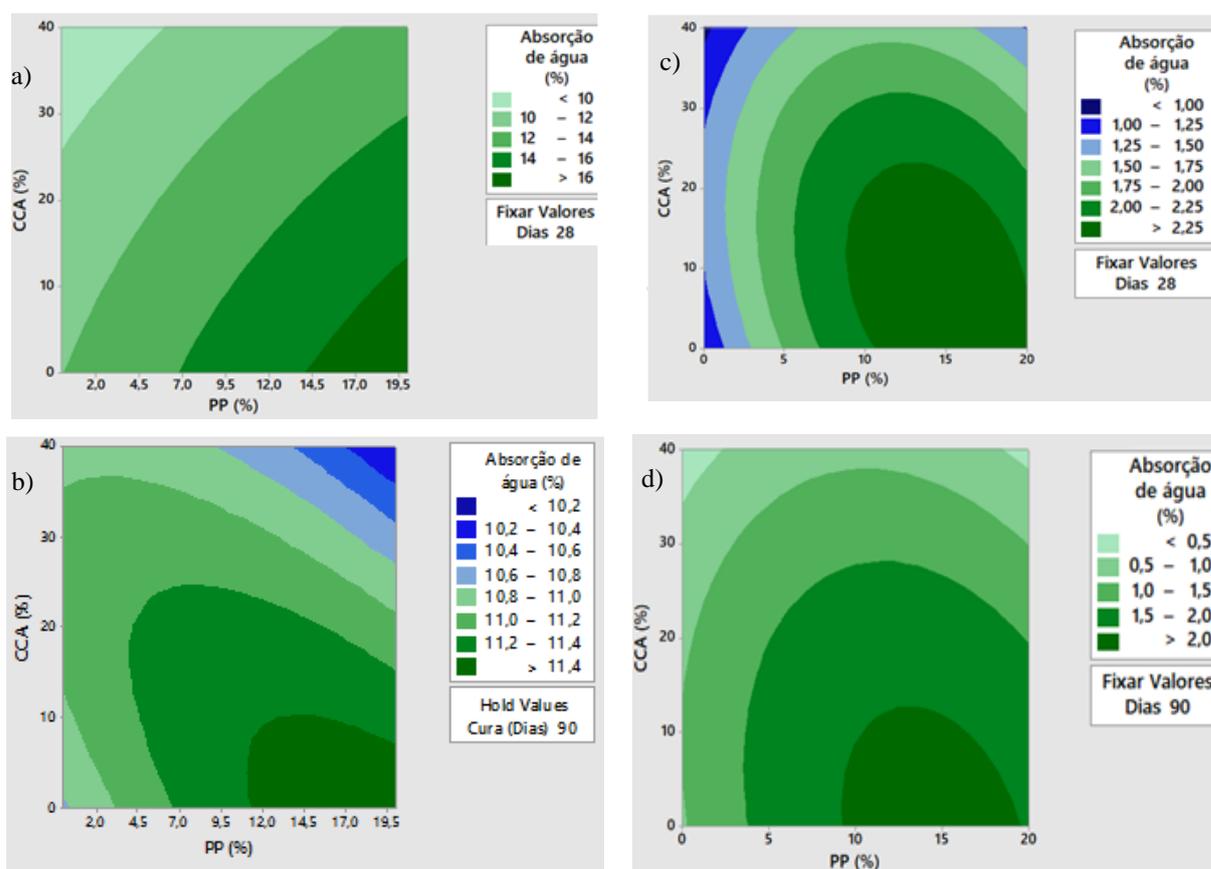
A absorção de água que ocorreu em ambos os traços é corroborada pelos resultados encontrados no item 5.2.1.4, onde se observou que ocorreu um aumento do índice de vazios com o aumento do teor do PP, e conseqüentemente, favorecendo uma maior absorção de água mais evidente para tempos maiores de cura (90 dias), isso ocorre devido ao aumento na quantidade de gel (C-S-H), que une as partículas de cimento [153, 154].

Os dados foram manipulados no software Minitab, que gerou um relatório com os resultados estatísticos, contendo os modelos de regressão para previsão da absorção de água das misturas

estudadas. As equações 13 e 14 representam matematicamente os modelos, e estão apresentadas no anexo B.

Assim como realizado para os demais resultados, optou-se por expressar o efeito das variáveis nos valores de absorção de água a partir do gráfico de contorno, apresentado na Figura 58, na qual se varia o teor de CCA e de PP, para os traços ensaiados aos 28 e 90 dias de cura. A partir desse gráfico, pode-se relacionar um determinado teor de CCA com um dado teor de PP, e encontrar a absorção de água aproximada que a mistura pode atingir. Comparando o traço I e o traço II aos 28 dias de cura, o traço II apresentou mais níveis (7) do que o traço I (5), e aos 90 dias ocorre uma inversão, e o traço I apresenta 8 níveis de contorno para 5 do traço II, o que corrobora a influência significativa do tempo de cura para o traço I aos 90 dias.

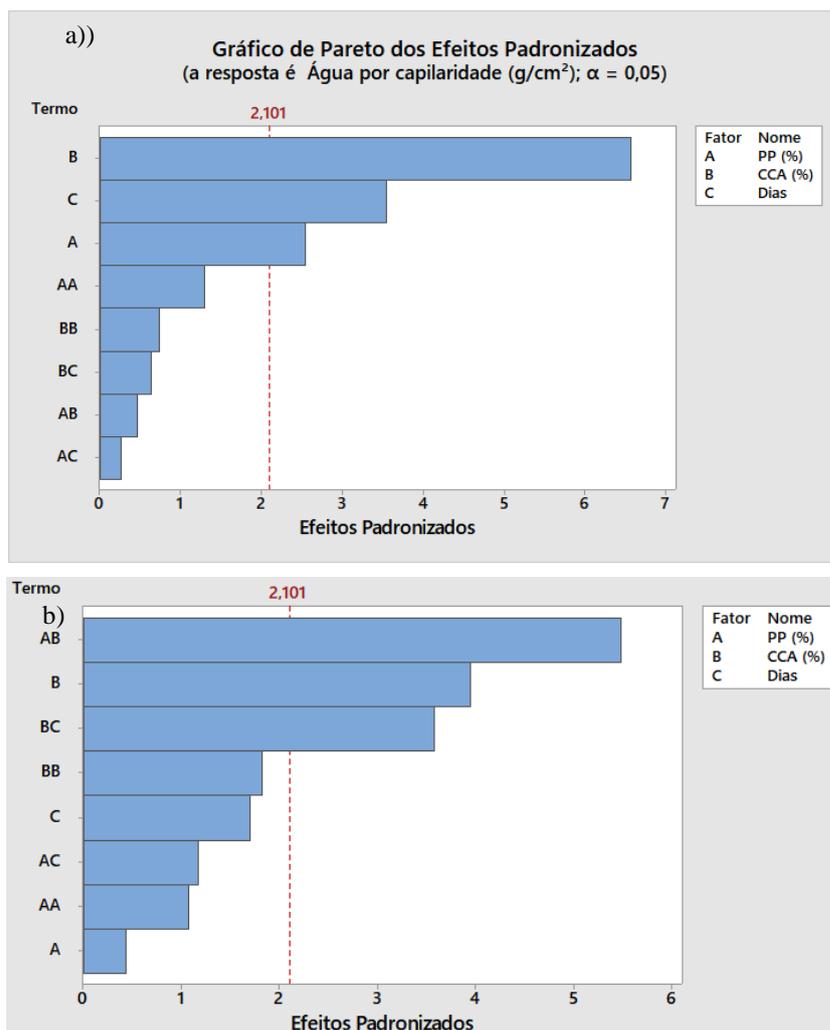
Figura 58: Gráfico de contorno de Absorção de água do: a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



### 5.2.1.6 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 59 tem-se o gráfico de Pareto para ambos os traços estudados. Para o traço I as variáveis de maior influência foram o resíduo de CCA, o tempo de cura e o PP. Já para o traço II as variáveis de influência foram a interação AB, CCA e BC.

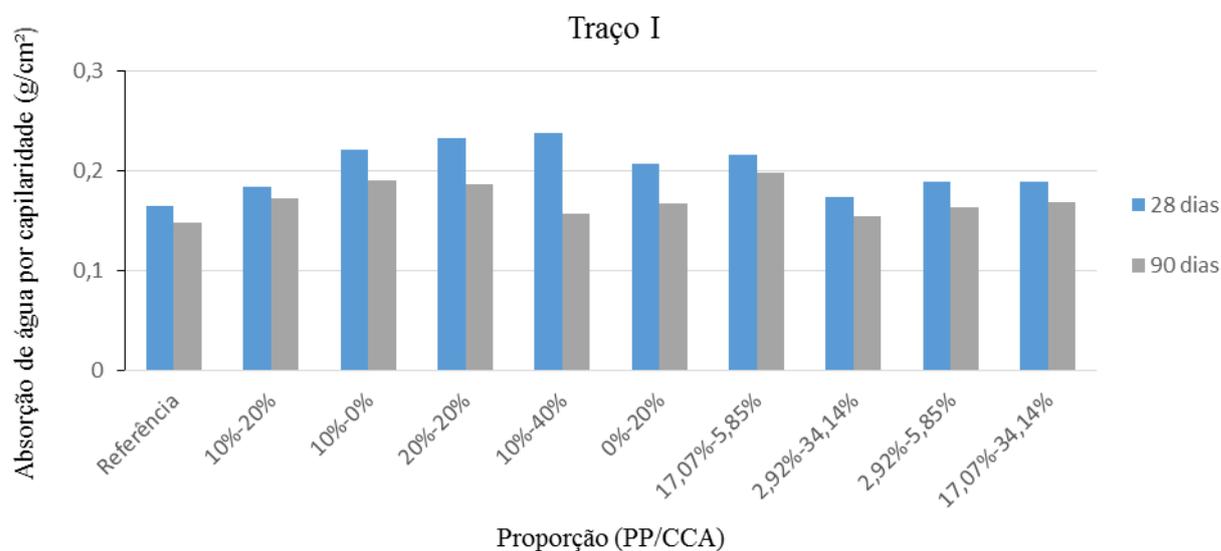
Figura 59: Gráfico de Pareto da absorção de água por capilaridade (90 dias): a) Traço I; b) Traço II



Na Figura 60 encontram-se os resultados dos valores máximos do ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova analisados no traço I. Analisando os resultados, e verificando a máxima absorção entre os traços de cada teor de CCA aos 28 e 90 dias de cura, notou-se que quando o concreto recebe uma adição de CCA, ele reduz a absorção capilar. Também se nota que quanto maior o teor de CCA, menor é a absorção capilar e a redução da absorção é menor com o aumento do tempo de cura. É possível observar que ocorre um aumento da absorção de água com a incorporação do PP devido ao grande volume de substituição da areia pelo polímero. Nota-se

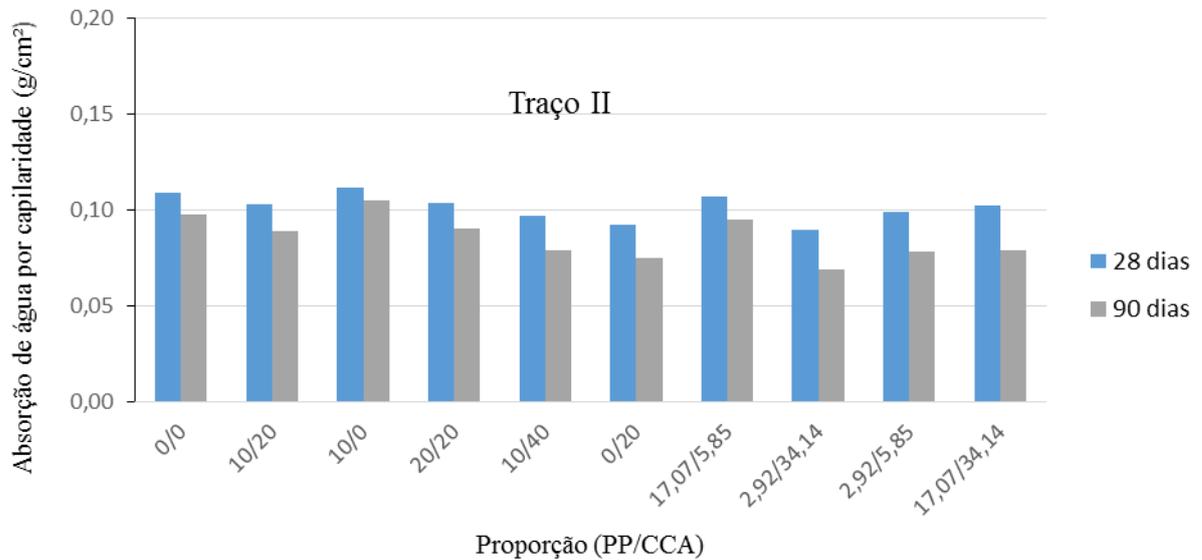
que dois traços aos 90 dias de cura apresentam valores próximos ao traço de referência, os traços PP/CCA com teores de 2,92%-34,14% e 10%-40%.

