	Alunorte Barcarena - Pará - Brasil	Nº do documento Alunorte	Folha
			1
			Rev.
			00

**PROGRAMA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA
RELATÓRIO FINAL**

ESTE DOCUMENTO E AS INFORMAÇÕES NELE CONTIDAS SÃO DE PROPRIEDADE DA ALUNORTE, PARA USO EXCLUSIVO NOS SERVIÇOS PERTINENTES, SENDO VEDADA SUA PUBLICAÇÃO OU REPRODUÇÃO PARA OUTROS FINS, SALVO AUTORIZAÇÃO EXPRESSA. ESTE DOCUMENTO DEVERÁ SER DEVOLVIDO QUANDO SOLICITADO.

Revisão	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Revisão	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Folha nº	REVISÃO DAS FOLHAS												Folha nº	REVISÃO DAS FOLHAS													
1														21													
2														22													
3														23													
4														24													
5														25													
6														26													
7														27													
8														28													
9														29													
10														30													
11														31													
12														32													
13														33													
14														34													
15														35													
16														36													
17														37													
18														38													
19														39													
20														40													

Alunorte					Alunorte	Descrição das Revisões
Rev.	Data	Fin.	Proj.	Verif.	Aprov.	
00						PARA APROVAÇÃO
01						PARA INFORMAÇÃO

FINALIDADE DAS EMISSÕES		
(1) PARA APROVAÇÃO/COMENTÁRIOS	(4) PARA INFORMAÇÃO/ CONHECIMENTO	(7) PARA DETALHAMENTO
(2) PARA COTAÇÃO	(5) PARA CONSTRUÇÃO C/PENDÊNCIAS	(8) CONFORME COMPRADO
(3) PARA CONSTRUÇÃO/COMPRA	(6) COMO CONSTRUÍDO	(9) CANCELADO

Sumário

1	OBJETIVO	8
2	CUMPRIMENTO DO ITEM 8.13 DO TAC	8
3	SUMÁRIO EXECUTIVO.....	8
4	ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DOS PROJETOS	11
4.1	RECUPERAÇÃO DE FERRO.....	11
4.1.1	<i>Parceria.....</i>	11
4.1.2	<i>Definição do conceito.....</i>	11
4.1.3	<i>Ensaaios Isolados.....</i>	11
4.1.4	<i>Protótipo.....</i>	13
4.1.5	<i>Considerações finais.....</i>	18
4.1.6	<i>Referencias.....</i>	18
4.2	CONDICIONADOR DE SOLOS	18
4.2.1	<i>Parceria.....</i>	18
4.2.2	<i>Definição do conceito.....</i>	18
4.2.3	<i>Ensaaios Isolados.....</i>	18
4.2.4	<i>Protótipo.....</i>	25
4.2.5	<i>Considerações finais.....</i>	32
4.2.6	<i>Referencias.....</i>	32
4.3	PROPANTES	33
4.3.1	<i>Parceria.....</i>	33
4.3.2	<i>Definição do Conceito e Ensaaios Isolados</i>	33
4.3.3	<i>Protótipo.....</i>	33
4.4	PISOS INTERTRAVADOS.....	33
4.4.1	<i>Parceria.....</i>	33
4.4.2	<i>Definição do Conceito.....</i>	33
4.4.3	<i>Ensaaios isolados.....</i>	34
4.4.4	<i>Protótipo.....</i>	34
4.5	CIMENTO DE BAIXO CARBONO.....	49
4.5.1	<i>Parceria.....</i>	49
4.5.2	<i>Definição do conceito.....</i>	49
4.5.3	<i>Ensaio Isolados.....</i>	49
4.6	COMPONENTES CIMENTÍCIOS.....	54
4.6.1	<i>Parceria.....</i>	54
4.6.2	<i>Definição do conceito.....</i>	54
4.6.3	<i>Ensaaios Isolados.....</i>	54
4.7	AGREGADOS SINTÉTICOS.....	63
4.7.1	<i>Parceria.....</i>	63
4.7.2	<i>Definição do conceito.....</i>	63
4.7.3	<i>Ensaaios Isolados.....</i>	63
5	ESTUDO DE MERCADO.....	68
5.1.1	<i>Dados de mercado.....</i>	68
5.1.2	<i>Estágio Tecnológico das aplicações em estudo.....</i>	75
6	QUADRO DOS PROJETOS	76
6.1	SIDERURGIA.....	76
6.2	CONDICIONADOR DE SOLOS	77
6.3	EXTRAÇÃO DE ÓLEO E GÁS.....	78
6.4	PISOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO.....	79
6.5	FONTE DE FERRO E ALUMÍNIO PARA CLÍNQUER PORTLAND	81
6.6	AGREGADOS SINTÉTICOS	81
6.7	CIMENTO DE BAIXO CARBONO.....	82
6.8	COMPONENTES CIMENTÍCIOS	82
6.9	CONCLUSÃO.....	83

Índice de Figuras

Figura 1: Balanço de massa da recuperação de ferro do RB via flotação.....	11
Figura 2: <i>Roadmap</i> – Macro etapas da obtenção do concentrado de ferro para aplicação siderúrgica	12
Figura 3: Etapas dos ensaios para ajuste do protótipo	14
Figura 4: Fluxograma do processo de recuperação de ferro em escala semi-piloto	15
Figura 5: Equipamentos utilizados na flotação para produção em protótipo do concentrado de ferro.....	16
Figura 6: Equipamentos utilizados na flotação para produção em protótipo do concentrado de ferro.....	17
Figura 7: Amostras das correntes do protótipo	17
Figura 8: Resultados de pH do lixiviado dos condicionadores de solo	19
Figura 9: Resultados de condutividade elétrica do lixiviado dos condicionadores de solo.....	20
Figura 10: Dinâmica de lixiviação do cálcio das formulações de condicionadores de solo.....	21
Figura 11: Dinâmica de lixiviação do magnésio das formulações de condicionadores de solo	22
Figura 12: Dinâmica de lixiviação do potássio das formulações de condicionadores de solo.....	22
Figura 13: Dinâmica de lixiviação do sódio das formulações de condicionadores de solo	23
Figura 14: Aspecto dos lixiviados dos condicionadores de solo	23
Figura 15: (a) Fertilização, (b) semeadura, (c) início da germinação e (d) desenvolvimento.....	25
Figura 16: Montagem do protótipo dos condicionadores de solo	26
Figura 17: (a) temperatura, (b) umidade, (c) irrigação e (d) revolvimento dos condicionadores de solo	27
Figura 18: Aspecto das formulações de condicionadores no início e após 40 dias de compostagem.....	27
Figura 19: Evidências da atividade biológica de fungos e larvas de insetos durante a compostagem	28
Figura 20: Variação da temperatura após 80 dias de execução do protótipo.....	29
Figura 21: pH das unidades aferido após 15, 30, 45, 60 e 75 dias de execução do protótipo	30
Figura 22: CE das unidades aferida após 15, 30, 45, 60 e 75 dias de execução do protótipo.....	30
Figura 23: Parâmetros de qualidade do protótipo de condicionador de solos com RB	31
Figura 24: Propante cerâmico produzido em escala de protótipo com resíduo de bauxita	33
Figura 25: Coleta dos pisos, retirada (a), reposição (b) e acondicionamento para envio (c)	35
Figura 26: Mapa das peças de piso intertravado retiradas do protótipo em cada amostragem	35
Figura 27: Dimensões dos pisos intertravados conforme NBR 9.781	36
Figura 28: Ensaio de resistência a compressão dos pisos intertravados	36
Figura 29: Diagrama do equipamento para ensaio de abrasão dos pisos intertravados.....	37
Figura 30: Etapas do ensaio de abrasão dos pisos intertravados	37
Figura 31: Resistência à compressão dos concretos (0, 100 e 200 dias de exposição).....	40
Figura 32: Comparação da abrasão dos pisos intertravados com especificações da NBR 9.781	41
Figura 33: Absorção de água dos pisos intertravados	42
Figura 34: FRX dos pisos intertravados expostos e não expostos as intempéries.....	43
Figura 35: Comparação das emissões de CO ₂ (T1, T2 e T3 em vermelho) com estudos de referência	46
Figura 36: Desidroxilação das matérias-primas caulínticas	51
Figura 37: Efeito da calcinação sobre a distribuição de tamanhos de partículas (DTP) do RB	51
Figura 38: Efeito do tempo de calcinação a 800 °C sobre a DTP dos materiais caulínticos	52
Figura 39: Desempenho pozolânico das adições preparadas para cimentos compostos.....	53
Figura 40: DRX do cimento CPV e RB.....	56
Figura 41: Absorção de água dos agregados(a) e Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos (b).....	57
Figura 42: Curvas de distribuição acumulada – Relação de aspecto(a) e Esfericidade (b)	57
Figura 43: Variação morfológica dos agregados.....	58
Figura 44: Pastas cimentícias- mini cone de Kantro (a), espalhamento (b) e teor de ar incorporado (c)	59

Figura 45: Módulo de armazenamento de energia (G') das pastas cimentícias <i>versus</i> o tempo	60
Figura 46: Calor acumulado (a) e fluxo de calor (b) ao longo tempo das pastas cimentícias	60
Figura 47: Resistência à compressão (a), módulo de elasticidade (b) - 28 dias das pastas cimentícias.....	61
Figura 48: Fluxograma do processo de produção dos agregados sintéticos.....	64
Figura 49: Betoneira utilizada na rota de produção de agregados via tambor rotativo a seco.....	65
Figura 50: Agregados sintéticos produzidos por tambor rotativo a seco, após sinterização	66
Figura 51: Gráfico de escores e cargas fatoriais para os 2 primeiros Componentes Principais	67

Índice de Tabelas

Tabela 1: Balanço de massa do ensaio preliminar de concentração de ferro	14
Tabela 2: Balanço de massa e composição química das correntes do protótipo	17
Tabela 3: Dosagens dos compostos (em toneladas por hectare).....	19
Tabela 4: Soma das concentrações elementares e coeficientes de variação dos lixiviados.....	21
Tabela 5: Concentração máxima em águas subterrâneas por lixiviação dos condicionadores de solo.....	24
Tabela 6: Descrição da formulações do protótipo dos condicionadores de solo	25
Tabela 7: Concentração dos elementos nos condicionadores de solo após 30 dias de incubação.....	31
Tabela 8: Amostras dos pisos intertravados analisadas até o momento.....	35
Tabela 9: Análise dimensional dos pisos intertravados	38
Tabela 10: Resistência à compressão dos pisos intertravados submetidos às intempéries	39
Tabela 11: Abrasão dos pisos intertravados	41
Tabela 12: Absorção de água dos pisos intertravados	42
Tabela 13: FRX dos pisos intertravados expostos ou protegidos das intempéries	43
Tabela 14: DRX dos pisos intertravados após 100 dias de exposição	44
Tabela 15: Resistências médias à compressão (MPa) dos pisos intertravados.....	45
Tabela 16: Composição do cimento utilizado na produção dos pisos intertravados (%).....	45
Tabela 17: Contribuição (kg/t) dos diversos constituintes do cimento para as emissões de CO ₂	45
Tabela 18: Memorial de cálculo das intensidades de ligante e de CO ₂ para os pisos intertravados	46
Tabela 19: Cálculo da emissão de CO ₂ no transporte da cimenteira à concreteira	47
Tabela 20: Emissões de CO ₂ associadas ao cimento na manufatura dos pisos intertravados	47
Tabela 21: Análise de custo benefício das formulações de pisos intertravados.....	47
Tabela 22: Comparação dos concretos com RB em relação ao concreto de referência.....	47
Tabela 23: Ajustes de fluência na medição da atividade pozolânica dos cimentos compostos	50
Tabela 24: Análise físico-química da matéria prima dos cimentos compostos.....	50
Tabela 25: Determinação da atividade pozolânica dos cimentos compostos.....	52
Tabela 26: Identificação dos agregados utilizados no estudo (fornecidos pela Supermix)	55
Tabela 27: Caracterização física das matérias-primas	55
Tabela 28: Composição química do cimento CPV e RB.....	56
Tabela 29: Composição cimentícias analisadas	58
Tabela 30: Composição química do Resíduo de Bauxita	63
Tabela 31: Formulações utilizadas na fabricação dos agregados sintéticos.....	64
Tabela 32: Resultado das propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos	66
Tabela 33: Aspectos de mercado do RB como material cimentício suplementar.....	68
Tabela 34: Aspectos de mercado do RB como fonte de ferro e alumínio na produção de clínquer	69
Tabela 35: Aspectos de mercado do RB em componentes cimentícios.....	70
Tabela 36: Aspectos de mercado do RB em agregados sintéticos para concretos	71
Tabela 37: Aspectos de mercado do RB em condicionadores de solos.....	72
Tabela 38: Aspectos de mercado do RB como fonte de ferro em siderurgia	73
Tabela 39: Aspectos de mercado do RB em propantes para extração de Óleo & Gás.....	74
Tabela 40: Definição do estágio tecnológico atual dos produtos a partir do RB	75
Tabela 41: Eventos mais importantes do desenvolvimento do concentrado siderúrgico	76
Tabela 42: Eventos mais importantes do desenvolvimento do condicionador de solos.....	77
Tabela 43: Eventos mais importantes do desenvolvimento do propante cerâmico	78
Tabela 44: Eventos mais importantes do desenvolvimento dos pisos de concreto com RB.....	80



N° Alunorte	Folha
	6
	Rev.
	00

Tabela 45: Eventos mais importantes do desenvolvimento do RB como fonte de Fe e Al em clínquer	81
Tabela 46: Eventos mais importantes do desenvolvimento de agregados cerâmicos com RB	81
Tabela 47: Eventos mais importantes do desenvolvimento do cimento de baixo carbono	82
Tabela 48: Eventos mais importantes do desenvolvimento de artefatos de concreto com RB	83

Índice de abreviações

ALM	Analisador de Liberação Mineral
ASE	Área Superficial Específica
BBF	Brasil BioFuels
CD	Composto “estável” de Dendê
CE	Condutividade Elétrica
CF	Caulim Flint
CP	Cimento Portland
CRA	Capacidade de Retenção de Água
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CV	Cinza Volante
DRS	Depósito de Resíduos Sólidos
DRX	Difratometria de raios-X
DSC	Calorimetria Diferencial Exploratória
EVQ	Estudo de Viabilidade de Queima
FRX	Espectroscopia por fluorescência de raios-X
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GLM	Grau de Liberação Mineral
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
ICP	Espectroscopia por Plasma Indutivamente Acoplado
IEA	International Energy Agency
IFC	International Finance Corporation
ICP-AES	Espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente
ISI-TM	Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais
LC ³	Calcined Clay Limestone Cement
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MEV-EDS	Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectroscopia por Energia Dispersiva
MSPs	Materiais Substitutos Potenciais
PNMs	Potenciais Novos Materiais
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RB	Resíduo de bauxita
RBC	Rejeito do Beneficiamento do Caulim
RLV	Rejeito da Lavagem da Bauxita
TBS	Tryptic Soy Broth
TG	Análise Termogravimétrica
TMS	The Minerals, Metals and Materials Society
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
USP	Universidade de São Paulo
VMP	Valores Máximos Permitidos
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

1 OBJETIVO

O objetivo deste relatório é apresentar o produto final das atividades do programa de P&D para utilização de Resíduo de Bauxita, conforme estabelecido no item 8.13 do Termo de Ajuste de Conduta firmado com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade, Ministério Público do estado do Pará e Ministério Público Federal:

“A PRIMEIRA COMPROMISSARIA se obriga em elaborar programa de pesquisa e desenvolvimento, que envolva direta e indiretamente instituições, organismos, universidades e demais setores de pesquisa atuantes e do Estado alinhado com a Política de Inovação Tecnológica do Estado do Pará, no prazo de 3 (três) anos, a partir da assinatura deste documento, que apresentará produto desenvolvido a partir do uso do resíduo de bauxita, com relatórios parciais a cada 6 (seis) meses, preliminar com 18 meses e o conclusivo, ao final dos 36 meses, tendo em vista a necessidade de destinação final dos resíduos de disposição de bauxita produzidos pela empresa, tendo como premissa a superação do estado da arte e levando em consideração as pesquisas já desenvolvidas e existentes no bojo do licenciamento.”

Além de apresentar o resultado final do programa de P&D realizado para cumprimento do TAC, o presente relatório também descreve os avanços decorrentes das atividades realizadas desde o Quarto relatório.

2 CUMPRIMENTO DO ITEM 8.13 DO TAC

O compromisso estabelecido no item 8.13 do TAC, assinado entre a Norsk Hydro Brasil Ltda, Alunorte Alumina do Norte do Brasil S/A (Alunorte), Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade, Ministério Público do estado do Pará e Ministério Público Federal determina que a Alunorte elabore programa de pesquisa e desenvolvimento que apresente produto desenvolvido a partir do uso do resíduo de bauxita, com relatórios parciais a cada 6 (seis) meses, preliminar com 18 meses e o conclusivo, ao final dos 36 meses.

Foram apresentados cinco relatórios, sendo que neste atual e último, mostra-se que quatro produtos foram plenamente desenvolvidos com teste de Protótipo, nos termos do programa de pesquisa e desenvolvimento realizado: 1) concentrado de ferro para siderurgia; 2) condicionador de solo; 3) propante cerâmico; e 4) pisos intertravados de concreto.

Adicionalmente estão bem encaminhados os desenvolvimentos de mais quatro produtos: 1) agregado cerâmico, cuja aplicação é favorável pelo grande volume mas que depende do desenvolvimento e teste de protótipo; 2) cimento de baixo carbono, que já apresenta boas perspectivas de aplicação em decorrência da conformidade com a normatização atual e com a estratégia de sustentabilidade dos clientes potenciais (indústria cimenteira) e depende apenas do desenvolvimento e teste protótipo da formulação; 3) fonte de ferro e alumínio para clínquer Portland que já vem sendo comercializado em outros lugares do globo, e 4) componentes cimentícios.

Assim, cumpriu-se o compromisso assumido perante o TAC por meio do desenvolvimento de quatro produtos em escala de protótipo no âmbito do programa de pesquisa e desenvolvimento e ainda há perspectiva de conclusão de outros quatro. Os investimentos em pesquisa continuarão e os projetos mais promissores serão priorizados.

3 SUMÁRIO EXECUTIVO

Cada projeto é apresentado no capítulo 4, conforme a sistemática de gestão de projetos de inovação, detalhado no primeiro capítulo do 3º relatório parcial. Nesta sistemática, os avanços da pesquisa são definidos em cinco estágios, dos quais os três primeiros – “Definição do Conceito”, “Ensaio Isolado” e “Protótipo”, correspondem àqueles relacionadas à fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D); enquanto os estágios de “Piloto” e “Implementação” correspondem à fase de engenharia, que está além do escopo do programa de P&D.

Os avanços de cada projeto são sumarizados abaixo:

Recuperação de ferro – Após ajustes dos parâmetros de produção do concentrado de ferro a partir do resíduo de bauxita utilizando a rota integrada: atrição/elutriação/flotação, processou-se em escala de Protótipo cerca de 2 toneladas de resíduo de bauxita (RB) a fim de se obter um concentrado de ferro como produto. As condições definidas de processamento resultaram em uma recuperação mássica de 13% e teor de ferro no concentrado de 59,8%. Este material foi encaminhando para produção e caracterização de pelotas que terão seu desempenho siderúrgico testado em comparação às pelotas produzidos com minério de ferro. Apresentou-se um *roadmap* do produto, o qual será avaliado frente a aplicações siderúrgicas, e com base no direcionamento de mercado, a rota desenvolvida pode ser otimizada tanto para aumentar a sua eficiência quanto para atender as especificações dos clientes.

Condicionador de solos – Foi desenvolvido condicionadores de solo utilizando o resíduo de bauxita e a biomassa de dendê em escala de Protótipo com base nos resultados satisfatórios em escala de laboratório. O período de incubação do protótipo foi de 90 dias. Os resultados parciais confirmam que o condicionador de solos produzidos com até 50% de RB atendem as exigências mínimas de capacidade de retenção de água (CRA), capacidade de troca catiônica (CTC) e umidade estabelecidas pela legislação brasileira, bem como todos os elementos potencialmente tóxicos abaixo dos valores máximos de referência (Instruções normativas nº 7, 25 e 35, MAPA). O desempenho do produto em solo monitorado com cultura de sorgo também demonstrou resultados satisfatórios na aplicação agrônômica do produto.

Propantes – O estágio de Protótipo foi concluído com a definição de taxas de produção, fluxos, consumos de energia e rendimento de cada etapa do processo.

Pisos intertravados – Produziu-se com sucesso e testou-se em escala de Protótipo pisos intertravados utilizando resíduo de bauxita. A partir dos resultados conclui-se que todas formulações apresentaram resistência característica superior a 50 MPa, sendo por este critério adequados ao tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão. Com base no monitoramento de até 200 dias de exposição dos pisos à intempéries, não se observou diferenças significativas dos tempos de exposição e de envelhecimento sobre a sua composição química e fases mineralógicas, sendo um indicativo da estabilidade do produto. Com base nos resultados obtidos para as avaliações da NBR 10.004, caso o entulho britado de todas as formulações, estudadas nessa pesquisa, precisem ser destinados como resíduo nas condições atuais, eles serão classificados como Classe II-A (não perigoso). Esta classificação não difere dos resíduos britados da construção civil convencional e, portanto, não haveria necessidade de procedimentos especiais para os pisos com resíduo de bauxita.

Cimentos de baixo carbono – Em fase de Ensaios Isolados se avaliou a atividade pozolânica de três materiais caulíníficos (caulins *Flint* e *Soft*, e rejeito da lavagem da bauxita) e do resíduo de bauxita, com base na calcinação destes materiais. O caulim *Flint* e o rejeito da lavagem da bauxita apresentaram alta atividade pozolânica, de modo que o emprego destes materiais tem o potencial de suprimir o problema das baixas resistências iniciais dos cimentos compostos, desde que mitigadas as dificuldades decorrentes do elevado teor de finos nas adições. A calcinação do RB, em contrapartida, não melhorou suas propriedades pozolânicas, indicando que sua principal função nos cimentos compostos de deverá ser mesmo a de carga de enchimento (fíler). Como continuidade deste estudo, está em andamento o desenvolvimento de formulações cimentícias contendo a mistura de caulim calcinado, fíler calcário e RB. Os resultados até então obtidos demonstram que incorporações de até 25% do RB ao cimento estão alcançando as exigências da norma brasileira que prescreve os requisitos para cimento Portland, tanto em termos mecânicos, quanto físico-químico. Uma vez que os resultados desta fase indicaram grande potencial de sucesso da aplicação e devido à novidade e atividade inventiva envolvida, estuda-se no momento a obtenção de patente. No escopo desta parceria ainda estão previstos ainda as avaliações do cimento de baixo carbono desenvolvido em formulações de concreto, considerando ainda uma análise de ciclo de vida do produto. Tais atividades compreendendo a fase de Protótipo desta aplicação.

Componentes cimentícios – Em fase de Ensaios Isolados realizou-se a caracterização das matérias-primas e a avaliação das pastas cimentícias contendo até 30% de resíduo de bauxita. Com base nos resultados preliminares pode-se concluir que a associação do resíduo com o cimento Portland resultou em alterações na reação de hidratação das pastas. Em suma, quanto maior o teor de RB nas composições, maior e efeito da nucleação das partículas e intensificação da reação dos aluminatos durante a hidratação do cimento. Da mesma forma, as propriedades reológicas foram impactadas pela quantidade de RB utilizado, seja sob solicitação de cisalhamento ou durante o endurecimento, aumentando a tensão de escoamento e viscosidade e acentuando o potencial de aglomeração das partículas nos instantes iniciais. Com relação ao desempenho

mecânico das pastas no estado endurecido, após 28 dias de cura não foram observadas diferenças estatisticamente significativas nas propriedades avaliadas, mesmo com a utilização de até 30% de RB em substituição do cimento Portland. É apresentada uma descrição da investigação geoeconômica e ambiental que foi iniciada e será conduzida até o final desta fase do estudo. O escalonamento (fase de Protótipo) deverá iniciar na sequência, com a avaliação integrada dos resultados para definição dos componentes cimentícios a serem produzidos, desenvolvimento, moldagem e produção escalonada dos componentes para caracterizações tecnológicas.

Clínquer – Após caracterização de laboratório do resíduo de bauxita e avaliação preliminar da sua eficiência como fonte de ferro e alumínio para produção de clínquer Portland, a Votorantim Cimentos de Primavera-PA solicitou a Alunorte cerca de 500 toneladas de resíduo de bauxita como amostra para realização de teste industrial a título de Protótipo. A solicitação para a autorização do teste será protocolada na Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS).

Agregado sintético – Em fase de Ensaios Isolados produziu-se agregados sintéticos utilizando resíduo de bauxita, areia, argila e biomassa, em diferentes proporções, via tambor rotativo. Pode-se concluir pelos resultados preliminares das propriedades físicas que o processo de produção de agregado leve (densidade < 2 g/cm³) é viável utilizando o resíduo gerado na Alunorte com uma incorporação de até 80%. A rota avaliada até o momento, por tambor rotativo a seco, se mostrou adequada para produção dos agregados sintéticos, os quais apresentaram granulometria entre 0,5 e 1,5 cm. Avaliação dos agregados produzidos por extrusão está em andamento. Estes materiais produzidos serão avaliados quanto à estabilidade mecânica e química, de modo a atender as especificações brasileiras, bem como, assegurar o seu desempenho em aplicações em concretos. Dentro deste projeto de pesquisa desenvolvido em parceria com a UFPA, ainda está prevista o escalonamento da produção de agregados sintéticos (Protótipo), com a avaliação do desempenho deste produto em componentes estruturais.

No capítulo 5 é apresentado o resultado do estudo de mercado realizado pela Hatch, o qual forneceu elementos importantes para as aplicações de resíduo de bauxita quanto aos aspectos de potenciais clientes, produtos principais, matérias-primas concorrentes, facilitadores, barreiras e volume potencial de resíduo consumido.

No final deste relatório apresenta-se um sumário do histórico de cada desenvolvimento realizado até o momento, procurando-se situar os objetivos alcançados com os alvos estabelecidos no TAC assinado entre Norsk Hydro Brasil Ltda, Alunorte, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade, Ministério Público do estado do Pará e Ministério Público Federal.

4 ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DOS PROJETOS

Descreve-se a seguir a situação atual de cada projeto vigente.

4.1 Recuperação de ferro

4.1.1 Parceria

Em 23 de Agosto de 2018 foi firmado uma “Parceria de Natureza Técnica e Financeira” com o Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais (ISI-TM), localizado em Belém-PA, referente ao projeto denominado “Processo Bayer rumo à economia circular: recuperação de metais e produção de condicionadores de solo a partir de resíduo de bauxita”. Após discussão do escopo técnico, ajustes no cronograma, elaboração e assinatura de contrato, as atividades da pesquisa iniciaram em janeiro de 2019.

4.1.2 Definição do conceito

Nesta fase definiu-se o conceito de flotação como rota mais promissora para recuperação do ferro contido no resíduo de bauxita (RB). Tal rota foi selecionada a partir dos estudos preliminares reportados nos relatórios anteriores.

4.1.3 Ensaios Isolados

Reportou-se no relatório anterior que as principais fases do RB (hematita, gibbsita, sodalita e anatásio) apresentam boa liberação mineral, com média para as fases de ferro em torno de 80%. Com relação ao processo de concentração de ferro, verificou-se que as etapas de atrição e elutriação devem ser mantidas afim de manter uma boa recuperação de ferro na corrente de fundo e diminuir o consumo de coletor para a corrente de flotados (ganga). Nos testes de bancada obteve-se uma massa média de concentrado de fundo de 17% da alimentação e a concentração de 57,33% Fe_2O_3 , resultados coerentes com os obtidos no teste exploratório feito em 2019 e suficientes para prosseguirmos para a fase de Protótipo.

A Figura 1 mostra o balanço de massas de um processo potencialmente otimizado.

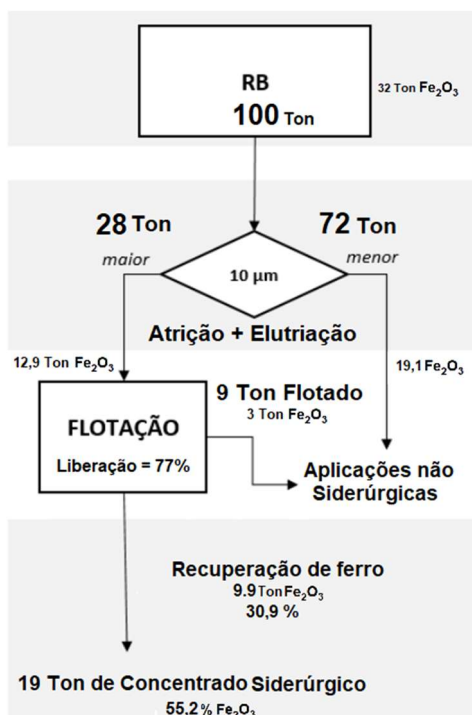


Figura 1: Balanço de massa da recuperação de ferro do RB via flotação

4.1.3.1 Roadmap

A Figura 2 apresenta um *roadmap* simplificado das etapas macro do projeto de recuperação de ferro. As etapas representam marcos já realizados e programados para a sequência do estudo.

A Etapa 1 do *roadmap* corresponde aos ensaios em escala laboratorial, realizados para investigação do comportamento do RB quando submetido à flotação por espuma (*froth flotation*). A flotação por espuma é o tipo mais utilizada no tratamento de minérios. A concentração do minério ferro é, comumente, realizada pelo processo de flotação por espuma reversa catiônica onde, a fase de interesse é mantida deprimida (produto de fundo) e, uma ou mais fases indesejadas (ganga), são flotadas e removidas no topo. Importante destacar que essa operação é tipicamente utilizada para minérios com granulometria maior do que 10 μm (Luz et al., 2010). A aplicação desta operação, com os mesmos aditivos (coletores e depressores) utilizados no tratamento de minério de ferro para o RB levou a resultados preliminares promissores, por exemplo, recuperação mássica de ~20% do RB e concentração de Fe_2O_3 em torno de 58% (reportado no 4º relatório parcial). A obtenção de um produto com teor de ferro elevado na Etapa 1, possibilitou a evolução do processo de flotação para a escala semi-piloto (Protótipo).

A Etapa 2, corresponde ao processamento do RB em equipamentos de escala semi-piloto, tendo como objetivo a confirmação dos resultados laboratoriais e a produção de maior quantidade do produto. O produto – concentrado de ferro, será utilizado para os estudos de aplicabilidade na siderurgia (com possibilidade de aplicação em alto forno ou fornos de redução direta, por exemplo, pela rota TecnoRed). Uma vez obtido o concentrado, serão produzidas as primeiras pelotas (Etapa 3) para comparação preliminar com as pelotas produzidas com minério de ferro sem adição de RB. As limitações e oportunidades vislumbradas até o momento estão descritas no tópico a seguir.

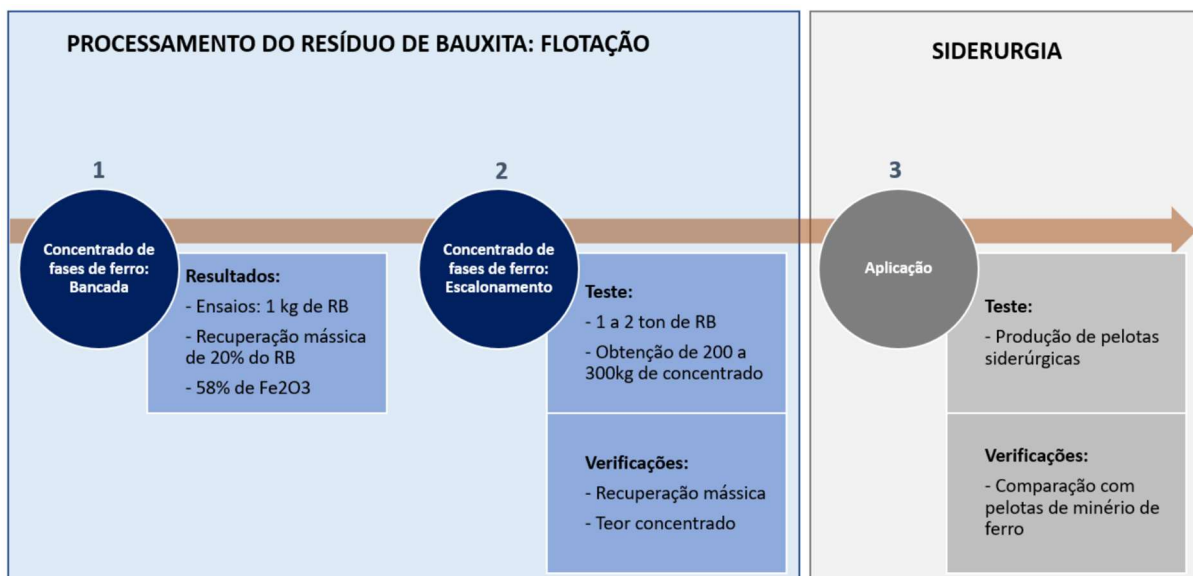


Figura 2: *Roadmap* – Macro etapas da obtenção do concentrado de ferro para aplicação siderúrgica

4.1.3.1.1 Oportunidades e pontos de atenção – Etapa de flotação

As condições principais para a realização efetiva de concentração mineral podem ser relacionadas à três critérios: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica (Peres, 2002).

O grau de liberação mineral corresponde ao percentual de partículas livres, isto é, partículas na qual a superfície livre da espécie mineral é maior do que 90%, em relação às partículas totais. Teoricamente, a diminuição da granulometria do minério resulta em uma liberação progressiva da fase de interesse (Ávila, 2018). Entretanto como o RB não é um minério e sim um material já processado, tal correlação com a granulometria pode não ocorrer. Conforme reportado no 4º relatório parcial, as principais fases presentes no RB (hematita, sodalita, gibbsita) possuem liberação acima de 70%. Logo, pode-se concluir que o critério de liberabilidade das espécies não é um limitante para operações de concentração envolvendo o RB.

A diferenciabilidade refere-se à existência de propriedades físicas, entre as fases presentes, possíveis de serem exploradas de modo a viabilizar sua concentração. Os resultados obtidos em ensaios laboratoriais de flotação reversa catiônica por espuma, demonstraram que é possível concentrar as fases de ferro que compõem o RB através da manipulação seletiva, por meio do uso de aditivos, com base na hidrofobicidade e hidrofiliabilidade das fases presentes.

A separabilidade dinâmica compreende a combinação de fatores e características de um equipamento que viabiliza as condições de separação. A possibilidade de se usar os princípios da flotação para concentrar as fases de ferro do RB foi investigada usando a célula de flotação laboratorial Denver, a qual opera com parâmetros que podem ser usados para escalonamento de equipamentos de flotação convencional. A flotação convencional é indicada para partículas acima de 10 μm (Luz et al., 2010) e partículas menores que este valor (lama) devem ser elutriadas. O RB apresenta distribuição granulométrica fina onde 80% das partículas são inferiores a 38 μm (-400#). Os resultados mostraram uma maior frequência de partículas maiores no produto de fundo, sendo os finos, ou elutriados ou, em testes sem elutriação, reportado como flotado.

Logo, pode-se inferir que há espaço para estudos buscando melhorias em termos de:

- i. Diferenciabilidade:
 - a) Coletor: responsável pela indução de hidrofobicidade das fases indesejadas, principalmente: sodalita, gibbsita e quartzo;
 - b) Depressor: responsável pela manutenção da hidrofiliabilidade das fases de ferro e, dependendo do aditivo, por aglomeração seletiva destas fases.
- ii. Separabilidade dinâmica:
 - a) Hidrodinâmica do equipamento: equipamentos de flotação desenvolvidos para operação com finos ou aplicando nano bolhas;
 - b) Estágios de concentração: projeto de circuito que possibilita maximizar a recuperação e a qualidade em várias etapas.

4.1.4 Protótipo

Realizou-se a fase de Protótipo com o objetivo de se obter como produto um concentrado de ferro com teor de Fe_2O_3 acima de 57%, produzido a partir do RB utilizando a rota integrada: atrição/elutriação/flotação, conforme desenvolvimento da fase de Ensaio Isolados.

4.1.4.1.1 Ajustes dos parâmetros para produção escalonada do concentrado de ferro

Buscando-se otimizar a flotação das frações finas um novo experimento foi conduzido utilizando aditivos coletores alternativos à amina utilizada no experimento anterior (Rota 1, conforme descrito no 4º relatório parcial). Foram avaliados outros quatro coletores fornecidos pela Clariant. Destaca-se que estes aditivos selecionados são comumente utilizados no beneficiamento de minério de ferro. Assim como nos ensaios anteriores, amido de milho foi utilizado como depressor.

A Figura 3 apresenta as fotos das etapas realizadas em bancada para os ajustes e definição dos parâmetros de controle da planta semi-piloto (protótipo). Na etapa de atrição (Figura 3a), ocorre a mistura do RB aos insumos necessários para a execução das etapas de elutriação e flotação. Na etapa de elutriação (Figura 3b), ocorre a deslamagem no qual os finos são removidos como produto de topo (*overflow*) e o produto de fundo (*underflow*) é reservado para novo condicionamento antes de ser submetido à flotação. Na etapa de flotação (Figura 3c), o produto de topo (flotado) é removido e o concentrado de fundo (afundado) é obtido como produto.

O balanço de massa resultante é apresentado na Tabela 1. Observa-se que a massa reportada no concentrado de fundo da flotação de todos os tratamentos está próxima àquela obtida nos testes anteriores em escala de laboratório (~18%). Os resultados de composição química demonstraram que todos os coletores utilizados nesta rodada de teste possibilitaram uma recuperação de ferro semelhante à obtida nos testes de laboratório (produto com média 57% de Fe_2O_3), tendo apenas o tratamento P.5 um resultado um pouco abaixo (51,6% de Fe_2O_3). Com base neste teste seguiu-se para a produção do concentrado de ferro em escala de protótipo.