Figura 60: Absorção de água por capilaridade do traço I



Na Figura 61 apresenta-se o gráfico referente aos valores máximos de absorção capilar ao final do ensaio, com 72 horas de aplicação do corpo de prova em água para o traço II. É possível observar que a incorporação do PP não teve influência significativa nos resultados, mas a interação dos resíduos apresentou uma grande influência. O traço II apresenta um maior consumo de cimento quando comparado ao traço I e, conseqüentemente, maior volume de CCA. Este maior teor de CCA preenche os vazios gerados pelo PP, favorecendo para a redução da absorção de água quando usados de forma combinada. Nota-se que o traço PP/CCA aos 90 dias de cura com teores de 2,92%-34,14% apresentou menor absorção de água por capilaridade, valores inferiores até ao traço de referência.

Figura 61: Absorção de água por capilaridade do traço II



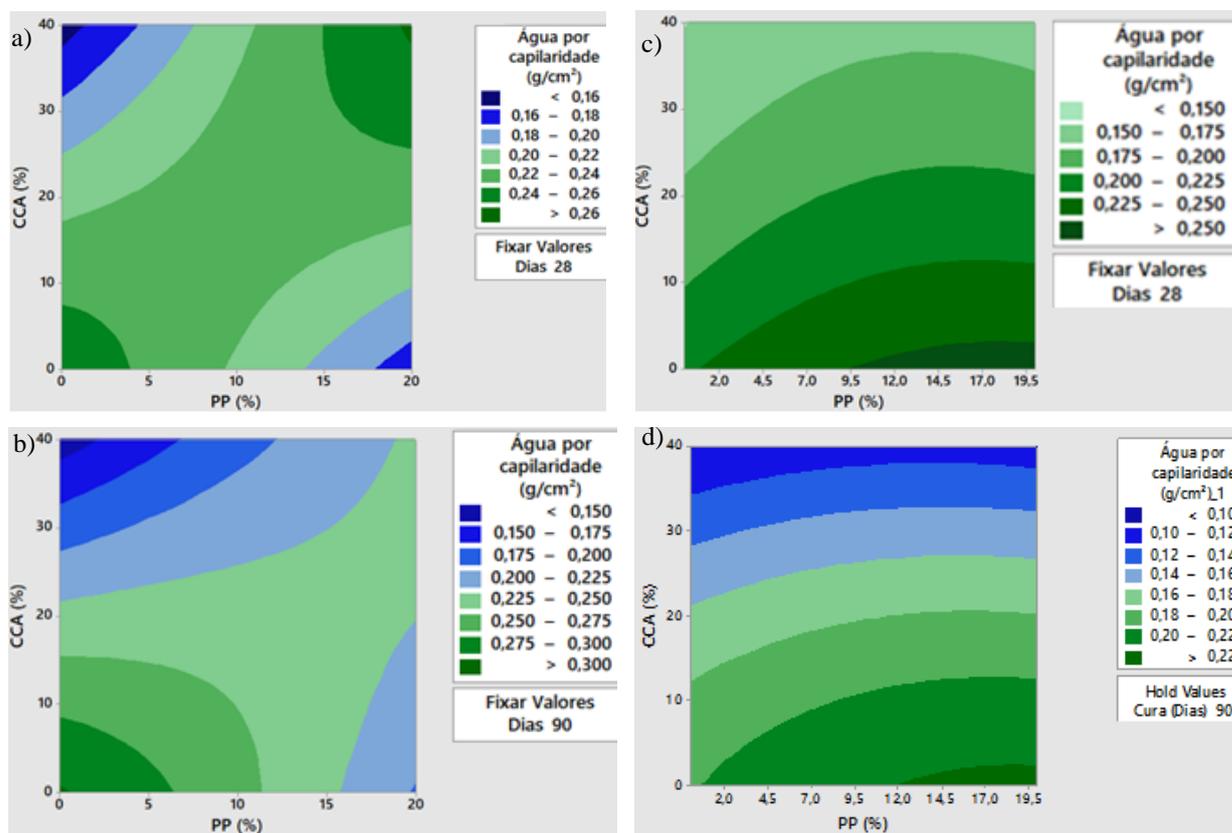
Os traços com maiores teores de PP apresentaram uma maior absorção de água por capilaridade, isso já é esperado devido à baixa massa específica do polímero que são propensos a prender mínimas bolhas de ar que favorecem o aumento do tamanho dos poros e, conseqüentemente, o aumento da absorção de água por capilares [155].

A durabilidade do concreto é diretamente influenciada pela água transportada para a microestrutura. O ensaio de absorção fornece uma medida indireta da porosidade do concreto, o volume de vazios permeáveis dentro do concreto é afetado pela conectividade dos poros dentro do concreto [85].

Os resultados obtidos nesta pesquisa para essa propriedade é corroborado pelos autores Koushkbaghi et al. (2019) que incorporaram 20% de CCA em substituição parcial ao cimento e observaram a redução da absorção de água por capilaridade do concreto comparado ao material referência. Isso ocorre devido às partículas mais finas de CCA, que são dispostas de maneira uniforme dentro da matriz e a tornaram mais densa e, conseqüentemente, apresentando uma menor porosidade e possivelmente reduzindo a ligação entre poros [156].

A Figura 62 mostra o efeito da absorção de água para as misturas estudadas, por meio de curvas de contorno obtidas a partir de uma superfície de resposta. Observa-se que com uma maior quantidade de CCA na massa, ocorre o refinamento dos poros (traço II) e acarreta em uma menor porosidade na matriz [16].

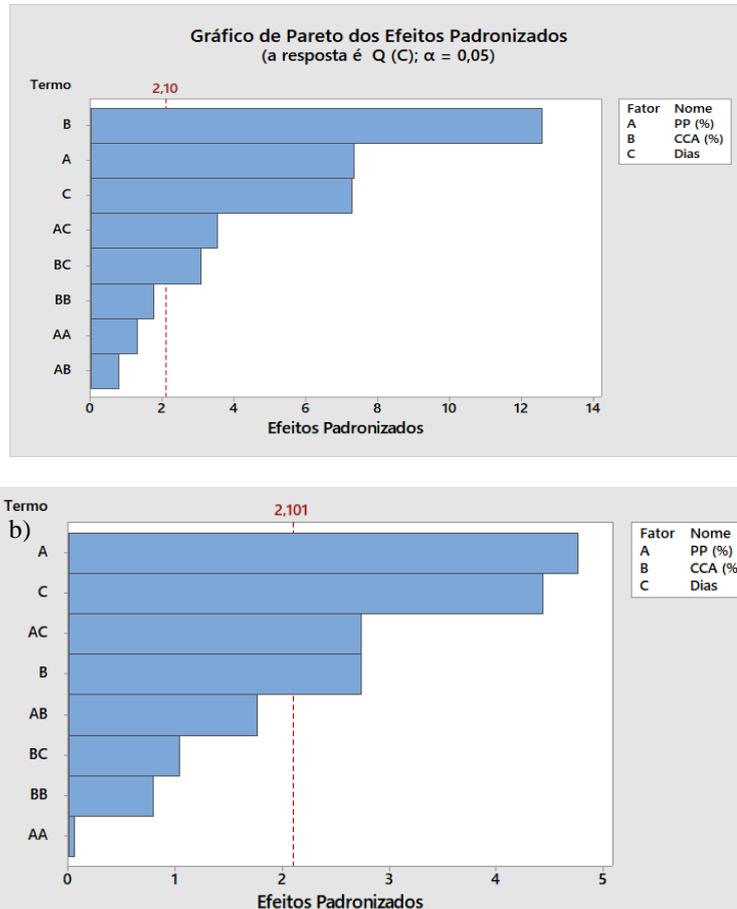
Figura 62: Gráfico de contorno da absorção de água por capilaridade: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



### 5.2.1.7 Resistência à penetração de íons cloretos

É possível observar no gráfico de Pareto a influência significativa da incorporação dos resíduos e suas interações para o traço I, sendo mais significativa a incorporação da CCA para o traço I e PP para o traço II (Figura 63).

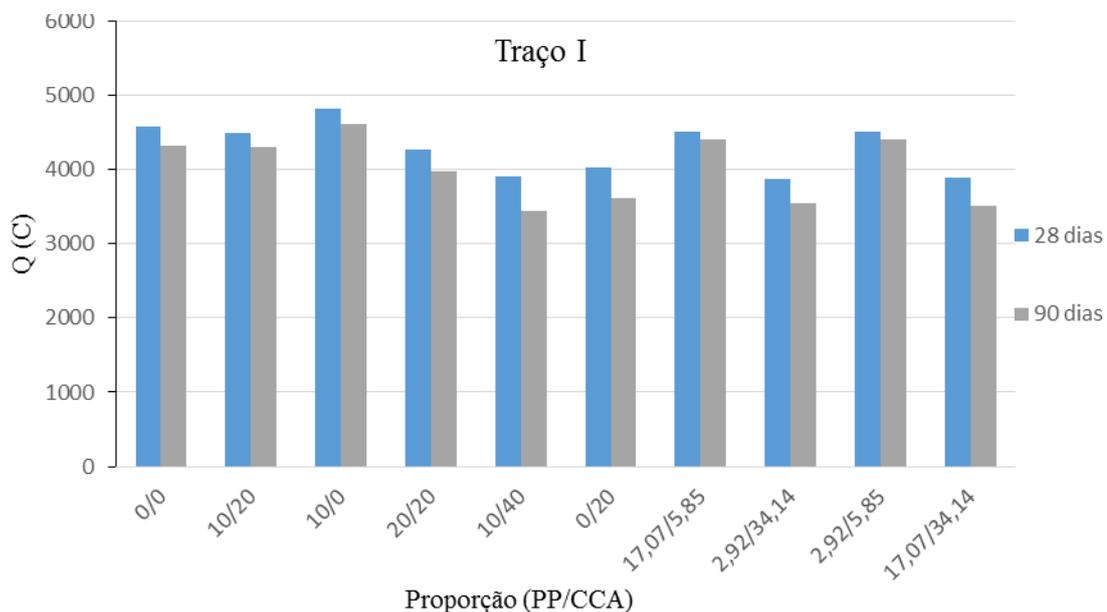
Figura 63: Gráfico de Pareto de carga passante: a) Traço I; b) Traço II



A carga passante nos corpos de prova do traço I apresentada na Figura 64 é influenciada pela incorporação dos resíduos. É possível notar que o aumento da resistência ocorre com a progressão da incorporação da CCA. As propriedades de durabilidade do concreto dependem da idade de cura e outros fatores. O aumento da resistência com o tempo de cura ocorre devido à formação do gel de C-S-H que une as partículas de cimento, como citado anteriormente [153]. O traço que favoreceu para a redução da carga passante é de 10%-40%, devido ao maior teor de CCA, que favorece a redução dos poros e o teor médio dos flocos de PP.

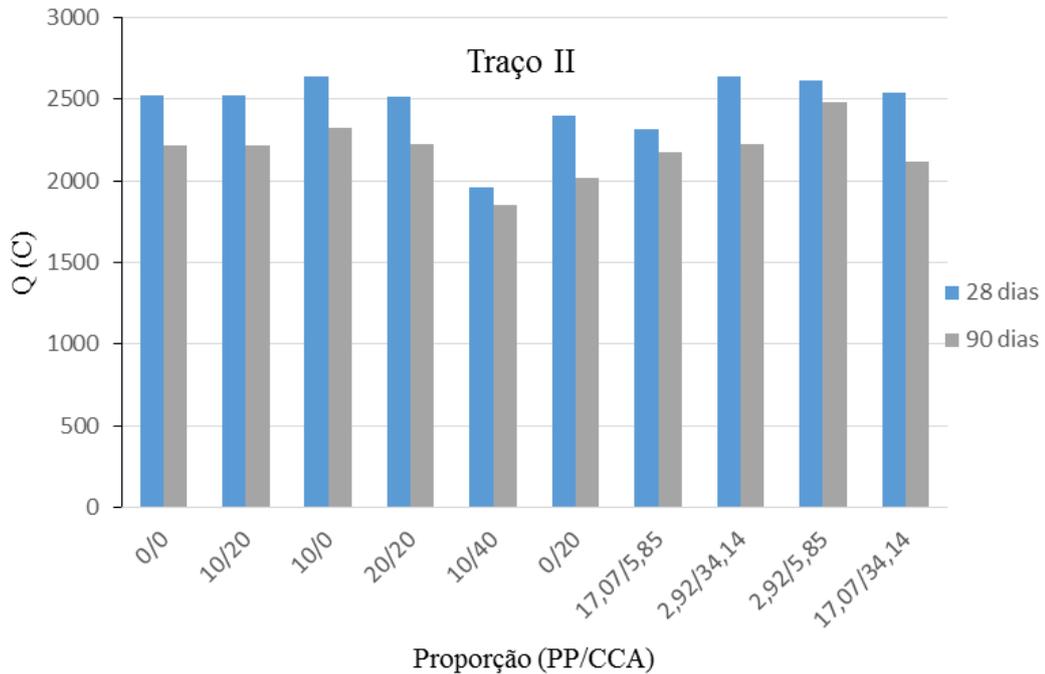
Através dos resultados obtidos para o traço I de acordo com norma ASTM C1202 (2019) os traços que apresentaram menor carga passante na faixa de 2000-4000C aos 90 dias de cura, apresentam um risco moderado a penetração, estes traços são: 10/40, 0/20, 2,92/34,14 e 17,07/34,14.

Figura 64: Carga passante do traço I



Nos corpos de prova do traço II, a incorporação do PP teve uma influência significativa na resistência à penetração de íons cloretos, pois a substituição da areia por este resíduo favoreceu na manutenção da resistência. O traço que melhor contribuiu para essa redução de penetração de íons foi aquele com proporção mássica de 10%-40%, assim como ocorreu para o traço I. Para o traço II as amostras podem também ser classificadas conforme a ASTM C1202 (2019), as amostras destes traços apresentaram valores de carga passante superiores a 2000C, sendo classificadas como risco moderado. A única amostra que apresenta um baixo risco a penetração é o 10/40.

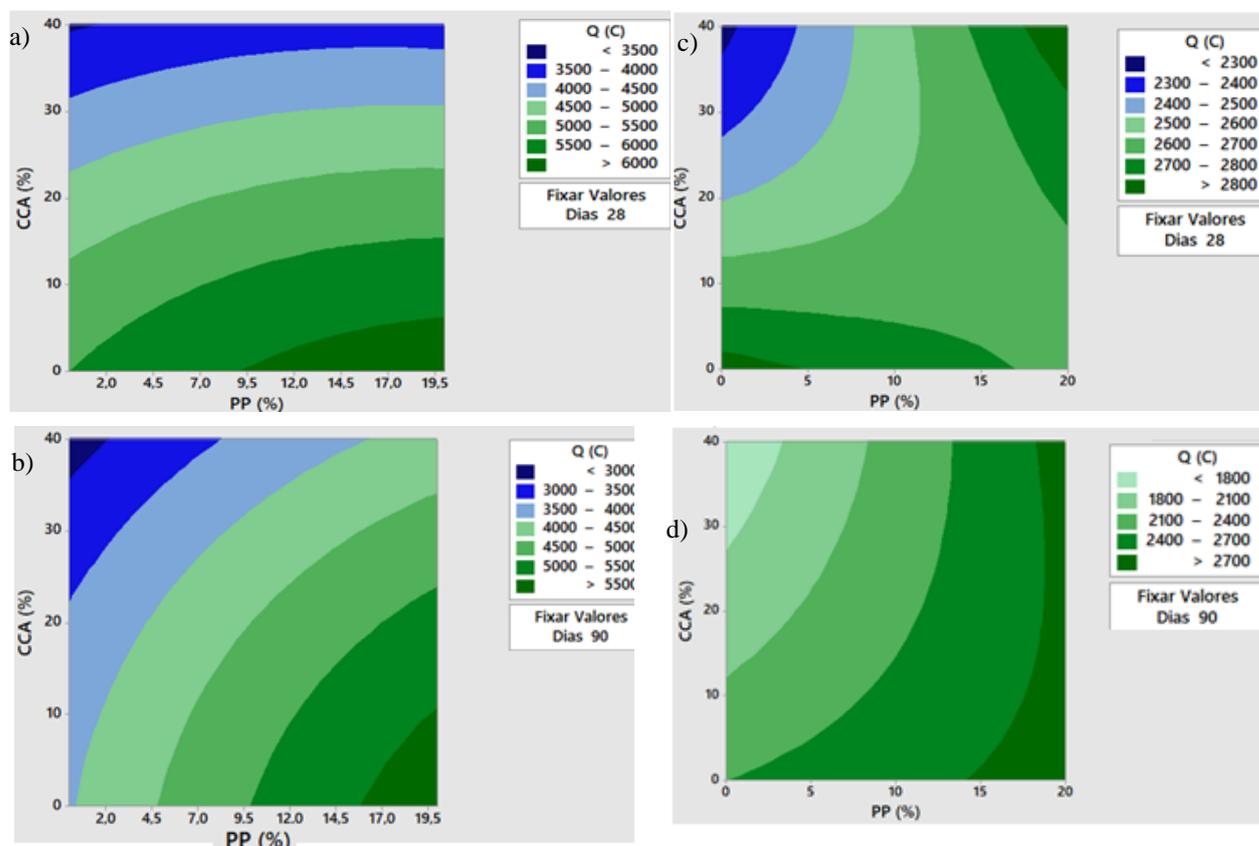
Figura 65: Carga passante do traço II



Correa (2015) verificou a influência da incorporação do PET e do PP. Para ambos os resíduos ocorreu uma redução da carga passante, porém mais atenuante no caso do PP que atuou como barreira dificultando a passagem dos íons e reduzindo a velocidade de passagem do mesmo ou bloqueando a passagem dos íons [157].

A formação de gel C-S-H extra como resultado da reação entre o hidróxido de cálcio (da reação de hidratação) e a sílica (das misturas minerais) também melhora as propriedades de durabilidade do concreto [158]. No gráfico de contorno (Figura 66) foi possível visualizar a elevada influência dos resíduos e do tempo de cura na resistência à penetração de íons cloretos e estimar valores dentre os períodos de cura analisados, observa-se que as cores escuras são referentes aos valores menores de carga passante, e isso é predominante em elevados teores de CCA. Pode-se observar para a figura 66-c um comportamento diferente dos demais, isso se deve a um possível ruído da análise do software.

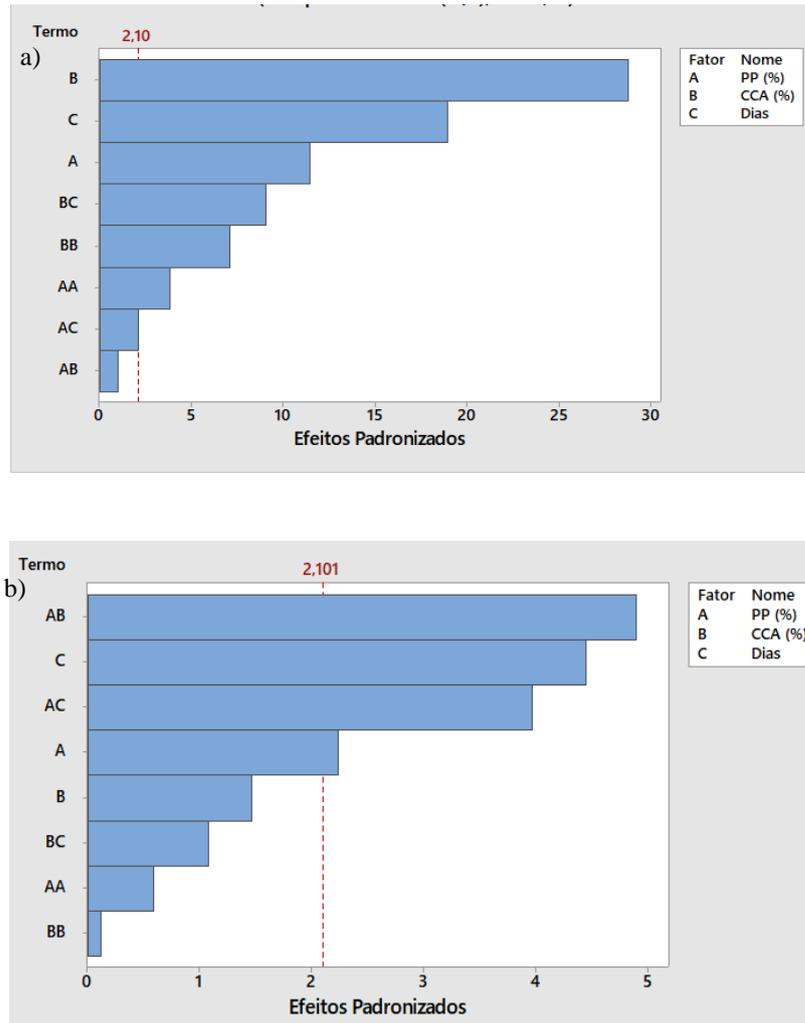
Figura 66: Gráfico de contorno da carga passante de íons cloretos: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



### 5.2.1.8 Velocidade de propagação ultrassônica

Na Figura 67 são apresentados os gráficos de Pareto referentes a cada efeito analisado para a velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU). Os valores de “p” menores que 0,05, ou seja, menores que o nível de significância de 5%, estão representados pela linha tracejada. As variáveis que ultrapassam esta linha indicam que estes tiveram efeitos significativos. Para os efeitos, nota-se que apenas as interações entre o PP e a CCA não foram significativas para o traço I. Analisando o gráfico de Pareto para o traço II, os fatores que foram significativos são a incorporação dos resíduos, a interação entre eles e a interação entre o PP e o tempo de cura. Portanto, pode-se concluir com 95% de confiança, que os concretos com a inclusão destes resíduos afetaram significativamente na velocidade de propagação ultrassônica.

Figura 67: Gráfico de Pareto de VPU: a) Traço I; b) Traço II



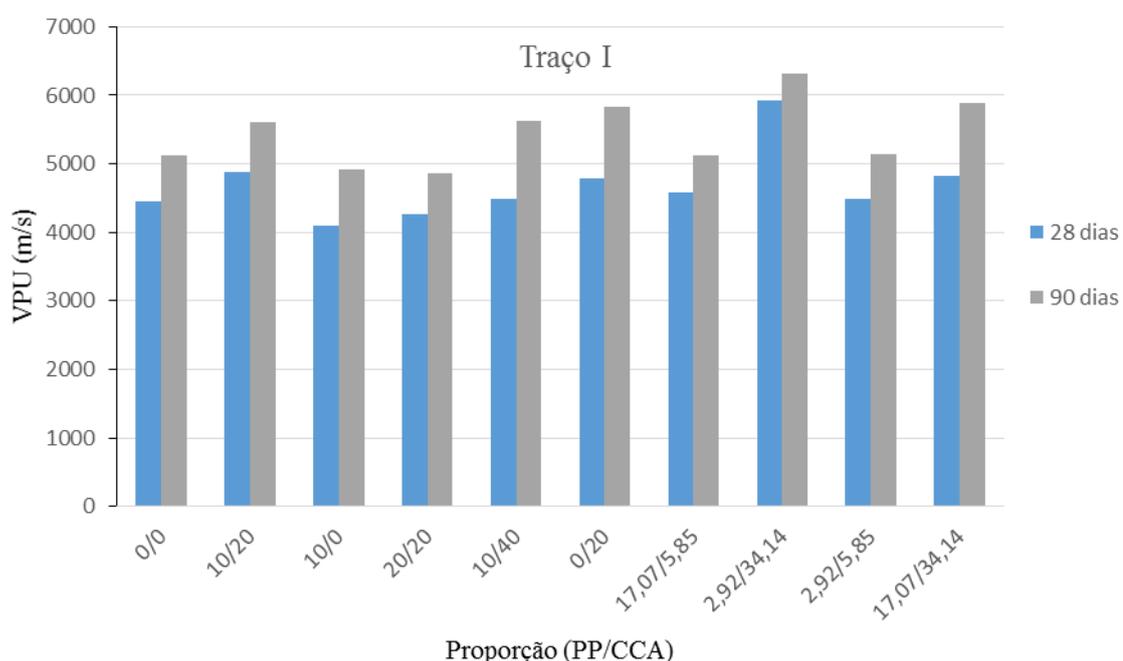
Este ensaio permite o monitoramento da qualidade estrutural do concreto avaliado e detecção de micro fissuras antes que elas se transformem em macro fissuras. Este ensaio é comumente usado para avaliar a estrutura interna do concreto, ou seja, possíveis vazios e defeitos. Mas também tem a potencialidade em detectar modificações nas propriedades do material, como por exemplo, o módulo de elasticidade, pois a propagação das ondas depende da densidade do material e suas propriedades elásticas [159].

Na Figura 68 é possível observar que para os traços com maiores teores de CCA a velocidade de propagação é maior, devido à redução dos vazios com a incorporação da CCA, resultando em um concreto com uma maior qualidade, como é o caso do traço de 2,92%-34,14%.

Este comportamento é corroborado por Mohseni et al. (2016), que verificaram o aumento da velocidade de propagação ultrassônica com o aumento do teor de CCA, devido à formação dos produtos de hidratação com o aumento do conteúdo deste resíduo [160].

De acordo com a norma NBR 8802 (ABNT, 2019) as amostras que apresentaram valores de VPU superiores a 4500 m/s aos 90 dias de cura são consideradas como um concreto de excelente qualidade.