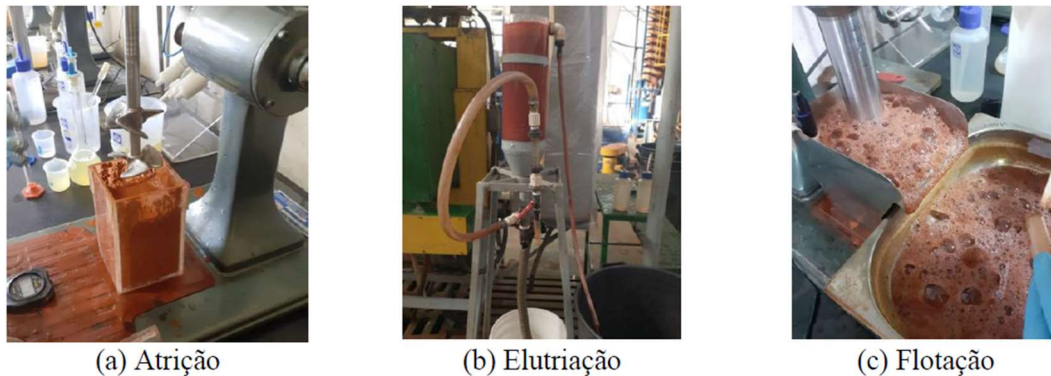


Figura 3: Etapas dos ensaios para ajuste do protótipo

Tabela 1: Balanço de massa do ensaio preliminar de concentração de ferro

Ensaio		Elutriação			Flotação				
		UF ¹	OF ²	AFU ³	FLOT ⁴ 1	FLOT 2	FLOT 3	FLOT 4	FLOT 5
P.1	(g)	310,2	1187,2	215,58	19,72	10,17	11,6	24,15	28,94
	(%)	21%	79%	14%	1%	1%	1%	2%	2%
P.2	(g)	310,1	1187,2	228,18	20,8	18,98	16,73	16,48	8,87
	(%)	21%	79%	15%	1%	1%	1%	1%	1%
P.3	(g)	311	1187,2	227,2	22,47	17,65	18,43	15,67	9,52
	(%)	21%	79%	15%	1%	1%	1%	1%	1%
P.4	(g)	311,6	1187,2	234,01	17,27	16,79	18,6	13,44	11,5
	(%)	21%	79%	16%	1%	1%	1%	1%	1%
P.5	(g)	311,7	1187,2	250,82	25,35	8,32	7,3	4,67	15,22
	(%)	21%	79%	17%	2%	1%	0%	0%	1%

¹ UF: Produto da elutriação (underflow)

² OF: Ganga da elutriação (overflow)

³ AFU: Produto da flotação (concentrado de fundo)

⁴ FLOT: Ganga da flotação (flotado)

4.1.4.1.2 Produção do concentrado de ferro

Aproximadamente duas toneladas de RB foram utilizadas para o teste escalonado (semi-piloto) de flotação para a concentração da fração de ferro. A Figura 4 apresenta um fluxograma simplificado com cada etapa do processo. O RB foi inserido no silo de alimentação, seguindo para o tanque de formação de polpa. A polpa formada seguiu para o *attrition scrubber*, onde recebeu os reagentes para a realização da elutriação. A elutriação ocorreu na “taça” de deslamagem e os produtos da elutriação (*overflow* e *underflow*) foram estocados. A Figura 5 mostra os equipamentos utilizados nestas etapas de atrição e elutriação, bem como o tanque pulmão de estocagem do *underflow* da elutriação o qual foi utilizado para alimentar a etapa de flotação.

O *underflow* (produto) da elutriação foi encaminhado para condicionamento para a flotação. Nesta etapa foram adicionados os reagentes (depressor e coletor) através de bombas dosadoras. A polpa com os aditivos foi bombeada para a etapa de flotação, a qual ocorreu em dois estágios: o primeiro “*Rougher*” onde se remove boa parte da ganga e se obtém um concentrado preliminar; e o segundo “*Cleaner*” onde o concentrado preliminar do estágio anterior é processado até se obter um produto mais enriquecido em ferro (Figura 6).

A Tabela 2 apresenta o balanço de massa global do processamento do RB e a composição química dos produtos obtidos em cada corrente do processo. O concentrado de fundo final obtido (AFU *Cleaner*) correspondeu a 13% da massa útil processada. O teor de fases de ferro obtido no produto final (AFU *Cleaner*) foi de 59,80% Fe₂O₃. Comparando as correntes de afundado (UF) e de flutuado da elutriação (OF), bem como, as correntes de concentrado de fundo (AFU *Cleaner*) e as de flotados (FLOT *Rougher* e *Cleaner*), é possível observar claramente o aumento do teor de Fe₂O₃, TiO₂ e ZrO₂ nos produtos de fundo.

A Figura 7 apresenta as amostras dos materiais produzidos em cada corrente do processo. É possível observar uma clara diferença da textura e tonalidade entre as amostras do produto final (AFU *Cleaner*) e os materiais de ganga (OF Elutriação e FLOT *Cleaner*), bem como do RB alimentado no processo. O concentrado apresenta granulometria visivelmente mais grosseira e coloração mais escura, enquanto os demais são argilosos e têm tonalidades avermelhadas mais claras. Estes aspectos visuais denotam o sucesso da recuperação de ferro e remoção da fração fina pobre em ferro, confirmando os resultados da análise química dados na Tabela 2.

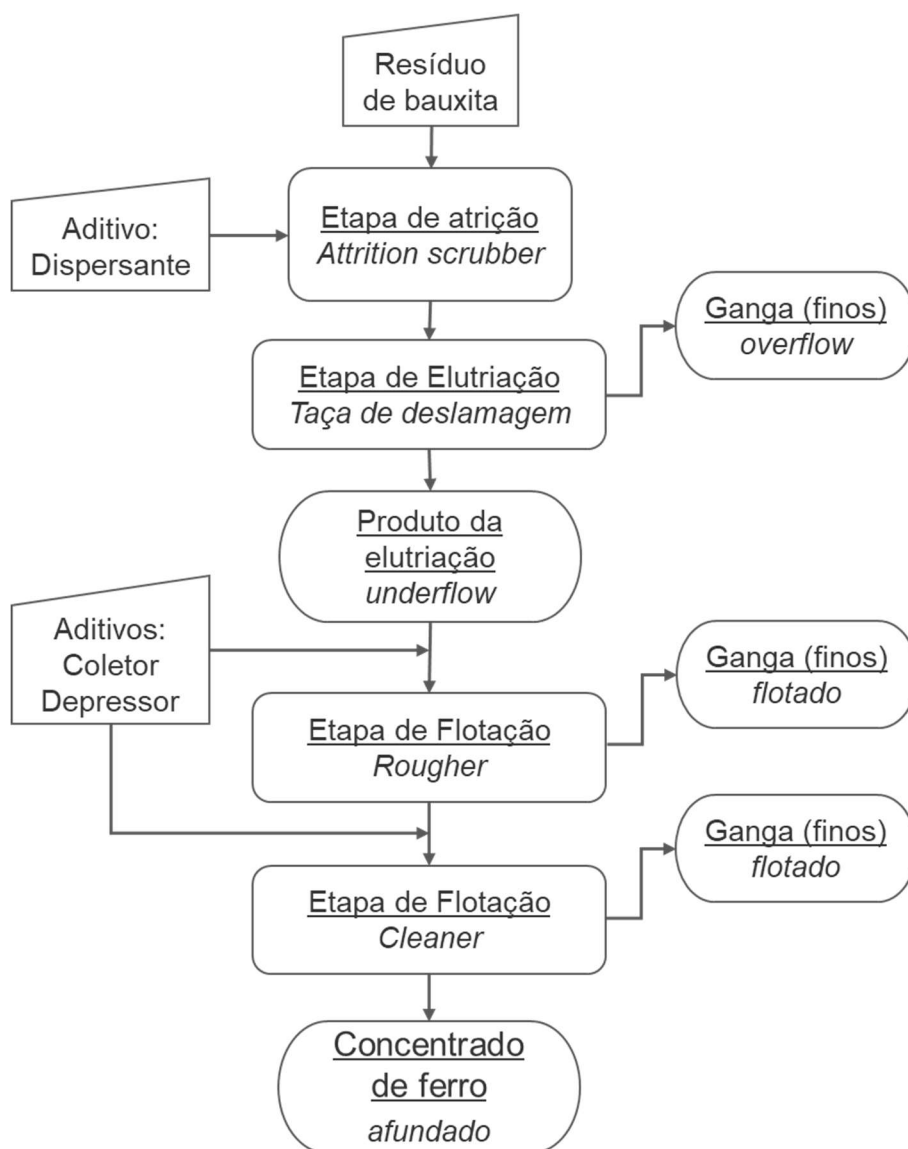


Figura 4: Fluxograma do processo de recuperação de ferro em escala semi-piloto



Figura 5: Equipamentos utilizados na flotação para produção em protótipo do concentrado de ferro



Figura 6: Equipamentos utilizados na flotação para produção em protótipo do concentrado de ferro



Figura 7: Amostras das correntes do protótipo

Tabela 2: Balanço de massa e composição química das correntes do protótipo

Componentes	Alimentação Inicial	Elutriação		Flotação			
		UF	OF	FLOT Rougher	AFU Rougher	FLOT Cleaner	AFU Cleaner
Correntes (kg/h)	162,5	92,7	69,8	35,4	57,3	36,51	20,8
Massa (%)	-	57%	43%	22%	35%	22%	13%
Fe ₂ O ₃ (%)	38,54	39,45	36,72	41,82	-	43,63	59,8
Na ₂ O (%)	9,99	9,68	10,5	9,04	-	8,6	3,7
Al ₂ O ₃ (%)	20,63	20,6	21,47	18,88	-	18,16	9,25
SiO ₂ (%)	15,45	15,21	15,91	14,38	-	13,73	10,42
SO ₃ (%)	0,14	0,13	0,15	0,13	-	0,13	0,16
CaO (%)	1,13	1,19	1,14	1,15	-	1,23	0,71
TiO ₂ (%)	4,77	4,99	4,51	5,45	-	4,98	8,2
V ₂ O ₅ (%)	0,13	0,14	0,12	0,14	-	0,14	0,2
MnO (%)	-	-	-	-	-	-	0,25
ZrO ₂ (%)	0,67	0,94	0,39	1,12	-	0,9	2,31
PF (%)	8,34	7,47	8,93	7,65	-	8,29	4,86

4.1.5 Considerações finais

Após ajustes dos parâmetros de produção do concentrado de ferro a partir do RB utilizando a rota integrada: atribuição/elutriação/flotação, processou-se em escala de protótipo cerca de 2 toneladas de RB a fim de se obter um concentrado de ferro como produto.

As condições definidas de processamento resultaram em uma recuperação mássica de 13% e teor de ferro no concentrado de 59,8%. Este material foi encaminhado para produção e caracterização de pelotas que terão seu desempenho siderúrgico testado em comparação às pelotas produzidos com minério de ferro.

Como apresentado no *roadmap* o produto desenvolvido será avaliado frente a aplicações siderúrgicas, e com base no direcionamento de mercado, a rota desenvolvida pode ser otimizada tanto para aumentar a sua eficiência quanto para atender as especificações dos clientes.

4.1.6 Referencias

Avila, K.S.P. Caracterização mineralógica de rejeitos de flotação de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero utilizando mineralogia quantitativa eletrônica. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

Luz, A. B. et al. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

Peres, A. E. C. et al. Beneficiamento de minérios de ouro. In: Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Cap.2. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p.23-58

4.2 Condicionador de solos

4.2.1 Parceria

Em 23 de Agosto de 2018 foi firmado uma “Parceria de Natureza Técnica e Financeira” com o Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias (ISI-TM), localizado em Belém-PA, referente ao projeto “Processo Bayer rumo à economia circular: recuperação de metais e produção de condicionadores de solo a partir de resíduo de bauxita”. Após discussão do escopo técnico, ajustes no cronograma e elaboração e assinatura de contrato, as atividades da pesquisa iniciaram em janeiro de 2019.

4.2.2 Definição do conceito

Como descrito nos relatórios anteriores a rota *in situ* foi escolhida como o melhor conceito a ser desenvolvido, pela sua maior adequação à implementação em escala industrial devido aos menores custos de implantação e logística e pela possibilidade de utilizá-la para biorremediação das áreas de depósito de RB.

4.2.3 Ensaios Isolados

Resultados anteriores mostraram que o processo de compostagem utilizando resíduo de bauxita ajudou a degradação das fibras da biomassa de dendê *in natura* (RD) e que esta combinação também apresentou a maior queda de pH e promoveu retenção de espécies iônicas. Este resultado foi considerado muito positivo, pois indicou um processo favorável de produção do composto, ainda mais relevante pela observação de pequenos insetos e crescimento de fungos nos tratamentos contendo RB.

O presente relatório apresenta os resultados finais do ensaio de lixiviação em coluna dos compostos produzidos nos ensaios escalonados, conforme descrito no relatório anterior (4º relatório parcial), bem como os resultados de crescimento de plantas utilizando estas formulações. Com base nestes resultados, seguiu-se para a fase de Protótipo.

4.2.3.1 Ensaio de lixiviação em coluna dos condicionadores de solo produzido com RB

As dosagens e componentes de cada formulação testada são mostradas na Tabela 3. Dois compostos produzidos com RB e biomassa do dendê (T2 e T3), dois controles (com 100% de biomassa de dendê), foram misturados com latossolo em diferentes dosagens. Adicionalmente, um controle composto de solo com 0,4% de calcário dolomítico também foi conduzido, a fim de elevar a saturação por base do solo a 80% e corrigir

acidez. Totalizou-se portanto 10 tratamentos, que realizados em triplicata resultaram em 30 unidades experimentais. O objetivo deste ensaio foi simular e avaliar o perfil de lixiviação dos compostos produzidos no teste escalonado em casa de vegetação (3º relatório parcial) em condições de aplicação em solo.

Tabela 3: Dosagens dos compostos (em toneladas por hectare)

T2 25%RB + 75%CD	T3 (41,7%RB + 8,3% solo) + 50%RD + 2% N	C2 100%RD + 2% N
40	40	40
80	80	80
120	120	120

* CD: composto estável de dendê; RD: biomassa de dendê (fibra+bucha+borra)

Durante o experimento, água deionizada foi adicionada três vezes por semana, com dosagem equivalente ao segundo maior valor da média histórica mensal de precipitação em Belém, entre os anos de 2009 e 2019, nos meses de condução do experimento.

A cada 20 dias mediu-se pH e condutividade elétrica (CE) dos lixiviados, com resultados mostrados nas Figura 8 e Figura 9.

O tratamento controle C2, contendo apenas biomassa de dendê enriquecidos com nitrogênio, mostrou um comportamento padrão para compostagem, mas com pH do lixiviado mantendo-se sempre inferior ao solo de referência com calcário, o que indica que este não proporcionou correção da acidez do solo.

Para o tratamento T3, observou-se tendência de estabilização do valor do pH com aumento da dosagem, com valores próximos aos do solo com calcário para as dosagens mais elevadas, o que se configura num bom resultado para a destinação sustentável de maiores quantidades de RB.

Pela comparação dos tratamentos observou-se que a matéria orgânica incorporada ao RB pelo processo de compostagem das formulações T2 e T3 parece não ter promovido alterações sistemáticas sobre o pH do solo. Nesse sentido, o RB presente no condicionador de solos atua favorecendo a correção da acidez do solo, enquanto a matéria orgânica possibilita tanto a neutralização parcial da alcalinidade do RB pela ação microbiana, quanto a disponibilização de nutrientes ao solo.

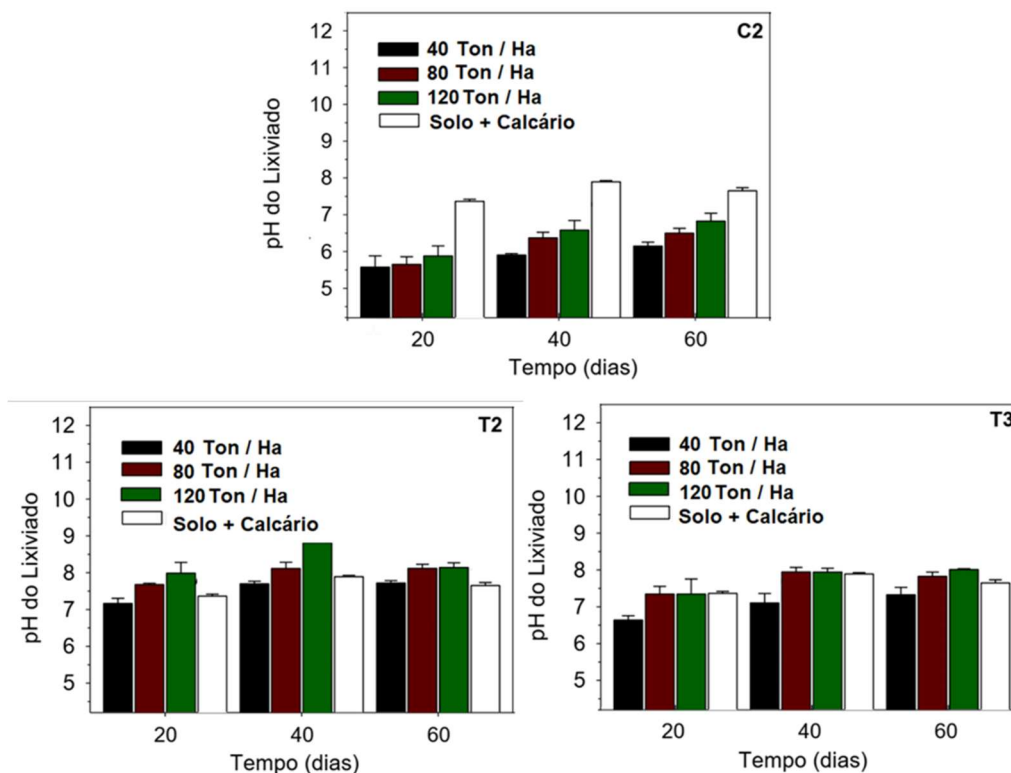


Figura 8: Resultados de pH do lixiviado dos condicionadores de solo

Pelo gráficos de condutividade elétrica (CE) observou-se tendência à diminuição em todos os tratamentos, incluindo o tratamento do solo apenas com calcário. O que evidencia uma elevada mobilidade iônica dos compostos testados, com lixiviação significativa das espécies solúveis. Conforme mostrado nos gráficos, foi observado o comportamento esperado de que com o maior tempo de lixiviação, a CE dos lixiviados diminuísse em todas as doses e tratamentos, devido ao baixo poder tampão do Latossolo, uma vez que este apresenta camada superficial arenosa e menor área de superfície específica (Costa et al., 2008).

O tratamento T2, apresentou condutividade elétrica após 60 dias um pouco maior que a dos demais, os quais evidenciaram valores bem próximos.

Assim, pela comparação dos tratamentos, observou-se que a matéria orgânica incorporada ao RB pelo processo de compostagem das formulações T2 e T3 está associada majoritariamente ao aumento da condutividade elétrica do lixiviado.

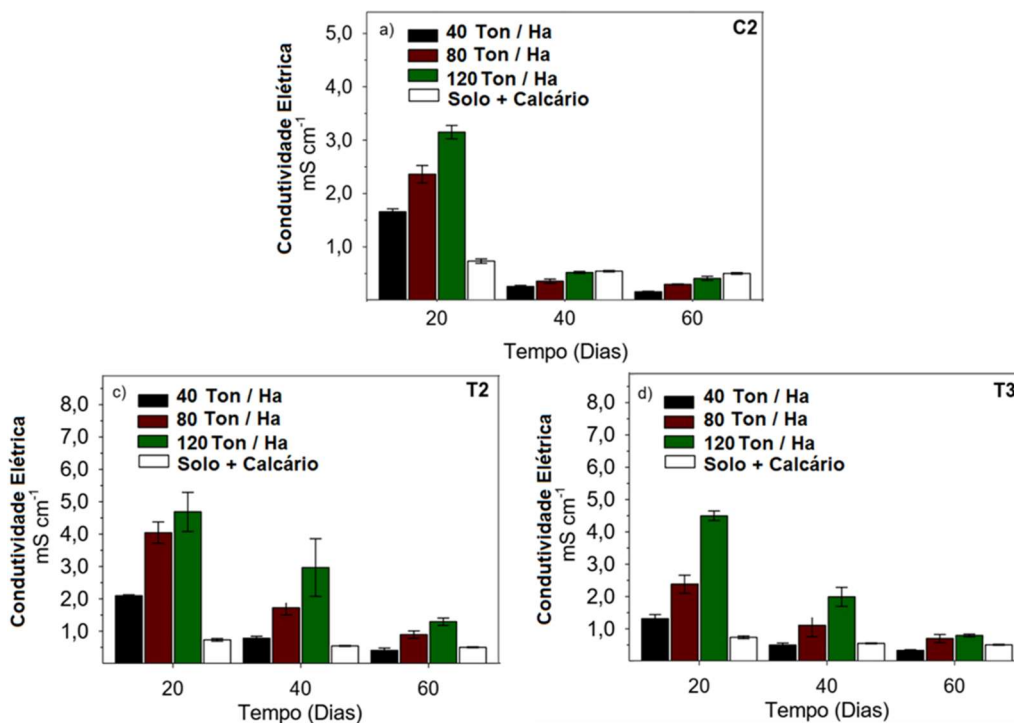


Figura 9: Resultados de condutividade elétrica do lixiviado dos condicionadores de solo

A cada 20 dias foi realizada também a amostragem para determinação das concentrações totais de elementos químicos, extraídos de acordo com a metodologia 3051 USEPA e quantificados via espectrômetro de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Element, 2007). O resultados são mostrados na Tabela 4. Não foram detectados nos lixiviados elementos classificados como potencialmente tóxicos, como por exemplo As, Pb e Cr.