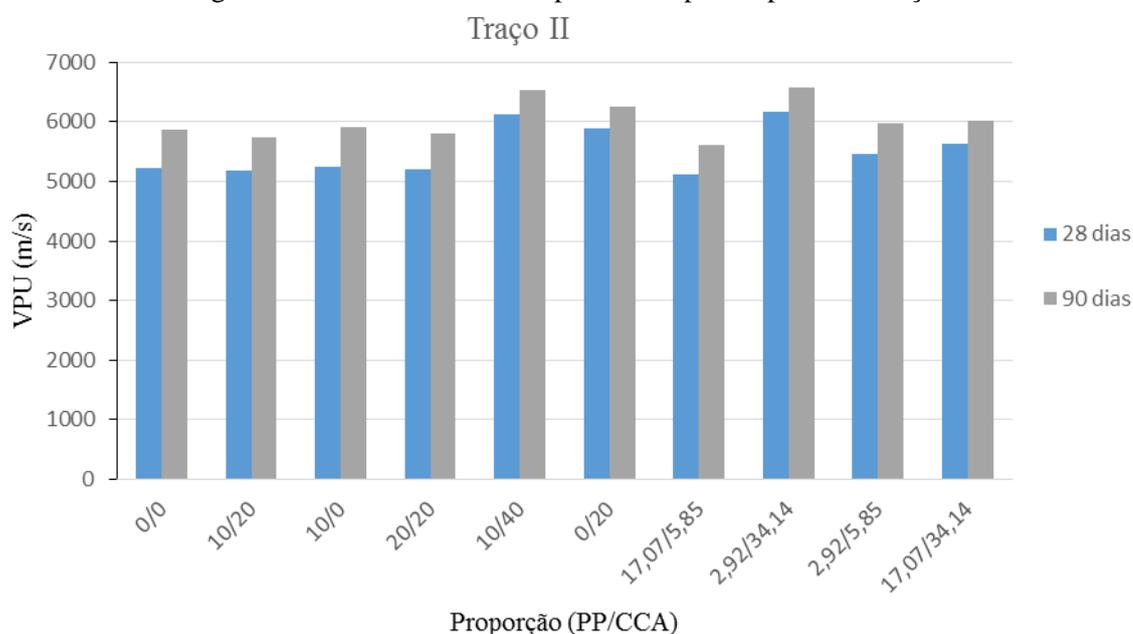
Figura 68: Resultados da VPU para os corpos de prova do traço I



Na Figura 68 tem-se os resultados da avaliação do ensaio de velocidade de propagação ultrassônica do traço II. É possível observar que a interação da incorporação do PP e da CCA manteve a qualidade do concreto, mesmo em elevadas substituições destes resíduos pela areia e cimento, respectivamente. O PP não teve uma grande influência quando analisado isoladamente devido ao traço conter pouco volume de areia e, conseqüentemente, um menor volume de PP é incorporado. Quanto maior é a velocidade da propagação das ondas ultrassônicas, melhor é a qualidade do concreto. Neste caso, os traços que melhor favoreceram para essa condição são: 10%-40% e 2,92%-34,14%.

Assim como ocorreu para o traço I, o traço II conforme a norma NBR 8802 (ABNT, 2019) apresentou valores de VPU superiores a 4500 m/s, que é considerado um concreto de excelente qualidade.

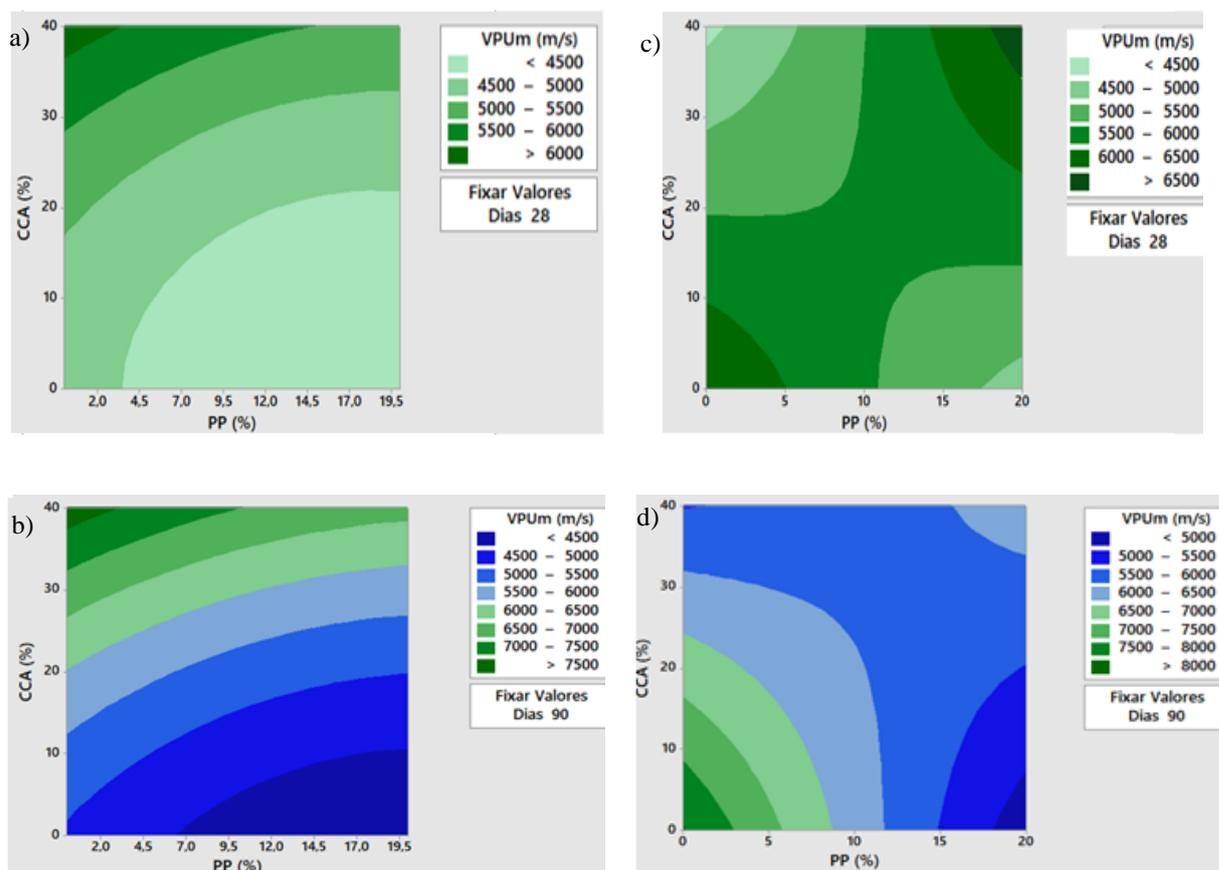
Figura 68: Resultados da VPU para os corpos de prova do traço II



A redução da velocidade de propagação dos corpos de prova com teores mais elevados de PP são atribuídas aos vazios gerados na incorporação dos resíduos de PP na produção do concreto. Esses resultados são corroborados por outros autores Carcaño et al. (2008) e Wang et al. (2019) que constataram uma redução da velocidade na faixa de 4570 m/s para 3600 m/s e 4410 m/s para 3460 m/s respectivamente, para o concreto de referência e para o concreto com adição de fibras de PP [161,162].

Na Figura 70 observa-se o efeito das variáveis em gráficos de contorno, na qual se altera o teor de PP e CCA para misturas ensaiadas após 28 e 90 dias de cura. Através destes gráficos pode-se relacionar uma determinada porcentagem de PP com um dado teor de CCA, para verificar a VPU aproximada que a mistura pode atingir. Nota-se através dos contornos mais curvos, que para o traço II as variáveis tiveram maior influência sobre os resultados quando comparado ao traço I, corroborando com a análise do gráfico de Pareto (Figura 67).

Figura 70: Gráfico de contorno de VPU do: (a) Traço I-28 dias; b) Traço I-90 dias; c) Traço II-28 dias; d) Traço II-90 dias



Na Figura 71 e 72 são apresentados gráficos de correlação da velocidade de propagação ultrassônica com o teor de índices de vazios. Constata-se que concretos com menores valores de VPU apresentaram maiores valores de índice de vazios. Isto pode ser justificado pelo fato desses concretos terem apresentado um dos menores consumo de cimento dentre os traços analisados, o que os tornam mais porosos. Observa-se que para o traço I por apresentar uma maior relação a/c foi o que apresentou maior porosidade, o que os tornam de menor durabilidade, o que reflete nos menores valores de VPU e, conseqüentemente, nos resultados dos ensaios de durabilidade. Este comportamento é corroborado por Amancio et al. (2019), onde os autores observaram uma forte correlação entre as duas propriedades explicando que com um teor crescente de cimento e uma relação água-cimento constante, a porosidade aumenta [172].

Figura 71: Relação VPU x Índice de vazios para o traço I

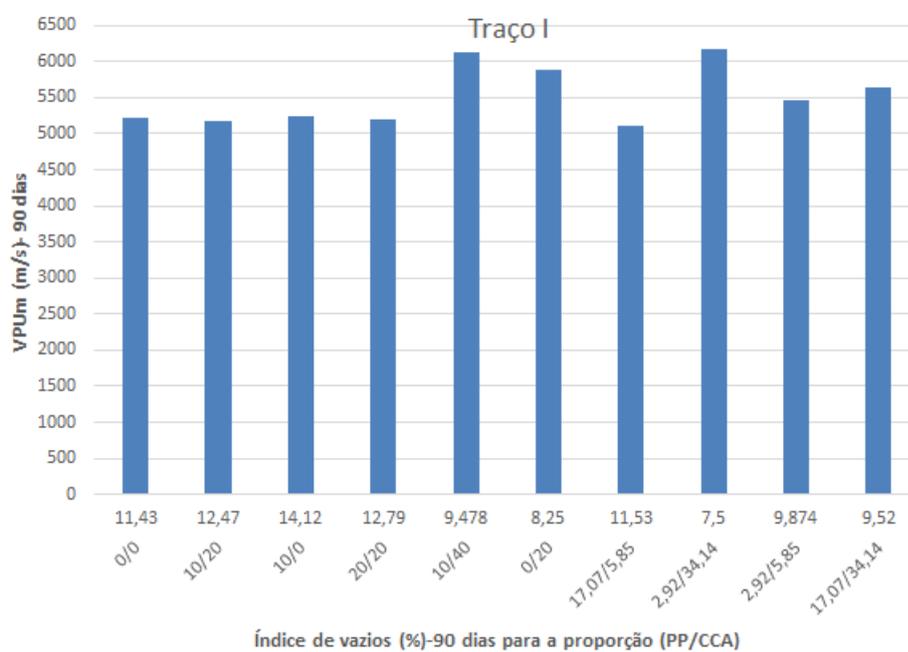
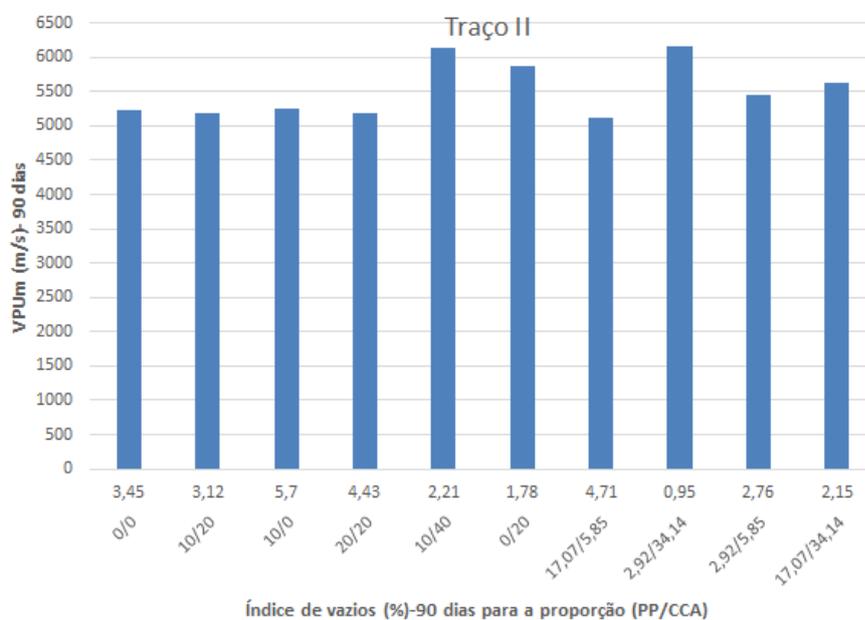