As diferenças observadas entre os impactos da matéria orgânica adicional sobre pH, condutividade elétrica e concentração iônica podem ser decorrentes de alterações químicas das espécies iônicas lixiviadas, como hidrólise do alumínio e do silício ou ainda de outras possíveis interações diferenciais entre íons e matéria orgânica. A possibilidade de a matéria orgânica reter cátions metálicos com potencial para contaminação de solos parece ser muito mais complexa, dependendo de uma combinação de fatores da química do solo, como: teores de óxidos de Fe, Al e Mn, pH, teor de matéria orgânica, textura, potencial redox, competição entre metais pelos sítios de adsorção, temperatura e atividade microbiana (Bertoncini & Mattiazzo, 1999).

Estimou-se a porcentagem de lixiviação dos diferentes elementos químicos utilizando-se a Equação 1, descrita por Aceña-Heras et al. (2019).

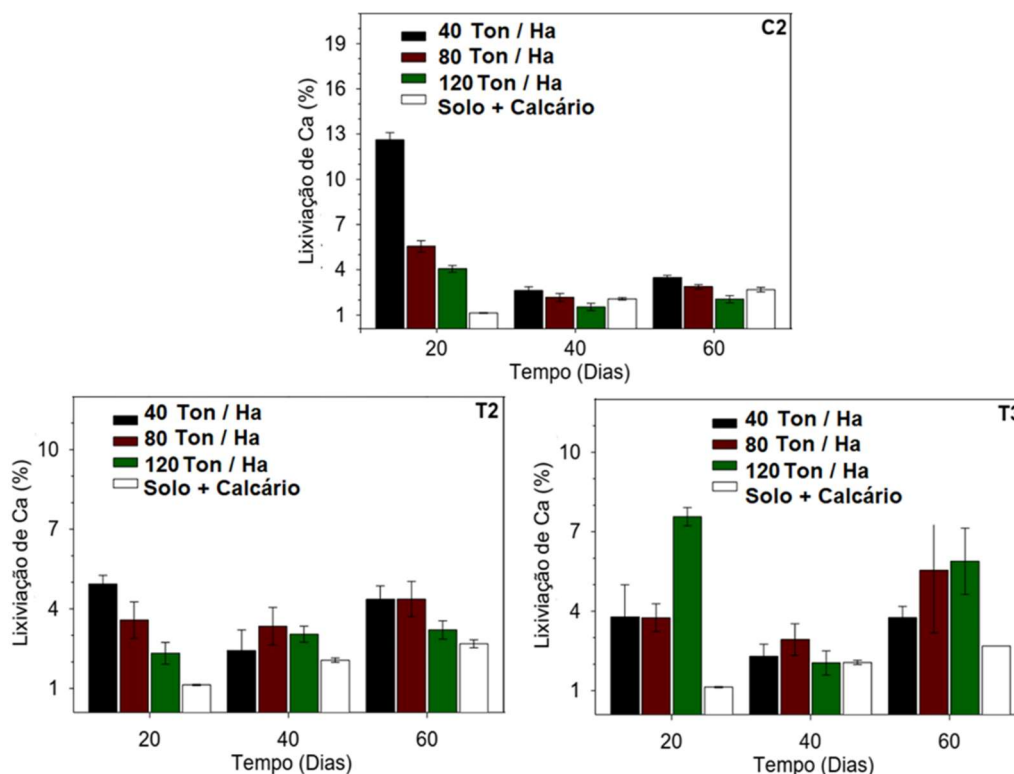
$$\%Lixiviação = \frac{Volume_{(lixiviado)} * Concentração_{(Elemento no lixiviado)}}{Peso_{(seco do material)} * Concentração_{(Elemento no produto)}} \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 4: Soma das concentrações elementares e coeficientes de variação dos lixiviados

Tratamentos	Dosagem	Elementos lixiviados (mg/L)								
		Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	Mn	Si
T2	2% (40 t/ha)	21,6	26,3	17,4	75	5,3	495	2,3	0,2	70,6
	4% (80 t/ha)	44,8	49,1	59,7	185	16,5	1104	3,1	0,3	71,5
	6% (120 t/ha)	51,1	54,6	67	363	22,7	1484	5,4	0,9	60
T3	2% (40 t/ha)	15,2	10,1	10,5	31,1	1	289	1,8	0,1	59,2
	4% (80 t/ha)	36,7	24,5	51,9	68,3	3,5	695	2,2	0,2	59,3
	6% (120 t/ha)	47	49,6	85,5	68,3	8,5	1295	3,5	0,3	61,7
C2	2% (40 t/ha)	2,9	21,4	<0,5	136	15,3	29,2	1,3	0,2	9,2
	4% (80 t/ha)	5,2	23,1	4,5	471	18	33,2	1,9	0,1	9,5
	6% (120 t/ha)	6,6	24,9	3,7	698	23,3	31	2,3	0,1	11,2
Calcário	0,4%	<0,5	114	<0,5	6,6	73,8	28,5	0,8	0,1	2,2

Os resultados das análises químicas da Tabela 4 são traduzidos nas Figura 10 a Figura 13, onde é apresentada a dinâmica de lixiviação dos elementos mais relevantes para o solo (cálcio, magnésio, potássio e sódio) ao longo do tempo (20, 40 e 60 dias).

A concentração de cálcio no lixiviado do tratamento contendo solo + calcário foi a única a aumentar ao longo do tempo, o que é esperado em função da dissolução da rocha calcárea no solo. Na primeira coleta (20 dias) a lixiviação de cálcio em todos os tratamentos foi maior que o do controle contendo calcário, enquanto nas demais coletas os valores tendem a ser iguais.


Figura 10: Dinâmica de lixiviação do cálcio das formulações de condicionadores de solo

Observou-se lixiviação do magnésio similar ao cálcio com as primeiras dosagens dos condicionadores apresentando liberações de magnésio maiores que às do controle de calcário, exceto para a formulação T3. Já para a última dosagem, observa-se menor intensidade de lixiviação, em relação ao controle de calcário para todas as formulações.

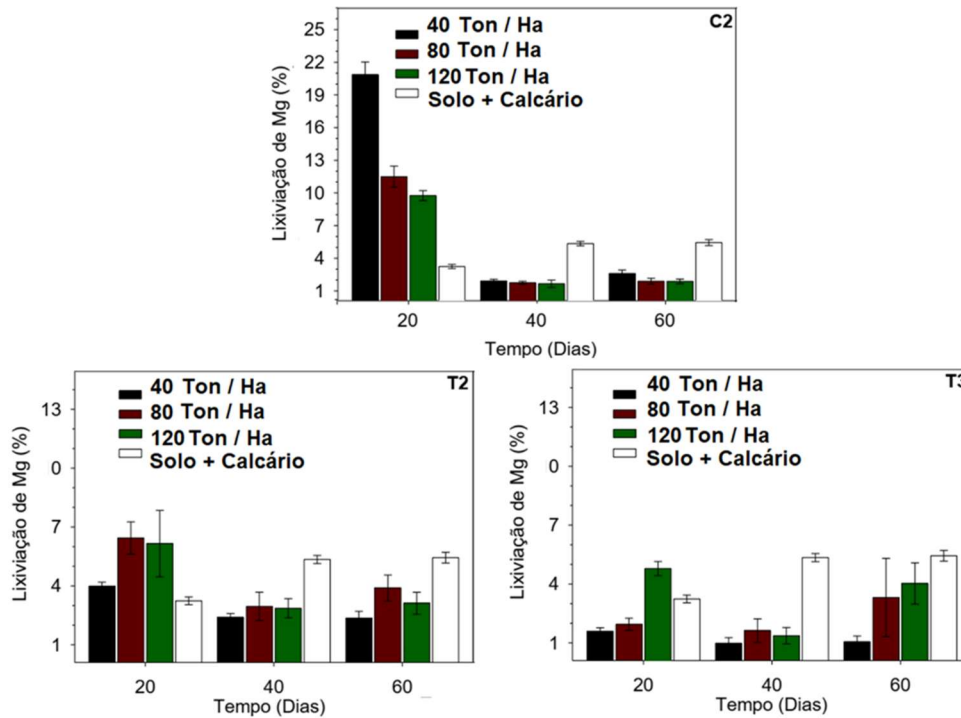


Figura 11: Dinâmica de lixiviação do magnésio das formulações de condicionadores de solo

Com relação a lixiviação de potássio, observou-se que as dosagens das formulações T2, T3 e C2 não tiveram influência. Também não se diferenciou em relação ao controle de calcário, exceto para a maior dose da T3, que nos 20 primeiros dias mostrou-se inferior à dos demais tratamentos. Observa-se redução significativa da lixiviação de potássio da segunda coleta em diante para todos os tratamentos.

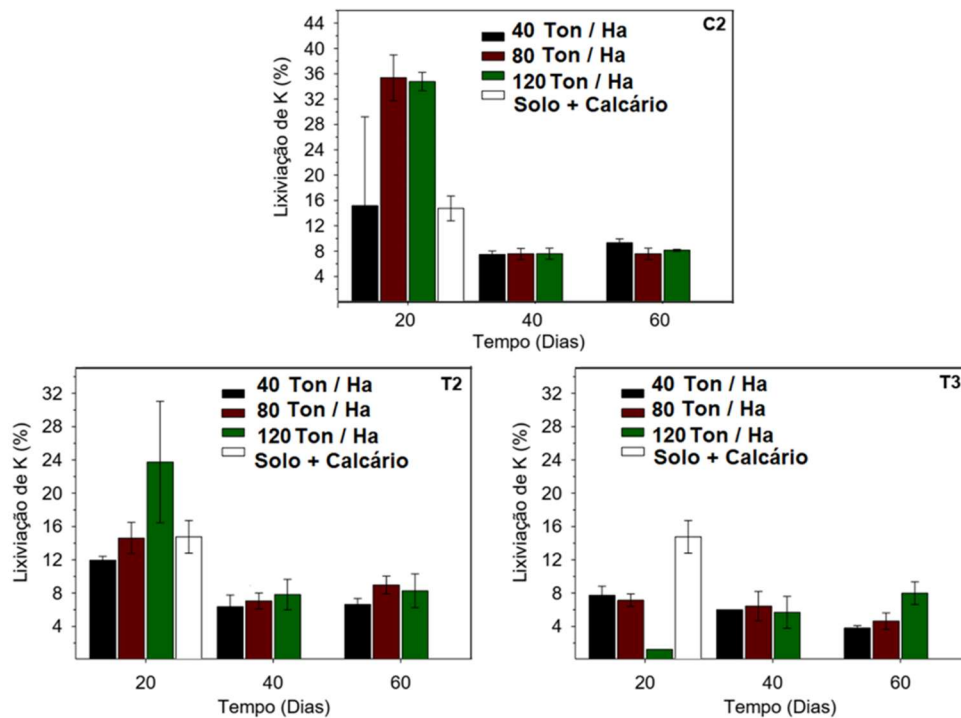


Figura 12: Dinâmica de lixiviação do potássio das formulações de condicionadores de solo

Nota-se na coleta a 20 dias que a intensidade de lixiviação de sódio mostrou-se mais alta para o controle de calcário (o dobro, por exemplo, que a do tratamento com 40 t/ha de RB: 28% e 14%, respectivamente).

Em geral o perfil de lixiviação do sódio mostrou-se similar ao do potássio, com as maiores intensidades de lixiviação nos primeiros 20 dias, com pouca influência da dosagem. As diferentes tendências de lixiviação, observadas na comparação com dosagens equivalentes de RB entre as formulações T2 e T3, talvez possam ser explicadas considerando-se a provável cinética mais lenta da biomassa de dendê *in natura* (utilizada em T3) para a produção de ácidos orgânicos, quando comparada com a do composto estável de biomassa de dendê (utilizado em T2). A maior disponibilidade de ácidos orgânicos nas formulações T2 podem estar intensificando reações com espécies alcalinas e consequente a solubilização de cátions metálicos.

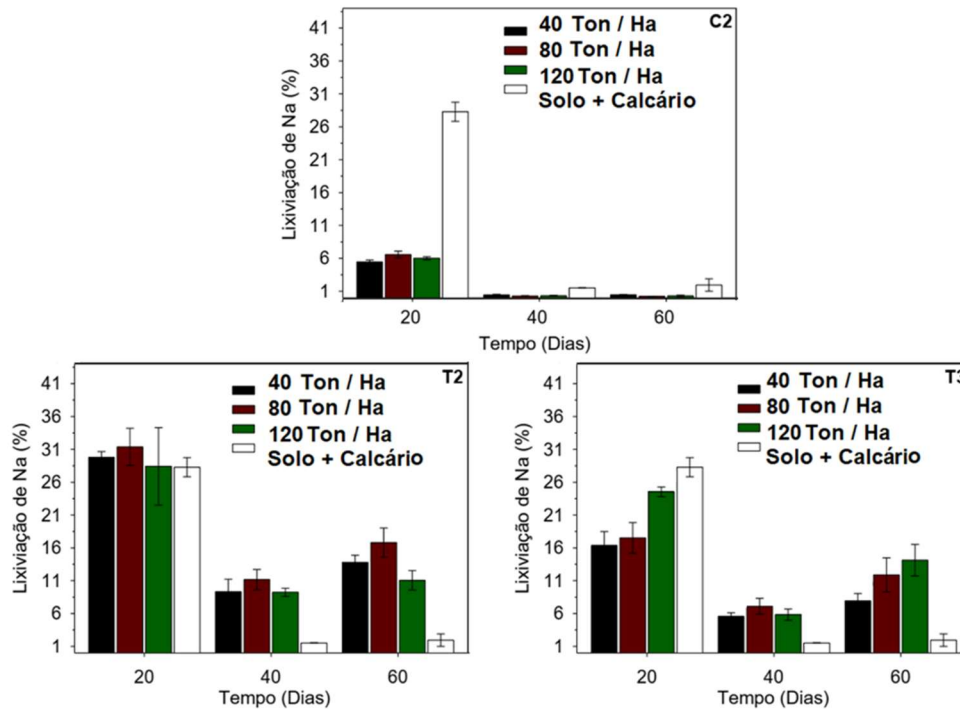


Figura 13: Dinâmica de lixiviação do sódio das formulações de condicionadores de solo

Embora tenha apresentado uma intensidade de lixiviação baixa (< 2%) o ferro parece ter sido determinante na coloração dos diferentes lixiviados, como pode ser observado na Figura 14. Observa-se uma significativa alteração de coloração apenas para os lixiviados que contém RB (T2 e T3). Além da aparente correlação com a concentração de RB (consequentemente com a de ferro). Outras possíveis variáveis que podem estar associadas às diferença coloração são a presença de matéria orgânica, a condutividade elétrica e os estados de óxido-redução.



Figura 14: Aspecto dos lixiviados dos condicionadores de solo

Estimou-se o eventual impacto máximo sobre águas subterrâneas por comparação com os limites estabelecidos na resolução do CONAMA 420/2009, usando como referência as maiores dosagens testadas das formulações (120 t/ha para T2, T3 e C2), incorporadas na camada arável do solo (0 – 20 cm) após

percolação de 553 mm de precipitação. Os resultados são mostrados na Tabela 5. Observa-se que nenhum elemento apresentou concentrações acima da resolução normativa do CONAMA.

Em relação ao sódio, a resolução do CONAMA não define valores máximo admissíveis, devendo cada estado estabelecer seus próprios limites para este elemento, o que ainda não foi feito no estado do Pará. Destaca-se que embora o tipo de estimativa aqui exposto seja útil para avaliar a capacidade máxima de lixiviação dos elementos químicos, ele não representa em sua totalidade um cenário realista da aplicação em campo onde há diferentes fatores de interações como por exemplo as plantas, que também contribuem nos processos de lixiviação e imobilização de elementos químicos do solo (Brennan et al., 2014).

Tabela 5: Concentração máxima em águas subterrâneas por lixiviação dos condicionadores de solo

Elemento	Valor de intervenção em água subterrânea ¹ (µg/L)	Concentração do lixiviado		
		T2 (µg/L)	T3 (µg/L)	C2 (µg/L)
Na	-	20805	18157	434
Al	3500	716	658	93
Sb	5	< LD	< LD	< LD
As	10	<1,4	<1,4	<1,4
Ba	700	< LD	< LD	< LD
B	500	<140	<140	<140
Cd	5	<0,4	<0,4	<0,4
Pb	10	<1,1	<1,1	<1,1
Co	70	< LD	< LD	< LD
Cu	2000	17,2	14,1	0,9
Cr	50	18,8	4,1	2,2
Fe	2450	940	1199	51
Mn	400	13,4	5,2	1,9
Hg	1	<0,1	<0,1	<0,1
Mo	70	< LD	< LD	< LD
Ni	20	<0,7	<0,7	<0,7
Ag	50	< LD	< LD	< LD
Se	10	< LD	< LD	< LD
Zn	1050	2,8	2,1	2,1

¹Limites estabelecidos pela CONAMA 420/2009. LD = Limite de detecção do método analítico.

4.2.3.2 Avaliação preliminar de utilização do composto utilizando cultura de Sorgo

Dando seguimento a avaliação dos condicionadores produzidos nos testes escalonados, realizou-se um experimento preliminar visando avaliar a influência destas formulações sob plantas. O solo dos tratamentos contido nas colunas de lixiviação recebeu dose de fertilizante em cobertura, seguindo as recomendações agrônômicas para a cultura do sorgo. Três sementes de sorgo foram semeadas por vaso e aplicou-se irrigação, a fim de garantir um patamar de umidade acima de 60% no solo (Figura 15).

As plântulas de sorgo germinaram e cresceram dentro do padrão esperado para a cultura até quinze dias de experimento, não sendo observados sintomas de deficiência nutricional ou toxidez nos tratamentos contendo o RB no período. Ao contrário, visualmente, os tratamentos que possuíam RB, tanto pelas formulações elaboradas a partir de RB e biomassa vegetal, como somente RB *in natura* no solo, apresentaram crescimento vegetal similar ao solo onde foi aplicado o calcário e superior ao solo sem correção e adubação. Testes de crescimento de planta utilizando cultura Braquiária serão realizados utilizando os condicionadores de solo produzidos na fase de Protótipo.