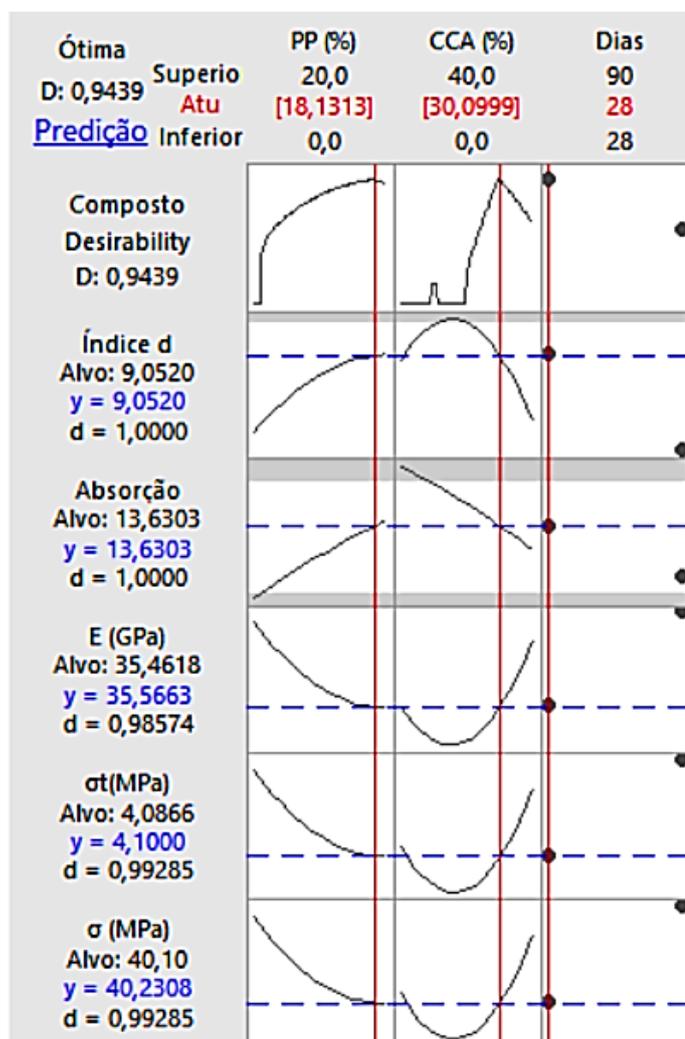
Figura 72: Relação VPU x Índice de vazios x Índice de vazios para o traço II



### 5.2.1.9 Otimização dos resultados

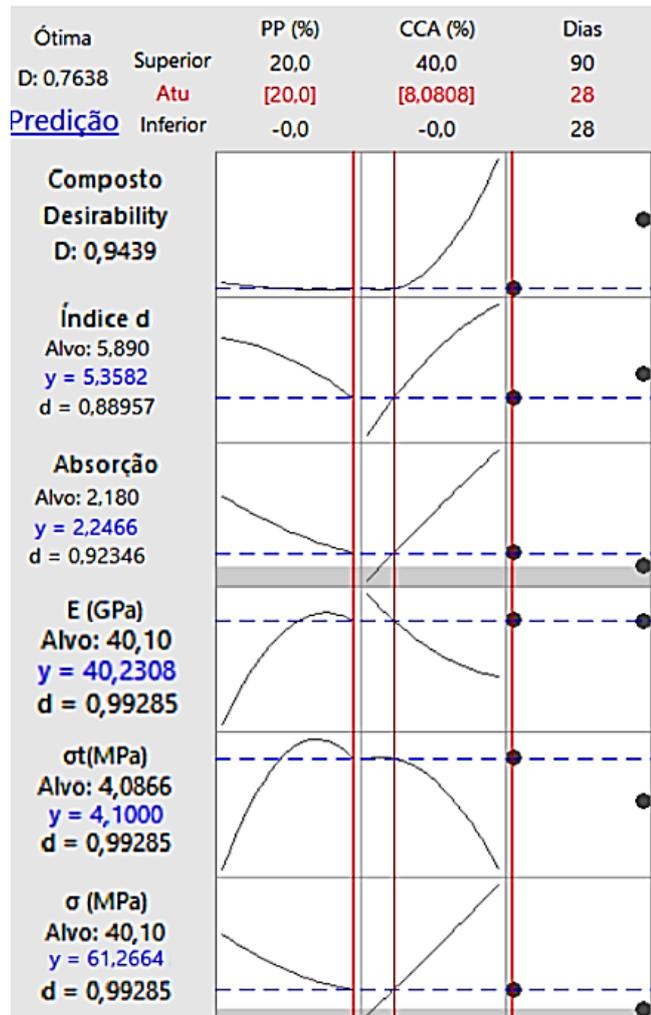
Com a determinação dos pontos ótimos dentro do domínio da função objetiva através dos gráficos de contorno de superfícies de respostas geradas, foi possível realizar a otimização gerando um ponto máximo onde se encontra o melhor resultado tanto em termos de qualidade como em questão da sustentabilidade ambiental. Na Figura 73 apresentada a otimização do traço I. Observa-se que, para chegar aos valores de referência, os teores de substituição de PP e CCA, respectivamente, devem ser de 18,13% e 30,09% aos 28 dias de cura. Cabe salientar que este traço com a incorporação de elevados teores de CCA permite um maior teor de PP, pois a cinza preenche os possíveis vazios ocasionados pela incorporação do PP.

Figura 73: Plotagem do ponto ótimo para as propriedades avaliadas do traço I.



Na Figura 74 é apresentada a otimização do traço II. Ressalta-se que para chegar aos valores de referência, os teores de substituição de PP e CCA, respectivamente, devem ser de 20% e 8,08% aos 28 dias de cura.

Figura 74: Plotagem do ponto ótimo para as propriedades avaliadas do traço II.



O maior teor de CCA requerido para o teor ótimo do traço I é possivelmente devido ao maior volume de PP incorporado neste traço, pois em comparação ao traço II apresenta maior quantidade de agregados finos (areia). Como este material leva a uma redução da durabilidade e das propriedades mecânicas, a CCA incorporada parece preencher melhor os vazios causados pela incorporação do PP, e com isso a necessidade de um maior volume de CCA.

O traço II é mais “rico” em cimento e apresenta um menor volume de areia quando comparado ao traço I, o que justifica o teor ideal deste traço tolerar um volume maior de PP e menor de CCA.

Um traço com maior quantidade de cimento em conjunto com a CCA apresenta uma estrutura mais densa, com menos poros, portanto é possível uma maior substituição de PP pela areia.

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo avaliar a influência da incorporação da CCA sem controle de queima e do PP pós-consumo (com prévio tratamento superficial) em substituição parcial em diferentes teores para o cimento e a areia respectivamente. Para isso foi realizado um plano experimental para determinar o teor ótimo de substituição com o intuito de conseguir no mínimo resultados similares ao concreto de referência. As principais conclusões com relação ao trabalho desenvolvido nesta pesquisa estão apresentadas na sequência.

A etapa exploratória do programa experimental da pesquisa procurou avaliar a influência da substituição parcial de diferentes teores de CCA e PP pelo cimento Portland e areia, respectivamente.

Na 1º etapa, foi realizada a análise do tratamento superficial do PP com dois diferentes tensoativos: TS1 e TS2 e diferentes condições de tratamento (tempo e concentração), onde procurou-se a para melhoria da adesão do PP à massa cimentícia sendo o tratamento ótimo com o TS2 o que teve uma maior influência da redução do ângulo superficial.

Selecionado o tratamento ótimo do PP, duas granulometrias do PP (1 mm e 4 mm) foram avaliadas. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água, massa específica e índice de vazios mostram que a granulometria ótima a ser usada na primeira etapa é de 4 mm tratado com TS2.

Na 2º etapa foi caracterizada a granulometria ótima de CCA em diferentes tempos de moagem: 15 min, 1h, 2h e 4h. Foram realizados os ensaios de caracterização: DRX, Adsorção por BET, granulometria a laser, determinação do índice de atividade pozolânica e massa específica. Os resultados indicaram que a granulometria ótima de CCA é de 23,21 µm, referente a 2h de moagem.

Na 3º etapa, para a produção do concreto híbrido, foram incorporadas CCA e PP com suas respectivas granulometrias “ótimas” em diferentes teores, como apresentado no planejamento experimental. Foram realizados diferentes ensaios para caracterização mecânica, física e química dos corpos de prova para os traços I e II.

- Caracterização mecânica

Foram alcançadas resistências à compressão bastante elevadas, variando entre 34,77 MPa a 58,4 MPa aos 90 dias (Traço I) e 60,25 MPa a 79,33 MPa aos 90 dias (Traço II). Os resultados de resistência à compressão diametral foram elevados, com variação entre 5,0 MPa a 7,8 MPa aos 90

dias (Traço I) e 8,1 MPa a 16,0 MPa aos 90 dias (Traço II). Para o módulo de elasticidade, foram obtidos valores consideravelmente altos, variando de 33,02 GPa a 42,8 GPa (Traço I) e para o traço II os limites foram de 43,8 GPa a 49,8 GPa, ambos aos 90 dias de cura. Os valores encontrados estão de acordo com valores de módulo de elasticidade de concretos utilizados em estruturas de concreto armado.

- Caracterização física

Foram realizados ensaios de índice de vazios que para o traço I, os resultados variaram de 7,5% a 14,1% (90 dias). Os teores mais elevados foram para os traços com maiores porcentagens de PP. Para o traço II, o índice de vazios se encontra em torno de 0,9% a 5,7%. O teor de CCA influenciou para que o aumento do índice de vazios não fosse ainda maior devido à adição do PP.

Em relação à absorção de água para o traço I, houve variação entre 6,8 e 13,1% (90 dias) e para o traço II de 0,4 e 3,3% (90 dias), amplitude bastante considerável, e justificável pelo teor de vazios encontrados para cada traço, pois quanto maior é o teor de vazios, conseqüentemente maior é a absorção de água.

Em relação à absorção de água por capilaridade, a ascensão capilar das misturas variou entre 0,14% e 0,19%, aos 90 dias para o traço I, e para o traço II de 0,07% a 0,1%.

Em relação à velocidade de propagação ultrassônica, aos 90 dias de cura, verificou-se para ambos os traços que mesmo com a densificação da matriz cimentícia pela continuidade do processo de cura, os resultados dos corpos de prova não se igualaram aos de suas referências, porém os valores mantiveram-se próximos. Os valores variaram de 4865 a 6315 m/s para o traço I, e de 5615 a 6542 m/s para o traço II aos 90 dias, sendo os corpos de prova considerados de excelente qualidade de acordo com a Norma NBR 8802 (ABNT, 2019).

- Caracterização química

O coeficiente de difusão de cloretos é um dos fatores que mais influência para o ingresso de íons cloretos no concreto, possibilitando o alcance desses íons à armadura, levando a um possível processo de corrosão de armaduras. Portanto, fatores que contribuam para reduzir o coeficiente de difusão levam a um prolongamento da vida útil das estruturas do concreto. O traço I variou de 3512 a 4615 C e o traço II variou de 1854 a 2478 C aos 90 dias de cura. Sendo assim, classifica-

se os traços I e II, conforme a norma ASTM C1202 (2019) [129] quanto ao risco de penetração de íons cloretos: de moderado a alto e de baixo a moderado, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir o efeito positivo da substituição parcial da areia pelo PP e do cimento pela CCA, que através da análise estatística do planejamento de experimentos pode-se chegar como teor ótimo para o traço I de 18,13% de PP e 30,09% de CCA e para o traço II 20% de PP e 8,08% de CCA. Os elevados teores de substituições intitulados como “ótimo” implicam em um grande volume de resíduo que seria descartado inadequadamente, e que agora poderá ser empregado como insumo para a produção de um concreto ambientalmente sustentável.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese contribuiu para avançar no conhecimento do comportamento do concreto com a incorporação de CCA e PP. Ao longo deste trabalho foram surgindo algumas questões que não puderam ser respondidas por limitação do programa experimental. A resposta a essas questões pode contribuir para o desenvolvimento da linha de pesquisa apresentada e para o avanço na compreensão do comportamento do material com a inclusão de ambos os resíduos estudados. Com isso, na sequência, são expostas algumas sugestões para estudos futuros:

- Avaliar o comportamento de corpos de prova de concreto durante a simulação da condição de incêndio, verificando, de acordo com a variação de temperatura, as alterações sofridas pelo material.
- Realizar estudos de ACV para os concretos desenvolvidos, de forma a avaliar o real impacto ambiental da utilização dos resíduos utilizados nesta pesquisa.
- Avaliar a profundidade de carbonatação do concreto.
- Avaliar outros tipos de tratamentos superficiais do PP.
- Avaliar outros processos de deterioração do concreto, como por exemplo, a sua resistência a cargas de fadiga.
- Realizar estudo de custos para comparação do concreto desenvolvido com concretos convencionais.
- Avaliar a viabilidade de produção em larga escala do concreto desenvolvido.
- Avaliar uma possível reação álcali-sílica devido à incorporação da CCA sem controle de queima em diferentes teores no concreto.