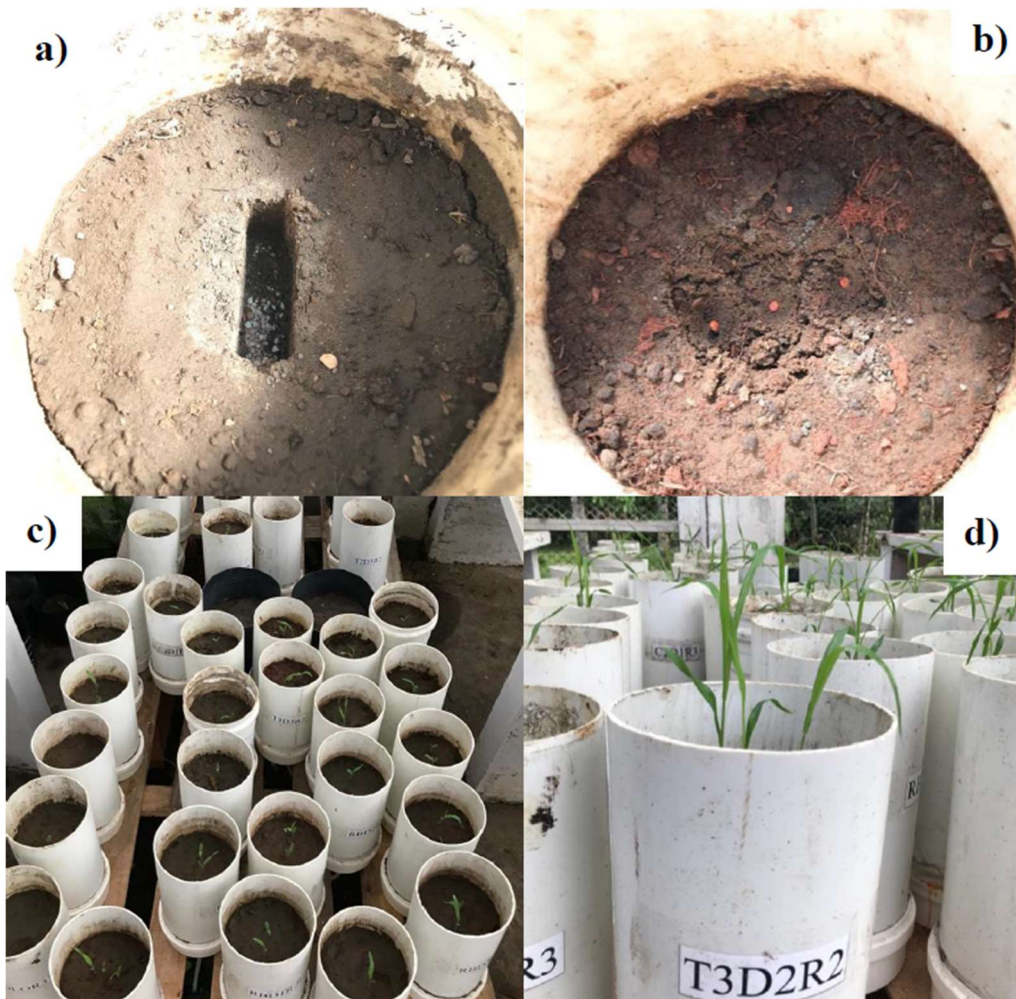


Figura 15: (a) Fertilização, (b) semeadura, (c) início da germinação e (d) desenvolvimento

4.2.4 Protótipo

Baseado nos bons resultados obtidos na fase de Ensaio Isolado, utilizou-se as formulações mais promissoras, dentre aquelas desenvolvidas (como descrito na seção 4.2.3). As formulações dos tratamentos utilizados estão sumarizadas na Tabela 6. Ao total, foram realizados 6 tratamentos utilizando duas formulações com RB (T1 e T3) e um controle (sem RB). Para estas formulações foram testados dois inoculantes, um comercial (IC) e um desenvolvido pelo ISI-TM (IS).

O objetivo desta fase foi obter como produto um condicionador de solos que atenda às instruções normativas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), nº 35 de 04 de julho de 2006 (Capacidade de troca iônica e Capacidade de retenção de água), nº 25 de 23 de julho de 2009 (teores de N total, C orgânico, relação C:N e Umidade) e nº 7, de 12 de abril de 2016 (metais potencialmente tóxicos).

Tabela 6: Descrição da formulações do protótipo dos condicionadores de solo

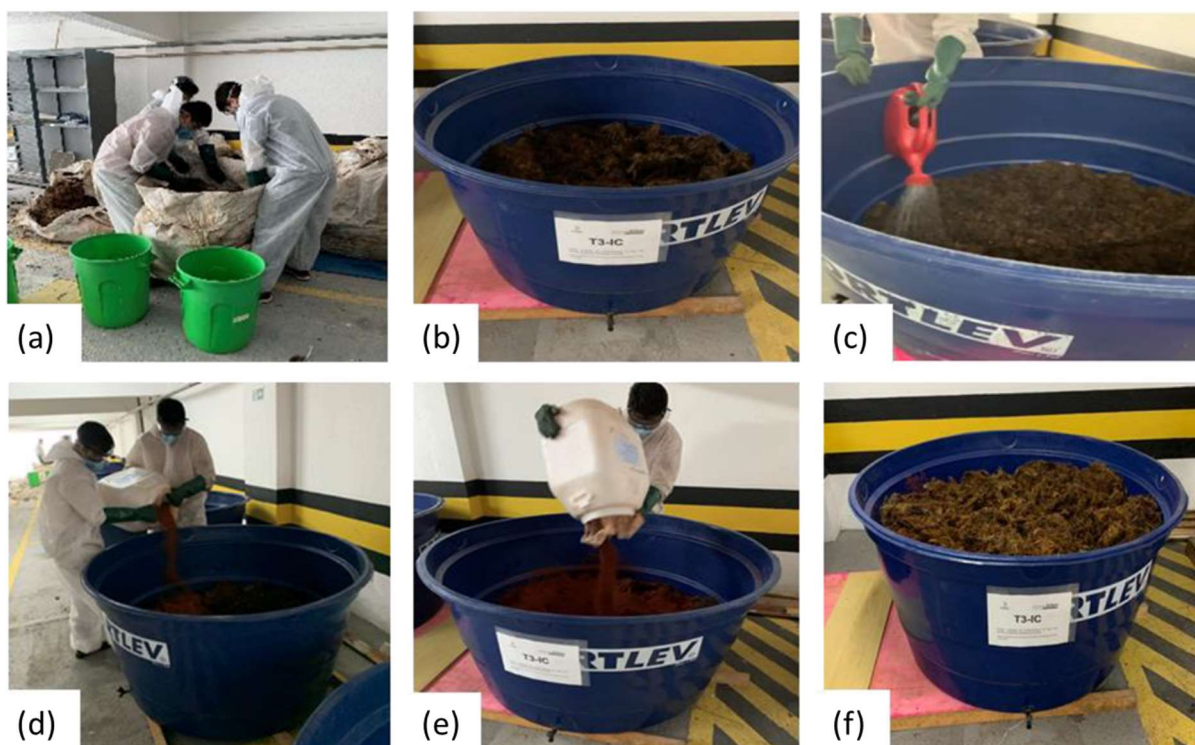
Componentes	Inoculante comercial			Inoculante ISI-TM		
	Controle	T1-IC	T3-IC	Controle	T1-IS	T3-IS
RB	0	25	50	0	25	50
Biomassa de Dendê*	100	75	50	100	75	50

* *in natura* – Fibra 37,5%, Bucha 62,5%

A relação carbono/nitrogênio próxima de 30:1 foi escolhida por ser a mais indicada para o processo de mineralização da matéria orgânica.

O Inoculante comercial consiste de cultura mista das espécies: *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* e *Pseudomonas fluorescens*. O Inoculante ISI-TM foi desenvolvido no laboratório de biotecnologia mineral do ISI-TM, conforme descrito no relatório anterior.

Por conta de dificuldades logísticas impostas pela atual pandemia de Covid 19 decidiu-se simplificar o desenho do protótipo do condicionador de solos (*via in situ*) em relação ao inicialmente planejado, sendo este realizado com menor volume e nas dependências do ISI-TM (Belém-PA). A fase protótipo teve início em maio/2021 e foi dimensionada para produção de cerca de 200 kg de cada formulação. As formulações foram acondicionadas em caixas de polietileno com capacidades entre 1.000 e 2.000 L, conforme os volumes finais de cada uma (Figura 16), sem tampa para facilitar aeração, evitando-se assim a ocorrência de nichos sob condição anaeróbica.



(a) desembalagem da biomassa de dendê; (b) formação da 1ª camada da biomassa; (c) adição do inóculo microbiano; (d) e (e) adição do RB; (f) aspecto final do protótipo

Figura 16: Montagem do protótipo dos condicionadores de solo

O experimento foi iniciado em temperatura ambiente, com umidade do solo ajustada para 60% da sua capacidade de retenção da água, com água desmineralizada. Temperatura e umidade foram monitoradas diariamente, sendo a umidade reajustada, caso necessário com a adição de água. A cada 7 dias foi realizado o revolvimento dos compostos para aeração e homogeneização (operações ilustradas na Figura 17).

Amostras para caracterização foram coletadas durante a montagem do experimento e amostragens de cada composto foram realizadas após 30, 60 e 90 dias para determinação da composição elementar, pH e condutividade.

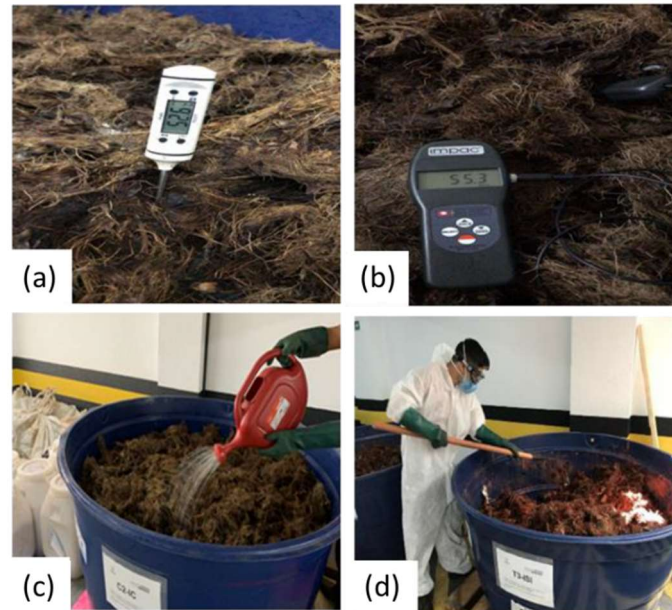


Figura 17: (a) temperatura, (b) umidade, (c) irrigação e (d) revolvimento dos condicionadores de solo

A Figura 18 compara o aspecto dos compostos no início e após 40 dias do experimento e a Figura 19 mostra as evidências da atividade biológica de fungos e larvas de insetos após este tempo, mesmo nas unidades com 50% de RB, indicando que o processo de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, de compostagem ocorreu satisfatoriamente.

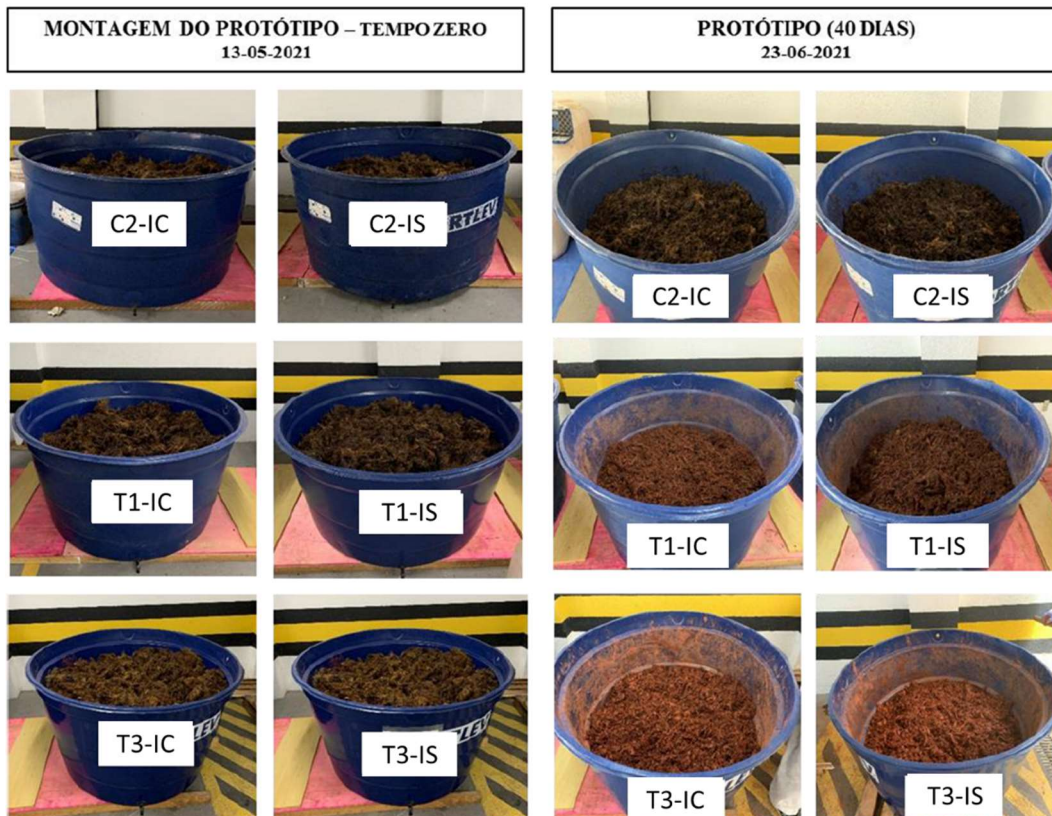


Figura 18: Aspecto das formulações de condicionadores no início e após 40 dias de compostagem



Figura 19: Evidências da atividade biológica de fungos e larvas de insetos durante a compostagem

A compostagem é um processo de decomposição microbiológica de substratos orgânicos, apresentando uma fase exotérmica durante a bioestabilização, que diminui ao longo da humificação do composto (EMBRAPA, 2004). No processo de compostagem é possível observar três fases: uma inicial sob temperaturas moderadas (30 – 45 °C) onde os microrganismos mesofílicos se adaptam e iniciam o consumo dos componentes mais facilmente degradáveis, desencadeando o aumento da temperatura (Kiehl, 1998); segunda fase, onde há o predomínio dos microrganismos termofílicos, e a temperatura das pilhas é superior a 50 °C, havendo a máxima decomposição da matéria orgânica. O tempo de duração da fase termofílica depende da composição do material orgânico compostado, havendo a diminuição gradativa da temperatura e retorno da população mesofílica, responsável pela degradação das moléculas mais recalcitrantes; e última etapa que corresponde a maturação do composto, onde a temperatura retorna próxima da temperatura ambiente e há a mineralização da matéria orgânica e obtenção do composto maduro (Dal Bosco, 2017).

Nesse processo de digestão da matéria orgânica pela atividade dos microrganismos, ocorre à liberação de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio das moléculas e metabólitos orgânicos (Kiehl, 1998). Para que ocorra um processo eficiente de compostagem (elevação da temperatura, digestão da matéria orgânica e produção de compostos humificados) a umidade ideal deve ser mantida em torno de 60-80%, permitindo um meio adequado para a ocorrência das reações bioquímicas e ao mesmo tempo evitando a condição de anaerobiose, uma vez que o processo necessita de oxigênio (aeróbico). Os resultados (após 80 dias de compostagem) da temperatura das unidades estão dispostos na Figura 20.

Após o 3º dia, todas as unidades atingiram temperaturas maiores que 40 °C. As unidades controle (C2-IC e C2-IS) e contendo 25% de RB (T1-IC e T1-IS) mantiveram temperaturas superiores a 50 °C por aproximadamente 25 dias, enquanto as unidades contendo 50% de RB (T3-IC e T3-IS) apresentaram apenas um pico de temperatura em torno de 50 °C, logo seguido de declínio. Quando comparado ao experimento de produção do condicionador de solos em escala laboratorial, as temperaturas máximas atingidas no ensaio escalonado foram bastante superiores. O período termofílico perdurou por aproximadamente 25 dias.

Adicionalmente, constatou-se que ambos os inóculos comercial (IC e IS) foram eficazes, e se observou que não houve diferença entre eles com relação ao perfil de temperatura das unidades.

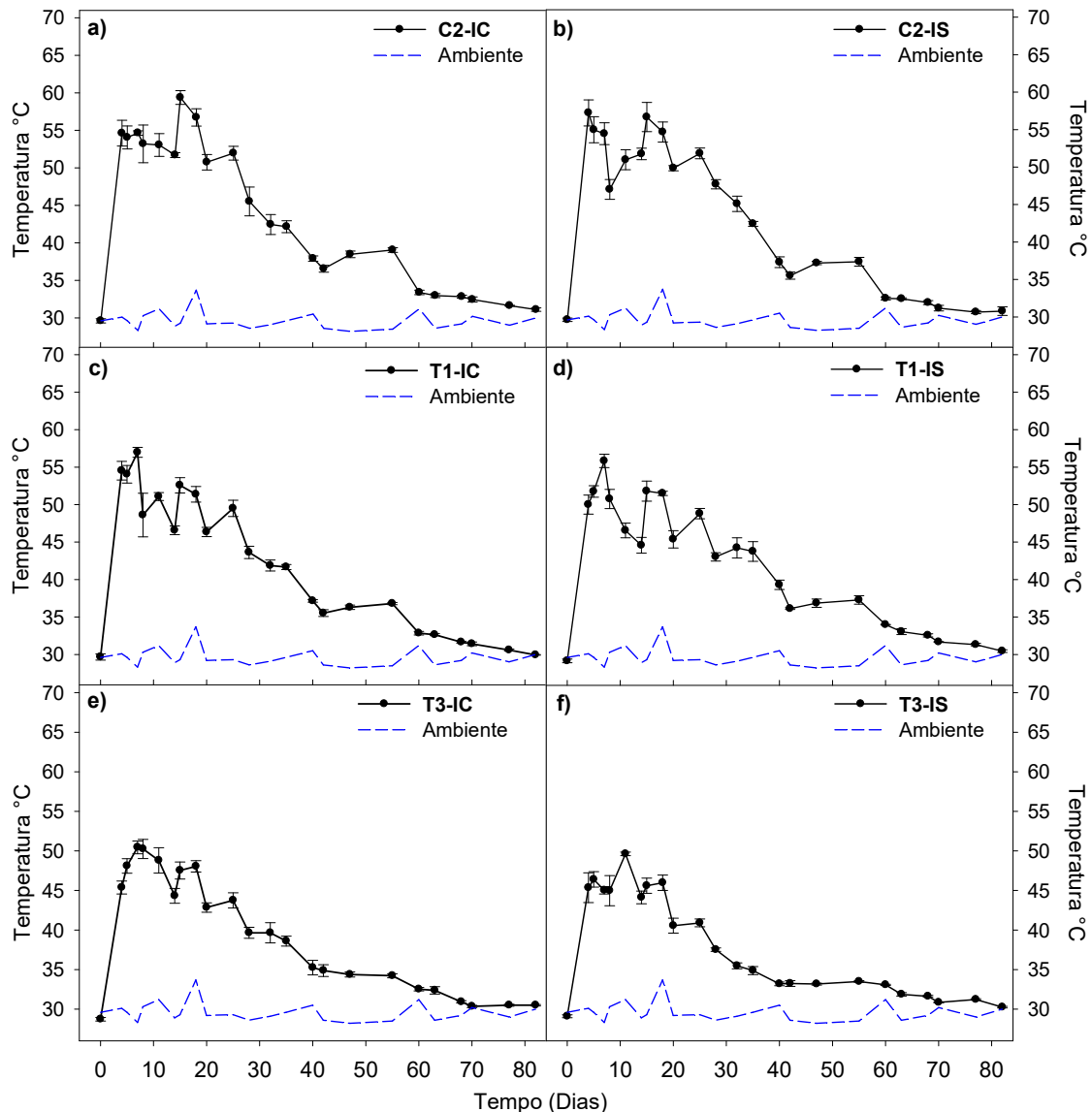


Figura 20: Variação da temperatura após 80 dias de execução do protótipo

Os valores de pH e CE foram aferidos quinzenalmente, no período entre o 15º e 75º dia da produção do composto após o revolvimento e homogeneização do material, e os resultados estão reportados nas Figura 21 e Figura 22, respectivamente. Os tratamentos de controle (C2-IC e C2-IS) apresentaram redução nos valores de pH, mantendo em torno de 5,3 a 5,5 após o 45º dia. Os tratamentos com RB (T1-IC, T1-IS, T3-IC e T3-IS) apresentaram valores de pH (~ 8,5). Entre as formulações contendo 25% e 50% de RB não foram observadas diferenças de pH.

Com relação a CE, houve o aumento até o 45º dia em todas as unidades. Não se observou diferenças significativas entre os tratamentos. A partir dessa etapa, a CE apresentou um declínio ($p > 0.05$) em todos os tratamentos até a última avaliação (75º dia). Este resultado corrobora com o processo final da compostagem, onde há imobilização dos sais minerais e vários outros subprodutos pela biomassa microbiana e/ou formação de complexos organominerais, levando ao decréscimo da quantidade de íons livres observados durante a fase de maturação do processo, indicando a fase final do processo de compostagem. A CE de todos os tratamentos permaneceu na faixa entre 1.3 e 2.6 mS.cm^{-1} , esses valores obtidos estão na faixa adequada (2.0 - 4.0 mS.cm^{-1}) para a produção de condicionador de solos, podendo ser adicionado ao solo para a maioria das espécies vegetais (Cavins et al., 2000), quando considerado somente este parâmetro.

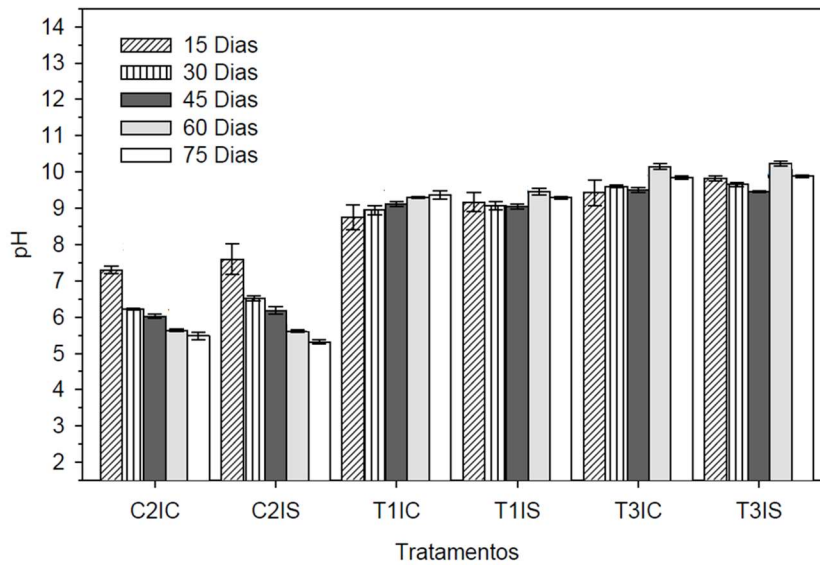


Figura 21: pH das unidades aferido após 15, 30, 45, 60 e 75 dias de execução do protótipo

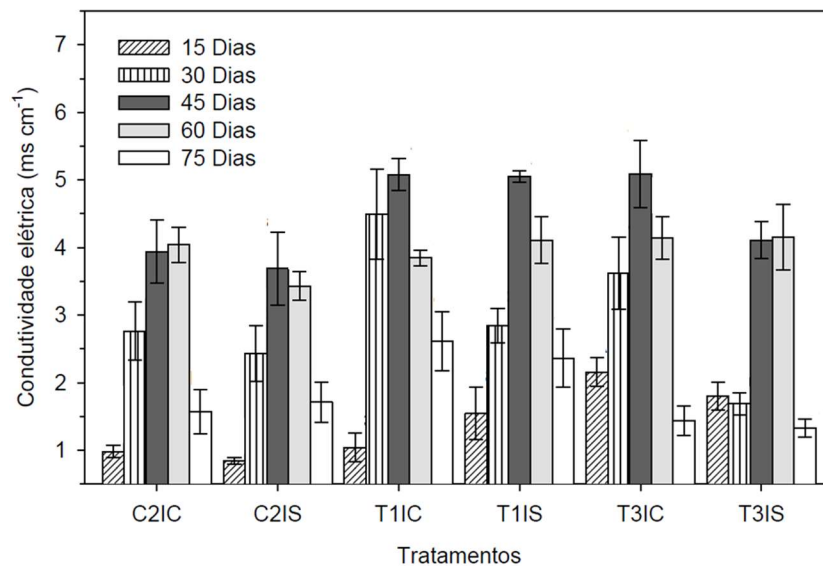


Figura 22: CE das unidades aferida após 15, 30, 45, 60 e 75 dias de execução do protótipo

A título de acompanhamento das transformações físico-químicas dos materiais ao longo do período de compostagem, quatro subamostras por tratamento foram coletadas aos 7 (tempo “zero” – no ato do primeiro revolvimento), 30 e 60 dias de compostagem. São apresentados os resultados obtidos após os períodos de 7 e 30 dias. Como já citado em outras oportunidades, condicionadores de solo destinados à melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo, deverão atender as especificações e garantias mínimas de capacidade de retenção da água (CRA) de 60% e capacidade de troca catiônica (CTC) de 200 mmolc/kg, exigidas pela Instrução Normativa N°35 (04 de Julho de 2006) e determinadas pela metodologia aprovada nas Instruções Normativas N°17 (21 de Maio de 2007). Os parâmetros de qualidade dos condicionadores de solo monitorados após 7 e 30 dias de produção estão apresentados na Figura 23. Observa-se que os parâmetros foram atendidos para os tratamentos com RB, tendo apenas o CTC do tratamento T3-IS na amostra de 30 dias abaixo da referência, no entanto, acredita-se tratar de um erro analítico, uma vez que os em 7 dias está acima da referência e o tratamento semelhante T3-IC (também com 50% de RB) estar acima do valor de referência.

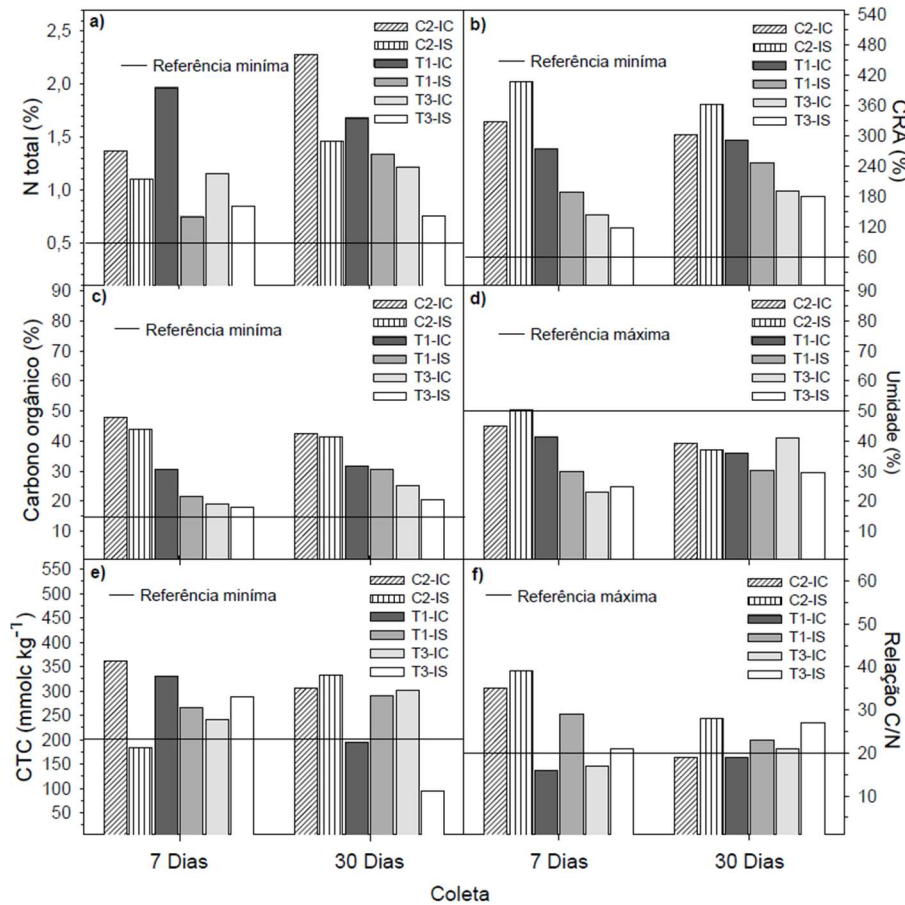


Figura 23: Parâmetros de qualidade do protótipo de condicionador de solos com RB

A Instrução Normativa N° 7, republicada em 02 de maio de 2016, estabelece, em seu Anexo V, os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solos. As concentrações dos elementos potencialmente tóxicos (mg.kg^{-1}) determinadas nos tratamentos do protótipo de condicionador de solos após 30 dias de incubação estão apresentadas na Tabela 7. Pode-se observar que após este período o composto produzido apresenta concentrações de todos esses elementos abaixo do valor de referência. Estes resultados são bom indicativo que o material produzido atende as exigências para aplicações na agricultura. Uma análise definitiva será realizada após os 90 dias de incubação para confirmar estes resultados.

Tabela 7: Concentração dos elementos nos condicionadores de solo após 30 dias de incubação

Variável	IN N°7 2016 ¹ (mg.kg^{-1})	C2-IC	C2-IS	T1-IC	T1-IS	T3-IC	T3-IS
Arsênio	20	<0,3	<0,3	14,4	10,1	<0,3	13,1
Cádmio	3	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
Chumbo	150	<0,38	<0,38	11,8	13,2	18,6	25,6
Níquel	70	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Mercúrio	1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Selênio	80	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cromo*	2	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6

¹MAPA IN n° 7 (Anexo V); *cromo hexavalente (Cr^{6+})

4.2.5 Considerações finais

Foi obtido o produto – condicionadores de solo utilizando o RB e a biomassa de dendê em escala de protótipo com base nos resultados satisfatórios em escala de laboratório. O período de incubação do protótipo foi de 90 dias (finalizado em 13/08/2021), sendo possível apresentar neste relatório os resultados do monitoramento até o 80º dia. Estes resultados, embora parciais confirmam que o condicionador de solos produzidos com até 50% de RB atendem as exigências mínimas de CRA, CTC e umidade estabelecidas pela legislação brasileira, bem como todos os elementos possivelmente tóxicos abaixo dos valores máximos de referência (Instruções normativas nº 7, 25 e 35, MAPA). O desempenho do produto em solo monitorado com cultura de sorgo também demonstrou resultados satisfatórios na aplicação agrônômica do produto.

4.2.6 Referencias

Aceña-heras, S.; Novak, J.; Peñalosa, J.M.; Moreno-Jim, E. Influence of pyrolyzed grape-seeds / sewage sludge blends on the availability of P, Fe, Cu, As and Cd to maize. *Agronomy*, v. 9, n. 406. p. 1–18, 2019.

Benites, V.M.; Bezerra, F.B.; Mouta, R.O.; Assis, I.R.; Santos, R.C.; Conceição, M.; Andrade, A.G. Produção de adubos orgânicos a partir da compostagem dos resíduos da manutenção da área gramada do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, Boletim de pesquisa e desenvolvimento. n. 50. 21p. 2004.

Bertoncini, E.I.E.; Mattiazzo, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 3, p. 737-744, 1999.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, 30 dez. 2009.

Brennan, A.; Jiménez, E.M.; Puschenreiter, M.; Albuquerque, J.A.; Switzer, C. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. *Plant and Soil*, v. 379, n. 1–2, p. 351–360, 2014.

Cáceres, R.; Flotats, X.; Marfà, O. Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies. *Waste Management*, v. 26, p. 1081-1091, 2006.

Cavins, T. J.; Whipker, B. E.; Fonteno, W. c.; Harden, B.; McCall, 1.; Gibson, J. L. Monitoring and managing pH and EC using the pourThru extraction method. Raleigh: Horticulture Information, 2000.

Costa, E.T.S.; Guilherme, L.R.G.; Curi, N.; Oliveira, L.C.A.; Visioli, E.L.; Lopes, G. Subproduto da indústria de alumínio como amenizante de solos contaminados com cádmio e chumbo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 6, p. 2533–2546, 2008.

Element, C.A.S. Method 3051A microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. *Zeitschrift Für Analytische Chemie*, v. 111, p. 362–366, 2007.

Dal Bosco, T. Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos. Blucker Open Access. 1ª edição, 2017, ISBN: 9788580392371, 266p.

Kiehl, E.J. Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto. Piracicaba, E. J. Kiehl, 1998.

Onwosi, C.O.; Igbokwe, V.C.; Odimba, J.N.; Ifeanyichukwu, E.E.; Mary, O.; Nwankwoala, I.N.; Lewis, I.E. Composting technology in waste stabilization: On the methods challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, v.190, p.140-157, 2017.

Polli, V.R.G.; Vendrame, Z.B.; Santos, M.A.S.; Gomes, F.P. Electrochemical Study of the interaction Between humic acids extracted from soil and Pb²⁺ ion in aqueous solution. *ECS Transactions*, v. 43, p-313-317, 2002.

4.3 Propantes

4.3.1 Parceria

Para o projeto “Preparação de Propantes usando Resíduo de Bauxita” foi firmada uma parceria com a empresa alemã Drend Solutions, especializada no desenvolvimento de propantes para a indústria do petróleo e gás a partir de diversos materiais, incluindo resíduos minerais como cinzas volantes (CV) e resíduo de bauxita.

4.3.2 Definição do Conceito e Ensaio Isolados

Conforme apresentado nos relatórios anteriores este projeto iniciou-se com uma Prova de Conceito da utilização do RB como matéria-prima para produzir propantes que atendessem características mínimas conforme especificações internacionais. Os testes de produção de propantes a partir do resíduo de bauxita (RB) e da cinza volante (CV) gerados pela Alunorte foram conduzidos no final de 2019 e os resultados reportados no 1º relatório preliminar. Uma vez que os resultados foram satisfatórios, validou-se o conceito e o projeto seguiu para o estágio de Protótipo.

4.3.3 Protótipo

Neste estágio de testes buscou-se otimizar a produção dos propantes de forma a melhorar o desempenho do produto, caracterizar os produtos química e fisicamente, além de se obter definições de engenharia básica com balanço estimado de massa e energia, e estudo preliminar de impacto ambiental do processo produtivo deste material.

Em relatórios anteriores foram apresentados os resultados das caracterizações químicas e físicas do produto otimizado, estudos de custos e de emissão de CO₂ relacionados ao processo de produção dos propantes a partir do RB e CV da Alunorte, o desenvolvimento da engenharia preliminar e os balanços de massa e energia. O sucesso de todas estas atividades resultou na aceitação do produto em escala de Protótipo como finalizado (Figura 24).



Figura 24: Propante cerâmico produzido em escala de protótipo com resíduo de bauxita

4.4 Pisos intertravados

4.4.1 Parceria

Uma parceria foi estabelecida com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) no final de 2019, com objetivo de definir uma formulação de alta qualidade para pisos intertravados a serem produzidos e submetidos a testes de resistência às intempéries e durabilidade. A parceria expandiu-se para uma empresa especializada na formulação de concretos, a Polimix, unidades de São Paulo e Barcarena e uma empresa de engenharia, contratada para produção e instalação dos pisos, a Marks Engenharia, de Belém.

4.4.2 Definição do Conceito

Conforme detalhado no 3º relatório parcial a etapa de definição do conceito foi desenvolvida na central da Polimix em Santana de Parnaíba-SP e consistiu na preparação de amostras dos pisos intertravados nas

formulações de referência (apenas concreto) e com incorporações do resíduo de bauxita substituindo parcialmente a areia.

Nesse sentido, buscou-se desenvolver formulações de concreto contendo resíduo de bauxita que atendessem características de alto desempenho mecânico ($F_{ck} = 50$ MPa), considerando as matérias-primas da região de Barcarena e incorporação do resíduo da ordem de 3% da composição total.

Conforme demonstrando nos resultados já apresentados (3º relatório parcial), as formulações atenderam as especificações de projeto conforme ensaios normatizados (ABNT NBR 5739:2018), alcançando resistência de ~63 MPa aos 28 dias. Tendo em vista os bons resultados alcançados, apresentou-se um plano detalhado para produção, instalação e monitoramento de uma área de testes de campo com pavimentação de 278 m² numa área teste dentro do platô do depósito de resíduos sólidos (DRS) da Alunorte.

4.4.3 Ensaios isolados

Dado a natureza específica do projeto, entendeu-se que esta etapa da pesquisa poderia ser suprimida, já adiantando-se para a etapa de *Protótipo*, na qual seriam produzidos pisos com as características definidas pelo Conceito.

4.4.4 Protótipo

Com o objetivo de se testar o conceito de produção de peças de concreto contendo resíduo de bauxita em escala de protótipo, foram produzidas aproximadamente 2.000 peças de pisos intertravados de cada uma das formulações: Traço 1 (REF, referência), Traço 2 (RB/A, resíduo substituindo 10% da areia) e Traço 3 (RB/CP, resíduo substituindo 15% do cimento Portland).

Detalhes dos insumos utilizados na fabricação, bem como do processo produtivo e instalação das peças na área teste foram apresentados no 3º relatório parcial.

No 4º relatório parcial relatório foram apresentados resultados referentes à avaliação do processo produtivo e dos ensaios mecânicos após 100 dias de exposição das peças, os quais não mostraram evidências de alterações significativas, quando comparados com os parâmetros iniciais do protótipo, exceto por uma pequena diferença da resistência à abrasão do Traço 3 (RB/CP). Conforme definições da NBR ABNT 9781:2013 observou-se que os pisos contendo RB tanto em substituição da areia quanto do cimento, atenderam as especificações de resistência à compressão para peças de concreto para pavimentação da classe 50 MPa (tráfego de veículos especiais), bem como estavam em conformidade com as especificações de abrasão para tráfego de pedestre, veículos leves e veículos comerciais de linha (desgaste $\leq 20,0$ mm) e de absorção de água (média $\leq 6\%$ e nenhum valor individual $> 7\%$).

São apresentados neste relatório os resultados dos ensaios normatizados NBR ABNT 9.781:2013, NBR 10.005 e 10.006 realizados em laboratório especializado da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e análises química e mineralógica realizados na USP, das peças de cada formulação monitoradas até 200 dias de exposição (correspondendo à aproximadamente 360 dias de fabricação).

4.4.4.1 Monitoramento após 200 dias

Foram realizadas até o momento três coletas de amostras, a primeira em 01/10/2020, a segunda em 20/01/2021 e a terceira em 10/06/2021 correspondendo a exposições de aproximadamente 100, 200 e 365 dias, respectivamente. Na primeira foram coletadas 12 peças, e nas últimas duas coletas elevou-se o número de peças para 15 a fim de melhorar a representatividade da amostragem. Todas as peças foram selecionadas por sorteio de modo a evitar qualquer enviesamento dos resultados. As peças retiradas foram substituídas por outras de estoque de mesma formulação, as quais foram mantidas ao abrigo das intempéries. Em cada amostragem realizada, foram coletadas deste estoque iguais quantidades de peças para servirem como controle (zero exposição). As peças da terceira amostragem ainda estão sendo analisadas, sendo apresentado neste relatório apenas os resultados da primeira e segunda coleta.