## REFERÊNCIAS

1. **CDIAC**. Carbon dioxide information analysis center. *CDIAC*. [Online] 2017. [Citado em: 5 de 5 de 2017.] [http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre\\_glob\\_2008.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2008.html).
2. **CBIC**. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. *CBIC*. [Online] 2017. [Citado em: 5 de 5 de 2017.] <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>.
3. **MCT**. Ministério da Ciência e Tecnologia. *EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS – PRODUTOS MINERAIS*. [Online] 2010. [Citado em: 5 de 5 de 2017.] [http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0228/228962.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0228/228962.pdf).
4. **Fedumenti, M.B.** *Avaliação da influencia da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecanicas e de durabilidade, com enfase no transporte de ions cloreto*. 2013. Dissertação de mestrado.
5. **G1**. <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/campo-e-lavoura/noticia/2015/04/producao-de-arroz-no-rs-chega-77-mil-toneladas-com-87-da-area-colhida.html>. Acessado em: 02 de 10 de 2019.
6. **FEPAM**. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler/RS. *fepam*. 2017. [Citado em: 05 de 05 de 2017.] [http://www.fepam.rs.gov.br/central/diretrizes/Diret\\_Tec\\_02\\_2011.pdf](http://www.fepam.rs.gov.br/central/diretrizes/Diret_Tec_02_2011.pdf).
7. **Isaia, G.** Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte II: Propriedades da durabilidade. 2010.
8. **Bezerra, I.M. T.** *Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento*. 6, 2011, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 15. pp. p.639–645.
9. **Rêgo, João Henrique S.** *As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas*. 2004. Tese de doutorado.
10. **Treação, Guilherme Hoehr.** *Durabilidade do concreto com cinza de casca de aroz natural sem moagem : mitigação da reação alcali-silica e penetração de cloretos*. 2011. Dissertação de Mestrado.
11. **MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA -.** MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. 2009. Acessado em: 07 de 5 de 2017. [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22\\_RT31\\_Perfil\\_de\\_areia\\_para\\_construcao\\_civil.pdf/9745127c-6fdc-4b9f-9eda-13fa0146d27d](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT31_Perfil_de_areia_para_construcao_civil.pdf/9745127c-6fdc-4b9f-9eda-13fa0146d27d).

12. **Catoia, T.** *Concreto ultraleve estrutural com perolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes*. 2012. Tese de doutorado.
13. **Reso.** Reso soluções ambientais: 11 de 06 de 2015. Acessado em: 07 de 05 de 2017.] <http://resoambiental.com/2015/06/polipropileno-embalando-o-mundo-com-eficiencia-e-praticidade/>.
14. **Callister, William D. e Rethwisch, David G.** *Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução*. s.l. : LTC, 2016. p. 912.
15. **MMA.** Ministério do meio ambiente: 2017. Acessado em: 07 de 05 de 2017. <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/consumo-consciente-de-embalagem/impacto-das-embalagens-no-meio-ambiente>.
16. **Neville, A. M.** *Propriedades do concreto*. 5. s.l. : Bookman, 2015.
17. **Mehta, P. K e Monteiro, P. J. M.** *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo : PINI, 2004.
18. **Dafico, Dario de Araújo.** *Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz*. 2001. Tese de doutorado.
19. **Helene, P.R.L., TERZIAN, P.** *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. 1995. p. 313.
20. **Ganesan, K, Rajagopal, K e Thangavel, K.** *Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete*. 8, 2005, Construction and Building Materials, Vol. 22, pp. 1675-1683.
21. **Ismail, Z. Z., Enas A e AL-Hashmi.** *Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement..* 2008, Waste Managemen, Vol. 28, pp. 2041–2047.
22. **Yang, X. Yue, X. Liu, Y. Tong.** *Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles*. 2015, Construction Building Materials, Vol. 8, pp. 444–453.
23. **Becker, Giorgia Yoshiko Rossignolo Suzumura e Filho, Mário Valério.** *A exploração de areia na região metropolitana do vale do paraíba e litoral norte e a gestão minerária nos municípios de são josé dos campos e jacareí – SP..* São José dos Campos : s.n., 2017, Revista Univap, Vol. 24.
24. **Ferreira, Ruan Landolfo da Silva.** *Efeitos do uso de areia de praia nas propriedades de argamassas mistas: análise da variação granulométrica..* 2, 2019, Matéria, Vol. 24.
25. **Lee, J. W.** *Food Eng.* 2008.
26. **Lee, S,** *Plasmas Polym*, 1997.
27. **Wanke, C. H. , Barbosa, L. G.,** *Recuperação Hidrofóbica de Polipropileno Tratado por VUV ou Plasma..* 2011, Polimeros.

28. **Sellin**, N. C., Sinézio, J. C. *Surface Composition Analysis of PP Films Treated by Corona Discharge*. 2003, Materials Research, Vol. 6.
29. **Moravek**, T., Rahel, J. e Szalay, Z. Plasma surface treatment of polypropylene reinforcing fibres by dielectric barrier discharge. 2013.
30. **Bubicz1**, Eduardo N. Modificação da energia de superfície do polipropileno. s.l. : Anais do 10o Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009.
31. **Guttman**, A. P. H *Treatments of Polypropylene Fibres to Optimize their Reinforcing Efficiency in Cement Composites ...* 1992, Cement & Concrete Composites, Vol. 14, pp. 277-285
32. **Correa**, Priscila M. *Post-consumer PP as partial substitute of sand: effect of surface treatment PP with surfactant on concrete properties*. 2019, Composite interfaces.
33. **Lima**, A. C. de, Lima, A. C, Konagano, N. Y. H. A utilização de plásticos na construção civil. 2012.
34. **Thomaz**, E. C. S. CRF - Concreto Reforçado com Fibras - Mito e Realidade. *Concreto com fibras*. 2017. <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/crf.pdf>.
35. **Lima**, R. C. A. *Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas*. Porto Alegre : s.n., 2005. p. 257, Tese de doutorado .
36. **Serrano**, R. *Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers*.. 2016, Construction and Building Materials, Vol. 122, pp. 302–309.
37. **Islam**, G.M, Sadiqul D. *Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete*.. 2, 2016, International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 5, pp. 345-354.
38. **Chi**, Y. *Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity*. 2017, Engineering Structures, Vol. 148, pp. 23-35.
39. **Correa**, P.M.C, Guimarães, D, Graeff A. G, Santana, R. M. C. S *Comparative study of the influence of the incorporation of PET fla-kes and PP post-consumer in concrete durability requirements*. 2020, Revista matéria.
40. **UnoChapecó**, 2010. Acessado em: 23 de 10 de 2015.] <https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1276.pdf>.
41. **Silva**, R. J. *Análise energética de plantas de produção de cimento Portland*. 1994. p. 242, Tese de doutorado.
42. **Mehta**, P. K e Monteiro, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo : PINI, 2014.
43. **Quarcioni**, V. A. *Influência da cal hidratada nas idades iniciais de hidratação do cimento Portland- Estudo em pasta*. São Paulo : s.n., 2008. p. 172, Tese de doutorado.

44. **Garcia, J. R.** Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. *Cerâmica*. 53, 2007, pp. 42-56.
45. **ABCP.** Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. *Associação Brasileira de Cimento Portland*. 2002. [Acessado em: 22 de 10 de 2015.] [http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf). BT-106.
46. —. **ABCP.** *Associação Brasileira de Cimento Portland*. [Online] 2015. [Citado em: 22 de 10 de 2015.] <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=19>.
47. **ORG, CIMENTO.** Cimento.org. *Cimento.org*. 22 de 09 de 2010. [Acessado em: 23 de 10 de 2015.] <http://cimento.org/cp-iii-32-cimento-portland-de-alto-forno/>.
48. **SNIC.** Sindicato nacional da indústria de cimento. *SNIC*. [Online] 2015. [Citado em: 21 de 10 de 2015.] [http://www.snic.org.br/numeros\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp).
49. **Renó, M.L.G.** *Uso de Técnicas de Otimização Robusta MultiObjetivos*. 2007. p. 141, DISSERTAÇÃO DE MESTRADO .
50. **Soares, J.B.** *Potencial de conservação de energia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para a indústria brasileira de cimento Portland até 2015*. 1998. p. 163, Tese de doutorado.
51. **Maury, M.B, Blumenschein, R.N.** *Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente*. s.l. : Sustentabilidade em Debate, 2012. pp. 75-96.
52. **IBGE.** Sociedade Nacional de Agricultura. *SNA*. [Online] 2019. [Citado em: 26 de 10 de 2019.] <https://www.sna.agr.br/arroz-e-feijao-perderao-espaco-no-campo-brasileiro-ate-2027-28/>.
53. **Lima, R. B.** Processo para a produção de carvão ativo a partir do subproduto resultante da lixívia alcalina da cinza da casca do arroz. *Dissertação de mestrado*. 2010.
54. **Silva, E. J** *Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção cívica*. 2009. p. 117, Dissertação.
55. **Kumar, A, Gupta, D.** *Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures*. 2015, Geotextiles and Geomembranes.
56. **Qiu, K.** *Experimental investigation of ash deposits characteristics of co-combustion of coal and rice hull using a digital image technique.*, 1, 2014, Applied Thermal Engineering, Vol. 70, pp. 77–89.
57. **Foletto, E.L.** Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. *Quim. Nova* . 6, 2005, Vol. 28, pp. 1055-1060.
58. **Stroeven, P, Bui, D.D. e Sabuni, E** *Ash of vegetable waste used for economic production of low to high strength hydraulic binders.* 2, 1999, Fuel, Vol. 78, pp. 153-159.

59. **Hwang**, C. L. e Chandra, S. The Use of Rice Husk Ash in Concrete. *Word press*. [Online] 2016. [Citado em: 05 de 04 de 2017.] <https://3cl1105uvd.files.wordpress.com/2013/06/book-by-satish-chandra-220504.pdf>.
60. **Tashima**, M. M., SILVA, C. A. R. L. e AKASAK. Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada. s.l. : XXXI Jornada Sud-americanas de Ingenieria Estructural, 2004.
61. **Souza**, J. *Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz no traço*. 2008. Tese de doutorado.
62. **Pereira**, A. M *Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz..* s.l. : revista Matéria, 2015, Vol. 20.
63. **Pouey**, M. T. F. . *Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico*. 2006. Tese (Doutorado em Eng. Civil) .
64. **Hwang**, I. C. e Wu, D. S. *Chao-Lung Hwang and Dong-Sheng Wu*. 1989, American Concrete Institute, Vol. 114, pp. 733-762.
65. **Nai**, D.G.r, A. Fraaij, A.A.K. Klaassen e Kentgens, A.P.M. *A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes..* 6, 2008, Cement and Concrete Research, Vol. 38, pp. 861-869.
66. . **Bui**, D.D, Hu, J e Stroeven, P. *Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded portland cement concrete*. 3, 2005, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, pp. 357-366.
67. **Antiohos**, S.K., Papadakis, .G. S e Tsimas. *Rice husk ash (RSA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness*. 2014, Cement and Concrete Research, Vols. 61-62, pp. 20-27.
68. **Ferreira**, A. A. *Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
69. **Righi**, D.P. *Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz*. 2015. Dissertação de mestrado.
70. **Santos**, A.G, Ferrari, A.K *Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados..* 3, 2019, Ambiente construído , Vol. 19.
71. **Santos**, L. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. 2006. Dissertação (Mestrado). .

72. **Fournier, N. B.** Materials technology laboratory. *Concrete Incorporating Rice-Husk Ash: Compressive Strength and Chloride-Ion Penetrability*, 2001. [Acessado em: 16 de 05 de 2017.] <http://ecosmartconcrete.com/docs/trbouzoubaarice01.pdf>.
73. **Nejelisliski, D.M.** *impermeabilização, O porongo (Lageneria siceraria) como matéria prima para a produção de recipientes: caracterização e*. 2015. Dissertação de mestrado.
74. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. NBR 5751*. Rio de Janeiro, 2012 Rio de Janeiro, 2015 .
75. **Weber, S.L.** *Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz*. 2001. Dissertação de mestrado.
76. **Silva, G.J.B.** *Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato*. 2005. Dissertação de mestrado.
77. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. NBR15895*. Rio de Janeiro, 2012 Rio de Janeiro, 2010.
78. **Luxan, M. P.** *Rapide evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement*. 1989, Cement and Concrete Research, Vol. 19.
79. **Duart, M.A.** *Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinzas de casca de arroz residual sem beneficiamento*. 2008. Dissertação de mestrado.
80. **Cordeiro, G. C.** *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*. 2006. p. 445f, Tese de doutorado.
81. . **Feng, Qingge.** *Efficiency of highly active rice husk ash on the High-strength.:* ternational Congress on the Chemistry of Cement (ICCC),, 2003, The Cement and Concrete Institute of South Africa.
82. **Oyetola, E. B, Abdullahi, M.** *The Use of Rice Husk Ash in Low - Cost Sandcrete*. 2006, Leonardo electronic journal of practices and technologies, Vol. 8.
83. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738*. Rio de Janeiro, 2012 Rio de Janeiro, 2016.
84. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. NBR 6118*. Rio de Janeiro, 2012 Rio de Janeiro, 2014.
85. **Monteiro, P. Kumar Mehta e Paulo J. M.** *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. s.l. : Nicole Pagan Hasparyk, 2014. p. 782.