A Figura 25 ilustra as principais etapas da coleta. A Figura 26 mostra as posições das peças retiradas e a Tabela 8 as características de cada amostragem. Todas as amostras foram encaminhadas aos laboratórios da ABCP e USP em São Paulo/SP, onde foram realizados os ensaios detalhados a seguir.



(a)

(b)

(c)

Figura 25: Coleta dos pisos, retirada (a), reposição (b) e acondicionamento para envio (c)

Tabela 8: Amostras dos pisos intertravados analisadas até o momento

Coleta	Data coleta	Idade (dias)	Exposição (dias)	Formulação	Número de peças
1	01/10/2020	260	0	T1 (REF)	12
				T2 (RB/A)	12
				T3 (RB/CP)	12
		260	100	T1 (REF)	12
				T2 (RB/A)	12
				T3 (RB/CP)	12
2	20/01/2021	360	0	T1 (REF)	15
				T2 (RB/A)	15
				T3 (RB/CP)	15
		360	200	T1 (REF)	15
				T2 (RB/A)	15
				T3 (RB/CP)	15

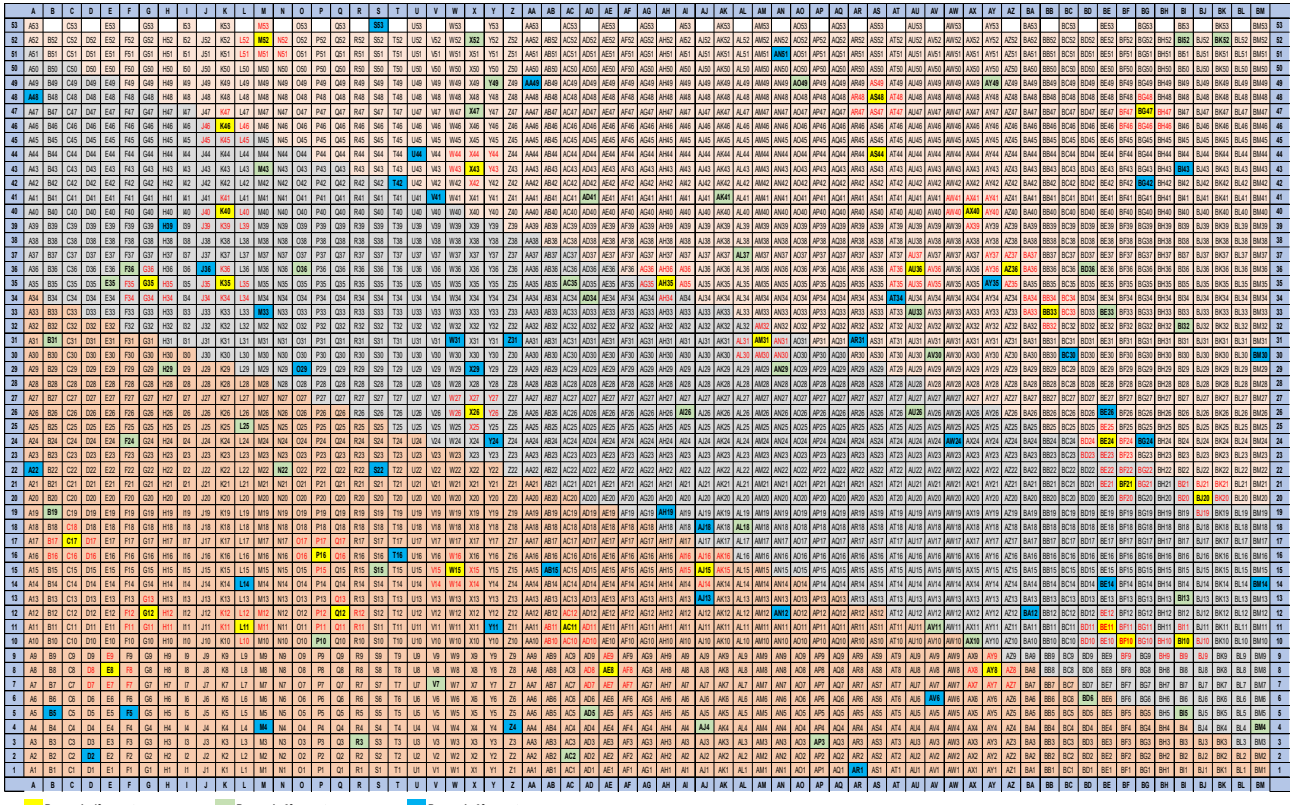


Figura 26: Mapa das peças de piso intertravado retiradas do protótipo em cada amostragem

4.4.4.2 Descrição dos ensaios realizados

Para avaliação dimensional as peças hexagonais foram medidas com paquímetro de resolução 0,1 mm e comparadas com as tolerâncias do piso tipo III, definidas na norma ABNT NBR 9.781, conforme Figura 27.

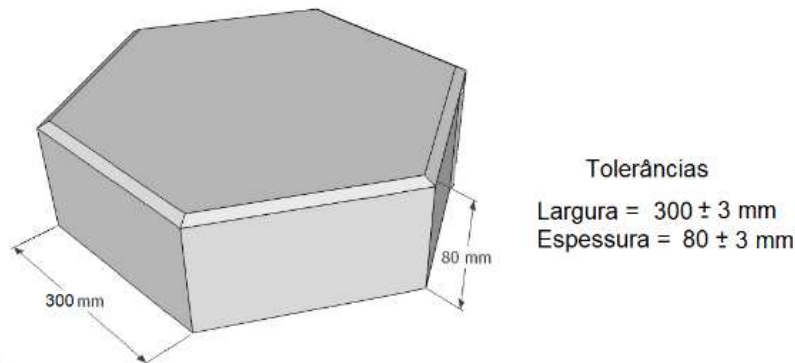


Figura 27: Dimensões dos pisos intertravados conforme NBR 9.781

A avaliação da resistência à compressão foi realizada de acordo com a NBR 9.781. Os corpos de prova foram cortados ao meio com serra de disco diamantado e as superfícies superior e inferior foram planificadas por meio de retífica mecânica (Figura 28a). Antes do ensaio, os corpos de prova foram saturados em água por pelo menos 24 horas. Foram então posicionados sobre uma placa auxiliar de aço de 85 mm de diâmetro e uma segunda placa de mesmas dimensões comprimiu o corpo de prova a uma velocidade de carregamento de cerca de 550 kPa/s (Figura 28b). O ensaio foi conduzido até a ruptura da peça, registrando-se a carga de ruptura (Figura 28c).

A resistência à compressão é calculada pela razão entre a carga de ruptura e a área da placa auxiliar de ensaio. Como a espessura das peças era de 80 mm não há necessidade de corrigir o valor obtido (fator $p=1,00$). Para cada lote foram avaliados seis corpos de prova na coleta 1 e 8 corpos de prova na coleta 2, sendo que o mínimo exigido pela NBR 9.781 é de seis peças.



Figura 28: Ensaio de resistência a compressão dos pisos intertravados

No ensaio de abrasão avalia-se a resistência que o corpo de prova oferece ao desgaste quando submetido a uma solicitação abrasiva. O ensaio é realizado conforme a NBR 9.781 e é ilustrado nas Figura 29 e Figura 30. Os corpos de prova são cortados na forma de paralelepípedo, sem afetar a superfície superior da peça, a qual é coberta com uma fina camada de tinta para facilitar a identificação da área desgastada após a abrasão (Figura 30a). O corpo de prova é então instalado em um dispositivo que mantém a superfície em contato contínuo com um cilindro metálico (Figura 30b), sob pressão constante por meio de um sistema de contrapeso.

O cilindro é posto à girar em velocidade constante enquanto um fluxo contínuo de material abrasivo (composto de óxido de alumínio fundido branco, grana F80) é direcionado à interface de contato entre o corpo de prova e o cilindro de aço. (Figura 30c). A abrasão é mantida por 75 revoluções do cilindro, após o que é medida a largura do sulco de abrasão (Figura 30d). São ensaiados 3 corpos de prova por lote.

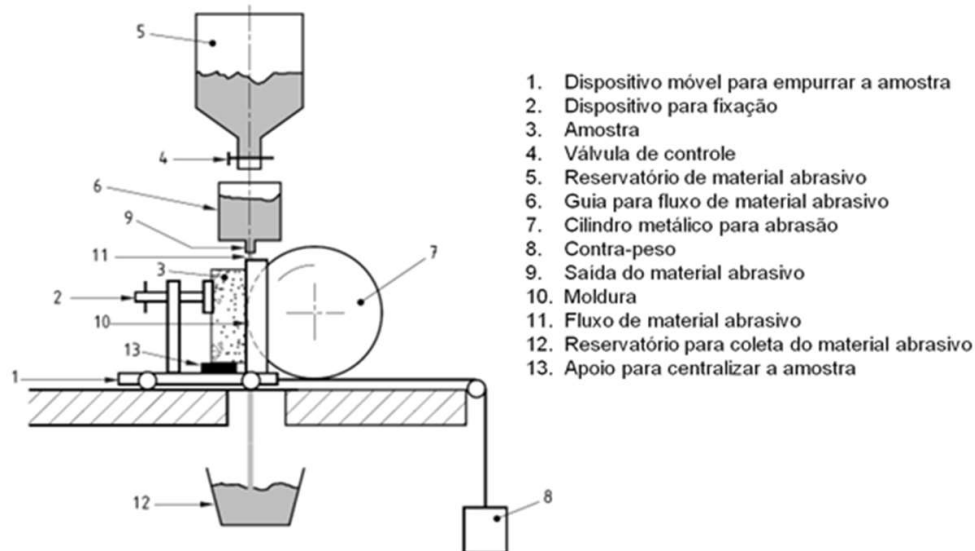


Figura 29: Diagrama do equipamento para ensaio de abrasão dos pisos intertravados

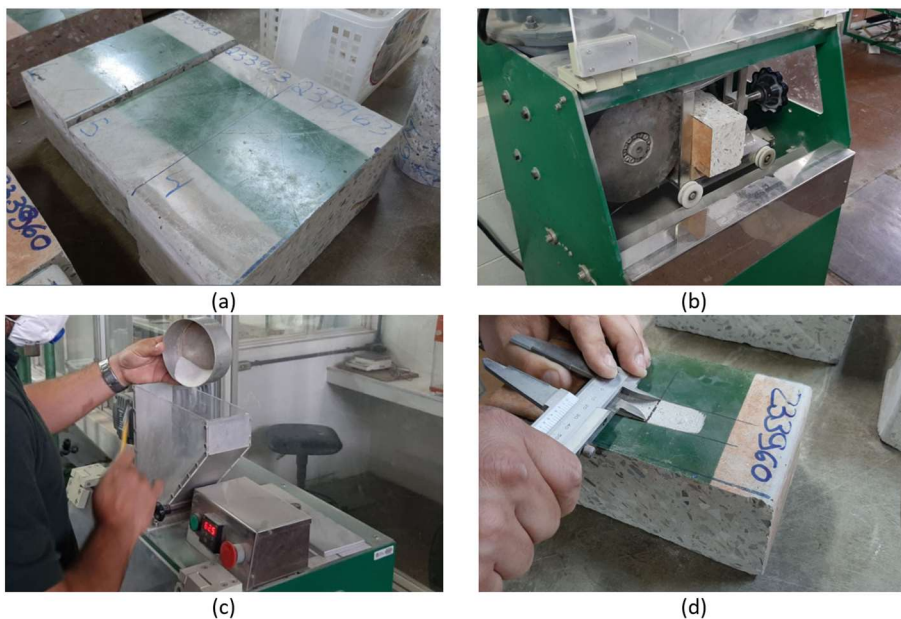


Figura 30: Etapas do ensaio de abrasão dos pisos intertravados

O ensaio de absorção de água avalia o volume de vazios permeável à água (porosidade aberta) das peças e foi conduzido de acordo com a NBR 9.781. Os corpos de prova recebidos foram limpos com pincel para retirada de partes soltas e submersos por 24 horas em água. O excesso de água é então retirado com pano úmido, até a superfície aparentar-se seca, medindo-se a massa nesta condição, que é denominada superfície saturada 'seca' (SSS). Depois a submersão é repetida por 2 horas adicionais, medindo-se novamente a SSS. O processo é repetido até que a diferença entre determinações sucessivas da SSS seja menor que 0,5%. A seguir o corpo de prova é seco em estufa a 110 °C por 24 horas, determinando-se a massa seca. Seca-se por mais 2 horas, realizando-se uma nova medida de massa seca. Este processo é repetido até que a

diferença entre determinações sucessivas de massa seca seja menor que 0,5%. A absorção de água é então calculada pela diferença entre a SSS e a massa seca e expressa em % em relação à massa seca. São avaliados três corpos de prova para cada lote.

Ensaio de lixiviação e solubilização, conforme normas NBR 10.005 e 10.006 também foram conduzidos no laboratório da ABCP. Nestes ensaios submete-se amostras do pisos, apenas britadas (primeiro caso) e britadas e moídas (segundo caso) à extração com água, seguida de análise química a fim de avaliar se eventuais resíduos gerados no final da vida útil dos pavimentos podem apresentar riscos ao meio ambiente. Conforme os resultados destas análises os eventuais resíduos de demolição dos pavimentos podem ser classificados, quanto à lixiviação, como perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II), e neste último caso, quanto à solubilização, como não inertes (Classe II-A) ou inertes (Classe II-B). Conforme esta caracterização, determina-se pela NBR 10.004 o tipo de aterro no qual estes resíduos de fim de ciclo devem ser depositados.

Uma avaliação química e mineralógica das amostras foi conduzida utilizando fluorescência de raios-X (FRX) e difratometria de raios-X (DRX), respectivamente. Ambas as análises foram realizadas no laboratório da USP e conduzidas a partir do material britado e moído, classificado em peneira (-75 µm), homogeneizado e quarteado até obtenção das alíquotas. A análise de FRX foi realizada por pastilha fundida utilizando 1 g de amostra para 6,75 g de fundente, seguindo as diretrizes da norma ISO/FDIS 29581-2:2009 (E) "Cement – Test Methods – Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence", calibrado com o padrão CIM-1 (Cimentos). A perda ao fogo, utilizada para normalizar os resultados da análise, foi determinada por aquecimento à 1.020 °C por 2 horas.

4.4.4.3 Resultados

Os resultados de análise dimensional são mostradas na Tabela 9. Observa-se largura média de 297 mm, variando entre 296 e 299 mm, sempre inferior ao valor nominal de 300 mm e com muito pouca dispersão dentro de um mesmo lote (máx ± 1 mm). A consistência dos valores de largura evidenciam o acerto do processo de conformação em formas de plástico, que proporcionou uniformidade das dimensões laterais, muito relevante para o ajuste uniforme das juntas durante a instalação dos pisos intertravados.

Observa-se altura média de 82 mm, ligeiramente maior que o valor nominal (80 mm), também com muito pouca dispersão dentro de um mesmo lote (máx ±1 mm), exceto para os casos marcados com asterisco na tabela. Estes desvios foram pontuais e são provenientes do preenchimento das formas, onde o pedreiro não preencheu completamente.

Todos os resultados de análise dimensional das peças de piso intertravado, expostas às intempéries por até 200 dias mostraram-se em conformidade com as tolerâncias do piso tipo III, definidas na norma NBR 9.781. Portanto, até este momento, a análise dimensional não evidenciou deficiências dos pisos intertravados à base de RB, que pudessem prejudicar assentamento, desempenho estrutural ou estética de pavimentos.

Tabela 9: Análise dimensional dos pisos intertravados

Coleta	Idade (dias)	Exposição (dias)	Formulação	Largura (mm)		Altura (mm)	
				(Tolerância NBR 9781 = 300 ± 3)	(Tolerância NBR 9781 = 80 ± 3)		
				média	Desvio máx. da média	média	Desvio máx. da média
1	260	0	T1 (REF)	296	1	84	1
1	260	0	T2 (RB/A)	296	1	83	1
1	260	0	T3 (RB/CP)	296	1	82	1
1	260	100	T1 (REF)	297	1	84	1
1	260	100	T2 (RB/A)	297	1	81	1
1	260	100	T3 (RB/CP)	297	1	81	1
2	360	0	T1 (REF)	298	1	82	1
2	360	0	T2 (RB/A)	299	1	81	4*
2	360	0	T3 (RB/CP)	298	1	82	5*
2	360	200	T1 (REF)	299	1	82	1
2	360	200	T2 (RB/A)	298	1	81	1
2	360	200	T3 (RB/CP)	298	1	82	1

A Tabela 10 mostra os resultados experimentais de resistência à compressão e seus respectivos valores característicos, calculados pela Equação 2, que considera uma distribuição estatística do tipo *t-student*.

$$f_{pk} = f_p - t \cdot s \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

t corresponde ao coeficiente de *student*, estipulado de acordo com o tamanho da amostra (para ensaio de seis peças do piso o valor é de 0,920, enquanto para oito peças o valor é 0,896);

f_p é a média aritmética da resistência à compressão;

s é o desvio padrão observado para a resistência à compressão;

f_{pk} é o valor característico da resistência à compressão, corrigido pela distribuição *t-student*.

Todos os lotes apresentaram resistência característica superior a 50 MPa. De acordo com a NBR 9.781, resistência característica acima de 50 MPa é adequada ao tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão.

Tabela 10: Resistência à compressão dos pisos intertravados submetidos às intempéries

Coleta	Idade (dias)	Exposição (dias)	Formulação	Resistência à compressão (MPa)		
				Média (f _p)	desvio padrão (s)	valor característico (f _{pk})
1	260	0	T1 (REF)	57,4	4,1	53,7
1	260	0	T2 (RB/A)	57,0	6,8	50,8
1	260	0	T3 (RB/CP)	66,5	3,8	62,9
1	260	100	T1 (REF)	60,3	6,8	54,1
1	260	100	T2 (RB/A)	59,4	3,7	56,0
1	260	100	T3 (RB/CP)	61,9	5,6	56,8
2	360	0	T1 (REF)	61,0	3,0	58,3
2	360	0	T2 (RB/A)	61,8	5,3	57,1
2	360	0	T3 (RB/CP)	70,0	4,2	66,2
2	360	200	T1 (REF)	63,6	2,4	61,4
2	360	200	T2 (RB/A)	59,5	4,1	55,8
2	360	200	T3 (RB/CP)	62,4	2,9	59,8

A comparação da resistência à compressão das formulações pode ser melhor observada na Figura 31. A formulação T2, com RB substituindo parte da areia, apresentou resistências à compressão equivalentes às da referência T1, que não contém o resíduo. Portanto a introdução do RB não teve impacto negativo neste caso.

A formulação T3, com RB substituindo parte do cimento, requereu ligeira redução no consumo de água para compensar a redução de ligantes e mostrou aumento de cerca de 9 MPa da resistência para as peças não expostas. Como esta diferença é significativa ao nível de confiança de 95%, conclui-se que há potencial para melhorar a resistência a compressão com ajustes da composição desta formulação e que a respectivas quedas para tempo de exposição de 100 e 200 dias provavelmente são decorrentes de variações de produção não da exposição.

Comparando apenas os lotes de cada formulação, com exposição 0, nota-se também que a presença do RB não prejudicou a evolução de resistência com o tempo de envelhecimento.