86. **Sensale**, G.R *Strength development of concrete with rice-husk ash.* 2, 2006, Cement and Concrete Composites, Vol. 288, pp. 158-160.
87. **Guoming**, L, Weimin, C. Lianjun, C. *Investigating and optimizing the mix proportion of pumping wet-mix shotcrete with polypropylene fiber.* 2017, Construction and Building Materials, Vol. 150, pp. 14-23.
88. **Amir** M. Alani, D.B *Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab.* 2013, Construction and Building Materials, Vol. 41, pp. 335-344.
89. **Srikar**, G. A, Suriya, P.. *A Study on Residual Compression Behavior of Structural Fiber Reinforced Concrete Exposed to Moderate Temperature Using Digital Image Correlation.* 2016, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 10, pp. 75–85.
90. **Rasheed**, M. A., Prakash, S. S *Mechanical behavior of hybrid fiber reinforced cellular light weight concrete for structural applications of masonry.* 2015, Journal of Building Materials and Constructio, Vol. 98, pp. 631–640.
91. **Mohammed**, B. Abdelkader M. Yassine S., Bekir Y,P. *Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate.* 2020, Construction and Building Materials, Vol. 257, pp. 119-559.
92. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico.* - **NBR 7222**, Rio de Janeiro, 2011
93. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.* **NBR12142**, Rio de Janeiro, 2010.
94. **Foong**, K. Y., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z. and Mo, K. H. *Enhancement of the mechanical properties of lightweight oil palm shell concrete using rice husk ash and manufactured sand.* 1, 2015, . Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), Vol. 16, pp. 59–69.
95. **Badache**, A. Benosman, A.S. Senhadji, Y. Mouli, M. *Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE).* 2018, Construction and Building Materials, Vol. 163, pp. 40-52.
96. **Albano**, C. *Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios.* 10, 2009, Waste Management, Vol. 29, pp. 2707-2716.
97. **Helene**, P e Tutikian, B. F. *Dosagem dos concretos de cimento Portland.* [A. do livro] Paulo Helene. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo : Ibracon, 2011, p. 38.
98. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento* **NBR 12655**. Rio de Janeiro , 2015.

99. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Execução de estruturas de concreto – Procedimento NBR 14931*. Rio de Janeiro, 2012
100. **Diamond, S.** The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer. *Cement and Concrete Composites*. 8, 2004, Vol. 26, pp. 919-923.
101. **Sua-iam, G.** *Workability and compressive strength development of self-consolidating concrete incorporating rice husk ash and foundry sand waste – A preliminary experimental study.*,.
102. **Helene, P. R.L.** *La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón*. 1983, AATH, Vol. 10, pp. 25-35.
103. **Ramezaniapour, A. A., khani, M. Mahdi e Ahmadibeni, Gh.** *The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concrete*. 2, 2009, International Journal of Civil Engineerng, Vol. 7, pp. 1-9.
104. **Salas, A. Silvio D., Ruby M, Gutierrez D.L..** *Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete*. 2009, Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 773-778.
105. **Zhi-hai H, Long-yuan L, Shi-gui, D.** *Creep analysis of concrete containing rice husk ash*. 2017, Cement and Concrete Composites, Vol. 80, pp. 190-199.
106. **Silva, R.V. Brito, J. Nabajyoti, Saikia.** *Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates.*,. 2013, Cement & Concrete Composites, Vol. 35, pp. 23-31.
107. **M.Nehd, D. j. e Damatty, A.El..** *Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete*. s.l. : 8, 2003, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1203-1210.
108. **Pandey, A, Brind, K.** *Evaluation of water absorption and chloride ion penetration of rice straw ash and microsilica admixed pavement quality concrete.*. 8, 2019, Helyon, Vol. 5.
109. **Glinicki, M .A., Józwiak, D. -Niedźwiedzka, K. G, M .** *Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures*. 2016, Materials, Vol. 9.
110. **Faraj, R. H., Aryan F. H., Sherwani, A.D.** *Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles.*. 2019, Journal of Building Engineering, Vol. 25.
111. **Kou, S.C.** *Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes*. 2, 2009, Waste Management, Vol. 29, pp. 621-628.

112. **Omrane**, M., Benosman, A.S. e M. Mouli, Y. Senhadji *Use of Thermoplastic Polymer in Mortar Composites to Improve its Chloride Penetration Resistance.*. 2016, International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 22.
113. **Malhotra**, V.M. e Carino, N.J. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2ªEd.: s.l. : CRC Press LLC, 2004.
114. **Beraldo**, A. L. e Vieira, F. F. Ensaio não destrutivo aplicado à argamassa com adição. *Congresso Pan-americano de Ensaio não destrutivo*. 2003, pp. 1-8.
115. **Rodrigues**, M. S. *Caracterização de cinza residual da queima de casca de arroz para a produção de argamassa*. Universidade Estadual de Campinas . 2008. Dissertação de mestrado.
116. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. **NBR 8802**, Rio de Janeiro, 2019.
117. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. **NBR 9778** Rio de Janeiro, 2009.
118. **Químicos**, Ficha de Informações de Segurança de Produtos. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos 24 de 6 de 2015. [Acessado em: 14 de 02 de 2016.] <https://pt.scribd.com/document/361932917/FISPQ-limpol-detergente>.
119. **Lazghab**, M. *Wettability assesment of finely divided solids.*. 2005, Powder technology, Vol. 157, pp. 79-91.
120. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. TÉCNICAS *Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica*, **NBR 1660**. Rio de Janeiro, 2017.
121. **Seben**, L.L, Hoppe, D.A. Projeto de experimento para extração de celulose do polpeamento alcalino da casca de arroz e otimização das variáveis: absorção de água e número kappa. *xxx encontro nacional de engenharia de produção*. 2010.
122. **Button**, S.T. *METODOLOGIA PARA PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL*. 2016.
123. **Ribeiro**, J. L. D. e Caten, C. S. *Projeto de experimentos*. s.l. : Série Monográfica Qualidade, 2014.
124. **Kleinert**, T.R.. *Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem*. 2016. Dissertação.
125. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. TÉCNICAS. *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. **NBR NM 67** Rio de Janeiro, 1998.
126. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. TÉCNICAS. *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. **NBR 5739** Rio de Janeiro, 2018.

127. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. TÉCNICAS. *Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. **NBR 8522** Rio de Janeiro, 2017.
128. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. TÉCNICAS. *Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. **NBR 9779** Rio de Janeiro, 2012.
129. Materials, American Society for Testing and. *ASTM C1202- Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. 2019.
130. **Gryta, M.** *The influence of polypropylene degradation on the membrane wettability during membrane distillation.*. 2, s.l. : Journal of Membrane Science, 2009, Vol. 326, pp. 493-502.
131. **Buendia, A.** *Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete*. 2013, Cement and Concrete Research, Vol. 54, pp. 29-35.
132. **Denes, F., Feldman, D., Hua, Z. Q., Zheng, Z., & Young, R.** *A Cementitious-matrix composites from SiCl<sub>4</sub>-plasma-activated polypropylene fibres.*. 1, 1996, Journal of Adhesion Science and Technology,, Vol. 10, pp. 61–77.
133. **Tahar, Zine-el-abidine.** Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete. *Construction and bulding*. 149, 2017, pp. 91-102.
134. **Parrott, L. J. .** Water absorption in cover concrete. *Materials and Structures*. 1992, Vol. 284, 25.
135. **Harima, E.** *Estabilização da Fase b e obtenção da Fase a da Cristobalita a partir do Resíduo da Casca de Arroz Queimada*. Universidade de São Carlos. São Paulo : s.n., 1997. Dissertação de Mestrado.
136. **Prudêncio, J. R., SANTOS, S.** *Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz*. 1996. pp. 53-62, Workshop, USP .
137. **Della, V.P. L.Kühn e Hotza, D** *Rice husk ash as an alternate source for active silica production.*. 4, 2002, Materials Letters, Vol. 57, pp. 818-821.
138. **Silva, E. J., Tashima, M. M. e Akasaki, J. L** *Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA)*. 2007, HOLOS Environment, Vol. 7, pp. 72-86.
139. **Tashima, M.M.** *Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland*. 2006.

140. **Kieling, A. C.** *Influência da segregação nas características físicoquímicas e atividade pozolânica de cinzas de casca de arroz*. s.l. : XII Encontro Nacional de tecnologia do ambiente construído, 2008.
141. **Madandoust, R.** *Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete*. 2, 2011, biosystems engineering, Vol. 110.
142. **Tuan, V.N G. Ye, K. van Breugel, O. Copuroglu** *Hydration and microstructure of ultra-high performance concrete incorporating rice husk ash*. 2011, Cemente concrete, pp. 1104-1111.
143. **AbuNoaman, Md., RezulKarim, Md. e Islam, Md. Nazrul** *Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete*. 6, 2019, Heliyon, Vol. 5.
144. **Al-manaseer, A.A. e DALAL, T.R** *Concrete containing plastic aggregates*. 1997, Concrete International, Vol. 19, pp. 47-52.
145. **Zareei, S.A.** *Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties*. 2017, Case Studies in Construction Materials, Vol. 7, pp. 73-81.
146. **Mehta, P.K** *Pozzolanic and Cementitious By-Products as mineral Admixtures for concrete: A Critical Review*. Detroit : s.n., 1983, ACZ SP-79, pp. 1-46.
147. **Noaman, M.A. Islam, M.N. Islam, M.R. Karim, M.R.** *Mechanical properties of brick aggregate concrete containing rice husk ash as a partial replacement of cement*. 6, 2018, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 30, pp. 1-10.
148. **Limbachiya, M. Meddah, M.S, Ouchagour, Y.** *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. 1, 2012, Construction and Building Materials, Vol. 27, pp. 439-449.
149. **Matos, L.H.L.D** *Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pet*. universidade estadual paulista “júlio de mesquita filho”-faculdade de engenharia. 2019. Dissertação de mestrado.
150. **Harbec, D, Zidol, A, Tagnit-Hamou, A, Gitzhofer, F.** *Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars*. 1, 2017, Construction and Building Materials, Vol. 134, pp. 142-156.
151. **Nagrle, ] S.D. Hajare, H., Modak, P.R.** *Utilization of rice husk ash*. 4, 2012, International Journal of Engineering Research , Vol. 2.
152. **Mauro, M.T, Silva, C.A.R., Jorge, L.A, Barbosa, M.B.** *The possibility of adding rice husk ash to the concrete*. 2007.

153. **Singh**, L.P. Goel, A., Bhattacharyya, S.K., Mishra, G. *Quantification of hydration products in cementitious materials incorporating silica nanoparticles*. 2, 2016, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 10, pp. 162-167.
154. **Ramezaniapour**, A.A., V.M. **Malhotra** *Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*. A. 2, 1995, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, pp. 125-133.
155. **Mohammadinia**, A. *Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled..* 2019, *Construction and Building Materials*, Vol. 197, pp. 489-496.
156. **Koushkbaghi**, M. *Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate*. 2019, *Construction and Building Materials*, Vol. 202, pp. 266-275.
157. **Correa**, P.M. *Estudo comparativo da influencia da adição de PET e PP p s consumo na produção do concreto estrutural*. Porto Alegre : s.n., 2015. Dissertação de mestrado.
158. **Xu**, W. *Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste*. 1, 2015, *Construction and Building Materials*, Vol. 89, pp. 90-101.
159. **Wolf**, J., Pirskawetz, S. e Zang, A. *Detection of crack propagation in concrete with embedded*. 2015, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 146, pp. 161-171.
160. **Mohseni**, E. *Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano-TiO<sub>2</sub> and rice husk ash..* 2016, *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 656-664.
161. **Sol s-Carca o**, R, I.Moreno, E. *Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity*. 6, 2008, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 1225-1231.
162. **Wang**, J, **Dai**, Q e **Ruizhe S**, **Shuaicheng G**. *Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete*. 10, 2019, *Journal of Cleaner Production* 234, Vol. 234, pp. 1351-1364.
163. **Colin J**, **Vaillancourt**, L.S, *Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams*, *Constr. Build. Mater.* 182 (2018) 561–572.
164. **Cosmes López**, M. F. **Castellanos**, F., e **Cano-Barrita**, P. F. de J., *Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete*, *Ultrasonics*, vol. 73, pp. 88-95, Jan. 2017.
165. **Akand L**, **Wang MY**. *Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete*. *Constr Build Mater.* 2018; 28:32–39

166. **Öktem T, Seventekin N, Ayhan H.** *Modification of polyester and polyamide fabrics by different in situ plasma polymerization methods.* Turk J Chem. 2000;24:275–285.
167. **Hannawi K, Kamali K, Prince W.** *Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates.* Waste Manage. 2010;11:2312–2320....
168. **Glasser FP, Marinho MB.** *Early stages of the hydration of tricalcium aluminate and its sodium-containing solid solutions.* Proc Br Ceram Soc. 1984; 35:221–236.
169. **Glasser FP, Damidot D, Atkins M.** Phase development in cement in relation to the secondary ettringite problem. Adv Cem Res. 1995; 7:57–68.
170. **Li G, Le Bescop P, Moranville M.** *Synthesis of the U phase ( $4\text{CaO}\cdot 0.9\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 1.1\text{SO}_3\cdot 0.5\text{Na}_2\text{O}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ).* Cem Concr Res. 1997;27(1):7–13.
171. **Silva, A.M., Brito, J. Veiga, R.,** *Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars,* Constr. Build. Mater. 71 (2014) 226–236.

## **APÊNDICE A- TABELAS DE COMPOSIÇÕES QUÍMICAS E FÍSICAS DO CIMENTO**

**Tabela A I:** Composição química do cimento CII-F42.

Data	Parâmetros químicos									
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO livre	Resíd. Insolúv.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
3	4,06	18,55	2,46	60,40	3,55	2,97	5,41	0,56	1,38	0,72
5	4,07	18,50	2,56	60,70	3,41	3,01	5,07	0,64	1,04	0,75
7	4,24	18,83	2,71	60,93	3,69	3,00	5,05	0,64	1,22	0,74
11	4,19	18,76	2,81	60,78	3,92	2,97	5,09	0,45	1,00	0,72
14	4,10	18,46	2,60	60,97	3,93	3,05	5,36	0,67	1,47	0,73
18	4,17	18,55	2,63	61,15	4,31	3,00	5,51	0,76	1,50	0,71
20	4,16	18,62	2,84	61,18	4,24	3,04	5,45	0,67	1,38	0,73
24	4,10	18,46	2,66	60,76	4,06	2,94	5,69	0,76	1,36	0,73
26	4,20	18,73	2,86	61,30	4,14	3,04	5,20	0,67	1,62	0,76
28	4,21	18,80	2,83	61,50	4,29	3,08	5,16	0,67	1,60	0,75
Média	4,15	18,63	2,70	60,97	3,95	3,01	5,30	0,65	1,36	0,73
Sd	0,06	0,14	0,14	0,32	0,32	0,04	0,22	0,09	0,21	0,02
Mín	4,06	18,46	2,46	60,40	3,41	2,94	5,05	0,45	1,00	0,71
Máx	4,24	18,83	2,86	61,50	4,31	3,08	5,69	0,76	1,62	0,76

**Tabela A II:** Características físicas do cimento CII-F42.

Data	Parâmetros físicos										
	Exp.	Tempo de Pega		Cons.	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
	Quente	Início	Fim	Normal				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	h:min	h:min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
3	0,00	3:50	4:30	30,0	4.420	0,03	0,30	22,4	39,0	45,0	53,6
5	0,50	4:00	4:45	30,0	4.390	0,05	0,30	22,8	39,2	44,5	52,4
7	0,50	4:00	4:45	30,4	4.430	0,04	0,20	23,0	38,3	44,3	51,3
11	0,50	4:25	5:15	30,5	4.400	0,03	0,20	23,3	37,6	43,7	52,9
14	0,50	4:00	4:45	30,2	4.400	0,03	0,20	22,0	39,2	43,7	50,9
18	0,00	3:50	4:30	30,0	4.520	0,30	1,80	21,6	38,8	43,7	-
20	0,50	3:50	4:30	30,1	4.600	0,20	1,10	21,6	38,8	43,7	-
24	0,50	3:20	4:00	30,1	4.520	0,20	1,40	22,5	37,7	42,3	-
26	0,50	3:25	4:15	30,6	4.470	0,10	0,60	21,5	39,3	43,8	-
28	0,00	3:40	4:15	30,6	4.470	0,20	0,70	22,3	39,2	45,3	-
Média	0,35	3:50	4:33	30,3	4.462	0,12	0,68	22,3	38,7	44,0	52,2
Sd	0,24	0:18:42	0:20:59	0,3	67,95	0,10	0,57	0,6	0,6	0,8	1,1
Mín	0,00	3:20	4:00	30,0	4.390	0,03	0,20	21,5	37,6	42,3	50,9
Máx	0,50	4:25	5:15	30,6	4.600	0,30	1,80	23,3	39,3	45,3	53,6

**Tabela A III:** Composição física do cimento CPV-ARI

Data	Físicos										
	Exp.	Tempo de Pega		Cons.	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
	Quente	Início	Fim	Normal				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	Mm	h:min	h:min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
4	0,50	4:15	5:00	29,9	4.300	0,03	0,30	22,3	39,1	44,2	51,8
6	0,00	4:10	5:00	29,6	4.400	0,02	0,20	22,6	37,8	44,3	52,4
10	0,50	4:00	4:45	29,8	4.340	0,02	0,20	22,3	39,2	43,5	52,4
13	0,00	4:00	4:45	29,7	4.420	0,05	0,30	21,8	38,5	44,2	-
17	0,00	4:00	4:45	30,0	4.390	0,20	1,60	21,5	38,0	43,5	-
19	0,50	3:10	4:00	30,1	4.550	0,10	0,80	23,0	38,2	44,6	-
21	0,50	3:05	4:00	30,0	4.560	0,20	1,00	23,1	37,3	44,3	-
25	0,50	3:15	4:00	30,3	4.440	0,20	1,20	23,0	36,9	43,5	-
27	0,50	3:10	4:00	30,3	4.490	0,20	1,80	21,8	37,3	43,4	-
31	0,50	3:00	3:45	30,2	4.630	0,10	1,20	22,6	37,2	44,3	-
Média	0,35	3:36:30	4:24:00	30,0	4.452	0,11	0,86	22,4	38,0	44,0	52,2
Sd	0,24	0:30:39	0:29:20	0,2	104,22	0,08	0,6	0,6	0,8	0,45	0,3
Mín	0,00	3:00	3:45	29,6	4.300	0,02	0,20	21,5	36,9	43,4	51,8
Máx	0,50	4:15	5:00	30,3	4.630	0,20	1,80	23,1	39,2	44,6	52,4

**APÊNDICE B- EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS**

**Tabela B I:** Equação de regressão do ensaio de compressão axial

<b>Traço I</b>	
28 dias: $43,29 - 1,863 PP - 0,4338 CCA + 0,06162 PP*PP + 0,01042 CCA*CCA + 0,01314 PP*CCA$	(1)
90 dias: $42,31 - 1,642 PP - 0,4314 CCA + 0,06162 PP*PP + 0,01042 CCA*CCA + 0,01314 PP*CCA$	(2)
<b>Traço II</b>	
28 dias: $67,46 - 1,140 PP - 0,2407 CCA + 0,04468 PP*PP + 0,01400 CCA*CCA - 0,00655 PP*CCA$	(3)
90 dias: $82,47 - 1,544 PP - 0,3255 CA + 0,04468 PP*PP + 0,01400 CCA*CCA - 0,00655 PP*CCA$	(4)

**Tabela B II:** Equação de regressão do ensaio de tração na compressão diametral

<b>Traço I</b>	
28 dias: $5,591 + 0,0826 PP + 0,0596 CCA - 0,00109 PP*PP - 0,000804 CCA*CCA - 0,005350 PP*CCA$	(5)
90 dias: $42,31 - 1,642 PP - 0,4314 CCA + 0,06162 PP*PP + 0,01042 CCA*CCA + 0,01314 PP*CCA$	(6)
<b>Traço II</b>	
28 dias: $67,46 - 1,140 PP - 0,2407 CCA + 0,04468 PP*PP + 0,01400 CCA*CCA - 0,00655 PP*CCA$	(7)
90 dias: $6,347 + 0,0812 PP + 0,0442 CCA - 0,00109 PP*PP - 0,000804 CCA*CCA - 0,005350 PP*CCA$	(8)

**Tabela B III:** Equação de regressão do módulo de elasticidade

<b>Traço I</b>	
28 dias: 34,660 - 0,2262 PP (%) + 0,0245 CCA (%) + 0,00674 PP (%)*PP (%) + 0,002981 CCA (%)*CCA (%) - 0,00087 PP (%)*CCA (%)	(9)
90 dias: 35,274 - 0,2705 PP (%) + 0,1279 CCA (%) + 0,00674 PP (%)*PP (%) + 0,002981 CCA (%)*CCA (%) - 0,00087 PP (%)*CCA (%)	(10)
<b>Traço II</b>	
28 dias: 42,991 - 0,2141 PP (%) + 0,0157 CCA (%) + 0,013498 PP (%)*PP (%) + 0,004324 CCA (%)*CCA (%) - 0,005846 PP (%)*CCA (%)	(11)
90 dias: 49,719 - 0,4009 PP (%) - 0,0572 CCA (%) + 0,013498 PP (%)*PP (%) + 0,004324 CCA (%)*CCA (%) - 0,005846 PP (%)*CCA (%)	(12)

**Tabela B IV:** Equação de regressão do índice de vazios

<b>Traço I</b>	
28 dias: 8,138 + 0,1011 PP (%) + 0,0037 CCA (%) - 0,002063 PP (%)*PP (%) - 0,001404 CCA (%)*CCA (%) - 0,000135 PP (%)*CCA (%).....(13)	(13)
90 dias: 7,997 + 0,1113 PP (%) - 0,0497 CCA (%) - 0,002063 PP (%)*PP (%) - 0,001404 CCA (%)*CCA (%) - 0,000135 PP (%)*CCA (%).....(14)	(14)
<b>Traço II</b>	
28 dias: 1,592 + 0,5958 PP (%) - 0,0571 CCA (%) - 0,01779 PP (%)*PP (%) + 0,001462 CCA (%)*CCA (%) - 0,00414 PP (%)*CCA (%)	(15)
90 dias: 1,088 + 0,6243 PP (%) - 0,0692 CCA (%) - 0,01779 PP (%)*PP (%) + 0,001462 CCA (%)*CCA (%) - 0,00414 PP (%)*CCA (%)	(16)

**Tabela B V:** Equação de regressão da absorção de água do concreto

<b>Traço I</b>	
28 dias: $11,9666 + 0,3169 \text{ PP (\%)} - 0,06263 \text{ CCA (\%)} - 0,002142 \text{ PP (\%)*PP (\%)} - 0,000516 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,001878 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(17)
90 dias: $10,7655 + 0,0803 \text{ PP (\%)} + 0,02491 \text{ CCA (\%)} - 0,002142 \text{ PP (\%)*PP (\%)} - 0,000516 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,001878 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(18)
<b>Traço II</b>	
28 dias: $42,908 + 0,2365 \text{ PP (\%)} - 0,0564 \text{ CCA (\%)} - 0,00689 \text{ PP (\%)*PP (\%)} + 0,000372 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,001062 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(19)
90 dias: $1,336 + 0,2062 \text{ PP (\%)} - 0,0474 \text{ CCA (\%)} - 0,00689 \text{ PP (\%)*PP (\%)} + 0,000372 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,001062 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(20)

**Tabela B VI:** Equação de regressão da VPum

<b>Traço I</b>	
28 dias: $0,2220 + 0,00406 \text{ PP (\%)} - 0,00245 \text{ CCA (\%)} - 0,000110 \text{ PP (\%)*PP (\%)} + 0,000016 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,000027 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(21)
90 dias: $0,1895 + 0,00437 \text{ PP (\%)} - 0,00208 \text{ CCA (\%)} - 0,000110 \text{ PP (\%)*PP (\%)} + 0,000016 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} - 0,000027 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(22)
<b>Traço II</b>	
28 dias: $6497 - 101,8 \text{ PP (\%)} - 51,0 \text{ CCA (\%)} + 0,90 \text{ PP (\%)*PP (\%)} - 0,046 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} + 5,09 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$	(23)
90 dias: $8038 - 184,2 \text{ PP (\%)} - 62,2 \text{ CCA (\%)} + 0,90 \text{ PP (\%)*PP (\%)} - 0,046 \text{ CCA (\%)*CCA (\%)} + 5,09 \text{ PP (\%)*CCA (\%)}$ .....(24)	(24)

**Tabela B VII:** Equação de regressão da absorção de água por capilaridade

<b>Traço I</b>									
28 dias: 0,2220 + 0,00406 PP (%) - 0,00245 CCA (%) - 0,000110 PP (%)*PP (%)									
+ 0,000016 CCA (%)*CCA (%) (25)									
90 dias: 0,3023 - 0,00380 PP (%) - 0,002919 CCA (%)									
- 0,000071 PP (%)*PP (%) - 0,000030 CCA (%)*CCA (%)									
+ 0,000244 PP (%)*CCA (%) (26)									
<b>Traço II</b>									
28 dias: 0,2518 - 0,00275 PP (%) - 0,001323 CCA (%)									
- 0,000071 PP (%)*PP (%) - 0,000030 CCA (%)*CCA (%)									
+ 0,000244 PP (%)*CCA (%) (27)									
90 dias: 0,3023 - 0,00350 PP (%) - 0,002812 CCA (%)									
- 0,000063 PP (%)*PP (%) - 0,000021 CCA (%)*CCA (%)									
+ 0,000121 PP (%)*CCA (%) (28)									

**Tabela B VIII:** Equação de regressão da resistência à penetração de íons cloretos

<b>Traço I</b>	
28 dias: 5504 + 67,6 PP (%) - 32,6 CCA (%) - 1,40 PP (%)*PP (%) - 0,477 CCA (%)*CCA (%)	
- 0,575 PP (%)*CCA (%)	(29)
<hr/>	
90 dias: 3963 + 119,4 PP (%) - 10,1 CCA (%) - 1,40 PP (%)*PP (%)	
- 0,477 CCA (%)*CCA (%)	(30)
- 0,575 PP (%)*CCA (%)	(30)
<hr/>	
<b>Traço II</b>	
28 dias: 2844 - 9,3 PP (%) - 20,7 CCA (%) + 0,049 PP (%)*PP (%) + 0,160 CCA (%)*CCA (%)	
+ 0,966 PP (%)*CCA (%)	(31)
<hr/>	
90 dias: 2399 + 20,6 PP (%) - 26,3 CCA (%) + 0,049 PP (%)*PP (%)	
+ 0,160 CCA (%)*CCA (%)	(32)
+ 0,966 PP (%)*CCA (%)	(32)