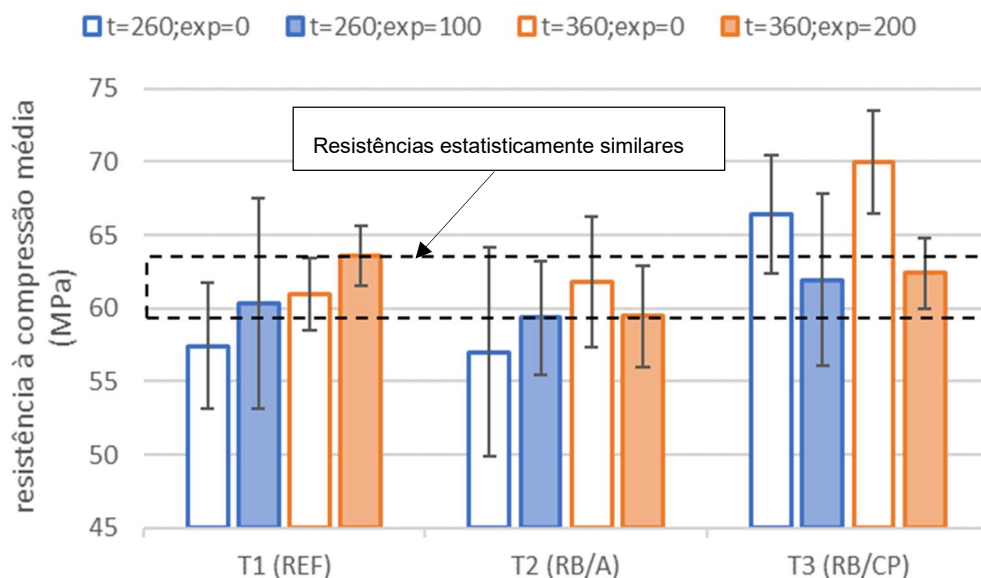


Figura 31: Resistência à compressão dos concretos (0, 100 e 200 dias de exposição)

Os resultados de desgaste por abrasão são apresentados na Tabela 11 e na Figura 32. Observa-se boa consistência da resistência à abrasão com desvios padrões superiores a 0,6 mm apenas para uma das amostras (T2 – 100 dias) e valores individuais entre 20,0 e 22,8 mm, o que segundo a NBR 9.781, enquadra todas as formulações na mesma classe de pisos para tráfego leve, com aplicação, por exemplo, em calçadas, praças, estacionamento de veículos leves e vias urbanas secundárias.

Não observou-se alterações significativas da abrasão em função da formulação, idade ou tempo de exposição.

Para adequação à classe de tráfego pesado, que se refere a veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, o desgaste por abrasão deve ser de no máximo 20 mm, o que requereria alterações na formulação e/ou na tecnologia de fabricação, tais como:

- redução no volume de pasta;
- substituição dos agregados por outros de maior resistência à abrasão;
- mudança no processo de produção.

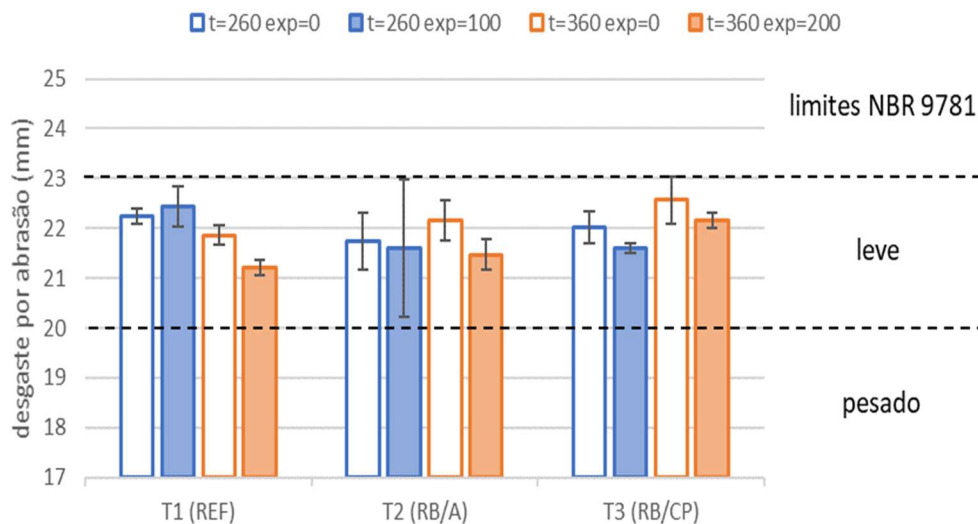
O processo atual emprega concretos de alta fluidez e fôrmas plásticas na face que fica exposta, o que forma uma camada sem presença de agregados maiores. Isto pode reduzir a resistência à abrasão nesta primeira camada da peça. Produção em fôrmas com vibração mecânica ou por vibro-prensagem são alternativas a serem consideradas.

Mudanças no processo produtivo podem também possibilitar redução do volume de pasta e da sua porosidade, caso viabilize-se menor trabalhabilidade dos concretos, com menor consumo de água e maior resistência.

A princípio as formulações T2 e T3 até poderiam ser utilizadas nas aplicações para tráfego pesado, uma vez que a resistência à compressão mostrou-se apropriada. Adicionalmente, destaca-se que a NBR 9.781 estabelece a resistência à abrasão como um ensaio facultativo. Não obstante, recomenda-se que esta propriedade não seja negligenciada, para que se possa garantir um desempenho satisfatório ao longo da vida útil do pavimento. Além disso, um desgaste prematuro resultaria na avaliação estética negativa por parte dos usuários, com impacto na aceitação do produto.

Tabela 11: Abrasão dos pisos intertravados

Coleta	Idade (dias)	Exposição (dias)	Concreto	Desgaste por abrasão (mm)				
				CP1	CP2	CP3	média	Desv. Pad.
1	260	0	T1 (REF)	22,1	22,4	22,2	22,2	0,2
1	260	0	T2 (RB/A)	21,1	21,9	22,2	21,7	0,6
1	260	0	T3 (RB/CP)	22,4	21,8	21,9	22,0	0,3
1	260	100	T1 (REF)	22,8	22,5	22,0	22,4	0,4
1	260	100	T2 (RB/A)	22,4	20,0	22,4	21,6	1,4
1	260	100	T3 (RB/CP)	21,7	21,5	21,6	21,6	0,1
2	360	0	T1 (REF)	22,1	21,2	22,3	21,9	0,6
2	360	0	T2 (RB/A)	22,3	22,0	22,2	22,2	0,2
2	360	0	T3 (RB/CP)	22,3	22,8	22,6	22,6	0,3
2	360	200	T1 (REF)	21,0	21,4	21,2	21,2	0,2
2	360	200	T2 (RB/A)	21,1	21,9	21,4	21,5	0,4
2	360	200	T3 (RB/CP)	22,0	22,7	21,8	22,2	0,5


Figura 32: Comparação da abrasão dos pisos intertravados com especificações da NBR 9.781

Os resultados de absorção de água são apresentados na Tabela 12 e na Figura 33. Todos os lotes atendem aos limites especificados pela NBR 9.781, tanto para corpos de prova individuais ($\leq 7\%$) como para o valor médio do lote ($\leq 6\%$). A variabilidade dentro de um lote pode ser considerada pequena.

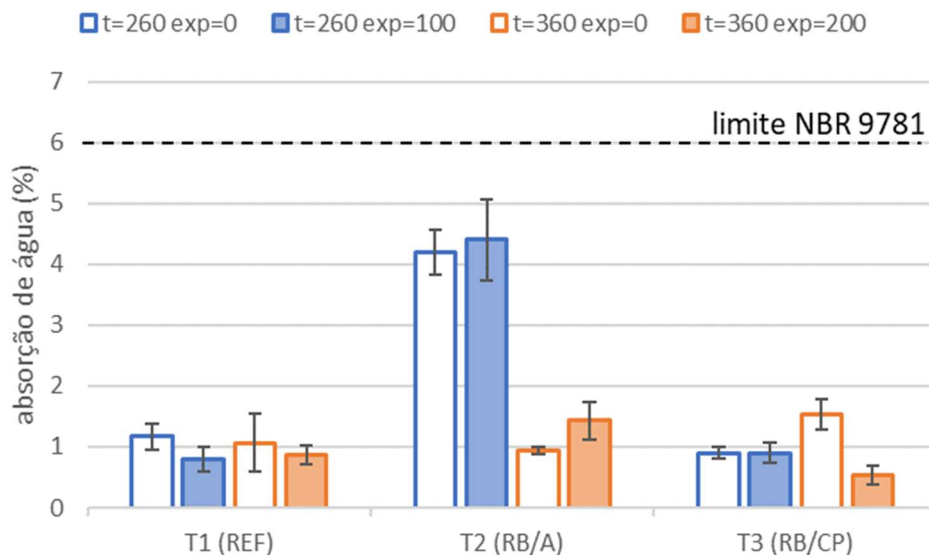
Com a mesma proporção água/cimento e o mesmo volume de pasta em relação à formulação de referência (T1), a formulação T3 apresentou praticamente a mesma absorção de água independentemente dos tempos de envelhecimento ou de exposição às intempéries.

A formulação T2, com o RB substituindo a areia, apresentou aumento do volume de pasta, o que poderia, a princípio, explicar um aumento de absorção de água. No entanto, foram observados valores elevados de absorção de água para esta formulação apenas após 260 dias, tanto para as amostras de pisos expostas como para as não expostas, o que não se confirmou após 360 dias de exposição. Adicionalmente, a discrepância da absorção de água das amostras de T2 com e sem exposição não parece coerente com os resultados das resistências à compressão e à abrasão desta mesma formulação nestas mesmas condições que não diferiram significativamente das demais, como mostrado nas sessões anteriores.

Ressalvadas as considerações acima referentes à formulação T2 aos 200 dias, pode-se afirmar que não foram observadas mudanças relevantes da absorção de água, nem pela introdução do RB, nem por envelhecimento ou exposição às intempéries. Considerando que a absorção de água se relaciona com o sistema de poros abertos em concretos, pode-se dizer que os pisos intertravados do protótipo são de baixa permeabilidade e que a introdução do RB não altera esta propriedade.

Tabela 12: Absorção de água dos pisos intertravados

Coleta	Idade (dias)	Exposição (dias)	Formulação	Absorção de água (%)				Desv. Pad.
				CP1	CP2	CP3	média	
1	260	0	T1 (REF)	1,0	1,1	1,4	1,2	0,2
1	260	0	T2 (RB/A)	3,9	4,1	4,6	4,2	0,4
1	260	0	T3 (RB/CP)	0,8	0,9	1,0	0,9	0,1
1	260	100	T1 (REF)	1,0	0,6	0,8	0,8	0,2
1	260	100	T2 (RB/A)	3,8	4,3	5,1	4,4	0,7
1	260	100	T3 (RB/CP)	1,0	0,7	1,0	0,9	0,2
2	360	0	T1 (REF)	1,6	0,9	0,7	1,1	0,5
2	360	0	T2 (RB/A)	0,9	1,0	0,9	0,9	0,1
2	360	0	T3 (RB/CP)	1,8	1,3	1,5	1,5	0,3
2	360	200	T1 (REF)	1,0	0,9	0,7	0,9	0,2
2	360	200	T2 (RB/A)	1,7	1,1	1,5	1,4	0,3
2	360	200	T3 (RB/CP)	0,5	0,7	0,4	0,5	0,2


Figura 33: Absorção de água dos pisos intertravados

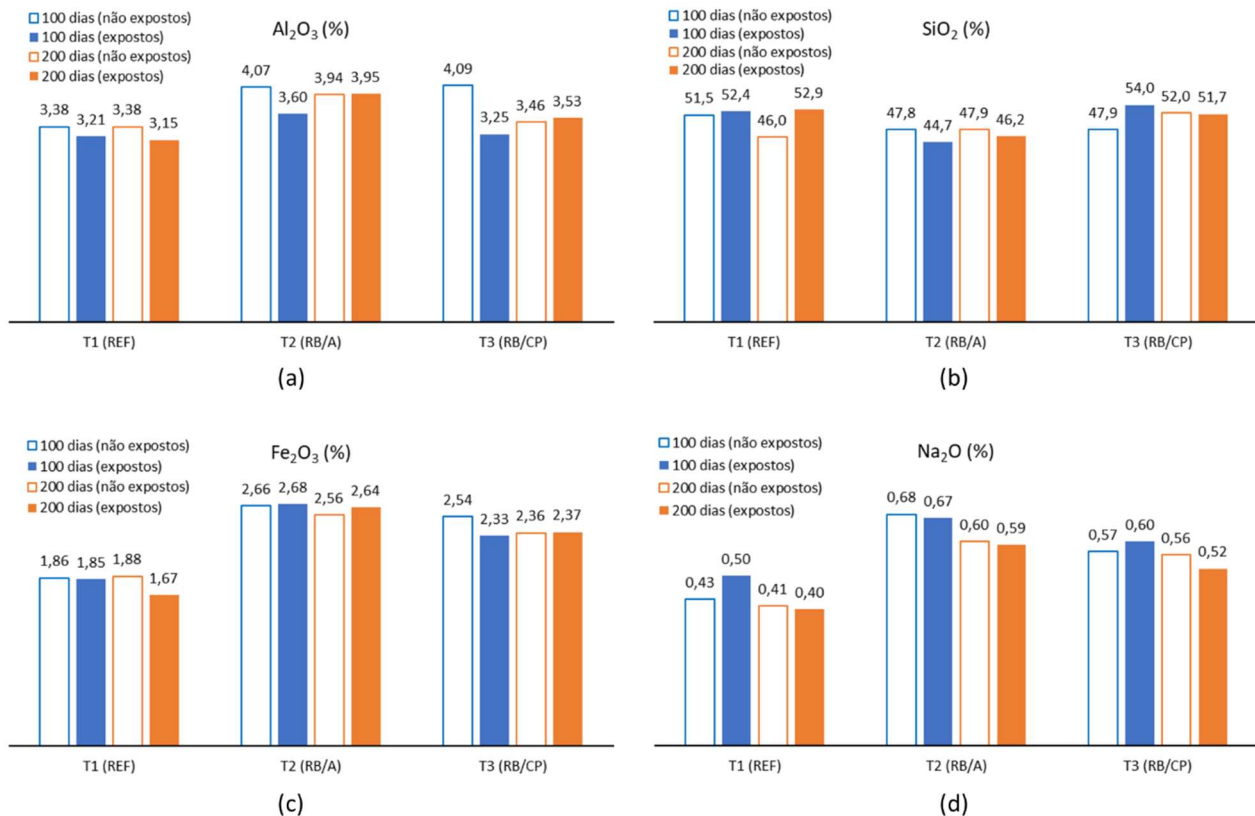
Análise química por fluorescência de raios-X das peças com e sem exposição às intempéries é mostrada na Tabela 13 e foi realizada para avaliar se estes processos podem alterar a composição química dos pisos.

A introdução do RB nas formulações T2 e T3 resultou em maiores teores de alumínio, ferro e sódio com relação à formulação de referência T1, como era de se esperar dadas as presenças destes elementos no RB. Entretanto não se observou variações significativas destes elementos entre os pisos expostos e envelhecidos, como mostra a Figura 34.

Conforme laudo do laboratório responsável pela execução dos ensaios, cada espécie química apresenta distinta dispersão dos resultados de medição, o chamado erro analítico relativo (porcentagem de variação em relação ao valor médio) que é determinado com base em repetição de medidas com padrões de referência. No caso das formulações de pisos intertravados estes erros são os seguintes: $Al_2O_3 = 3\%$; $Fe_2O_3 = 2,6\%$; $Na_2O = 5,4\%$. A estes desvios deve-se acrescentar ainda aqueles advindos da amostragem, por conta da heterogeneidade natural do concreto, além das variações entre os diferentes lotes de produção, tais como maior ou menor quantidade de argamassa em cada peça. Considerando todos estes desvios pode-se concluir que as variações mostradas na Figura 34 não se mostraram claramente significativas para os fatores experimentados (tempo de exposição e tempo de envelhecimento).

Tabela 13: FRX dos pisos intertravados expostos ou protegidos das intempéries

Coleta	Exposição (dias)	Concreto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PF
1	0	T1 (REF)	51,5	3,38	1,86	23,5	2,04	0,98	0,43	0,59	0,32	15,9
1	0	T2 (RB/A)	47,8	4,07	2,66	24	1,93	1,11	0,68	0,6	0,39	17
1	0	T3 (RB/CP)	47,9	4,09	2,54	25,6	1,79	0,91	0,57	0,6	0,39	15
1	100	T1 (REF)	52,4	3,21	1,85	22,5	1,7	1,05	0,5	0,52	0,41	15,2
1	100	T2 (RB/A)	44,7	3,6	2,68	25,6	1,75	1,07	0,67	0,54	0,37	18,2
1	100	T3 (RB/CP)	54	3,25	2,33	21,2	1,7	0,95	0,6	0,45	0,41	15,2
2	0	T1 (REF)	46	3,38	1,88	26,4	2,12	0,81	0,41	0,55	0,37	18
2	0	T2 (RB/A)	47,9	3,94	2,56	24,6	2,07	0,85	0,6	0,54	0,39	16,4
2	0	T3 (RB/CP)	52	3,46	2,36	22,9	1,84	0,87	0,56	0,46	0,42	15,2
2	200	T1 (REF)	52,9	3,15	1,67	23	1,92	0,9	0,4	0,49	0,33	15,5
2	200	T2 (RB/A)	46,2	3,95	2,64	25,2	1,92	0,89	0,59	0,56	0,37	17,6
2	200	T3 (RB/CP)	51,7	3,53	2,37	22,2	1,68	0,81	0,52	0,51	0,48	15,2


Figura 34: FRX dos pisos intertravados expostos e não expostos as intempéries

A composição mineralógica dos pisos após 100 dias de exposição ou envelhecimento é apresentada na Tabela 14 e foi realizada para verificar se estes processo acarretam alterações de fases nos pisos intertravados.

As principais fases hidratadas do cimento (portlandita e etringita) foram detectadas, assim como quartzo, possivelmente remanescente da areia, dolomita e calcita, proveniente da carbonatação e adição no cimento Portland, albita e muscovita.

Não se observou fases mineralógicas diferentes nos concretos com RB, tampouco alterações decorrentes da exposição às intempéries ou do envelhecimento sem exposição.

Tabela 14: DRX dos pisos intertravados após 100 dias de exposição

Coleta	Exposição (dias)	Concreto	Quartzo	Calcita	Portlandita	Etringita	Albita	Muscovita	Dolomita	Caulinita	Browmlerita	Gipsita	Microclínico	Amorfo
1	0	T1 (REF)	x	x	x	x	x	x	x	x				x
1	0	T2 (RB/A)	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x
1	0	T3 (RB/CP)	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x
1	100	T1 (REF)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
1	100	T2 (RB/A)	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
1	100	T3 (RB/CP)	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x

O ensaio de lixiviação é utilizado para classificar resíduos quanto à periculosidade, classificando-o em perigoso ou não-perigoso, de acordo com a NBR 10.004. A diferença em relação a concretos comuns, no caso em estudo, é a presença de RB na composição. Tendo o RB apresentando característica não-perigosa, a composição com concreto não deve apresentar maiores problemas.

É importante ressaltar que o objetivo da NBR 10.004 é classificar resíduos sólidos, isto é, materiais resultantes ao final de um processo de produção ou uso anterior e que, por não ter destinação útil, é encaminhado a depósitos finais (aterros). De acordo com a periculosidade, diferentes níveis de cuidado precisam ser adotados nesta disposição final. No caso de concreto, esta situação ocorrerá, portanto, ao final da vida útil do piso em questão, quando então será demolido, possivelmente britado, e então depositado em algum aterro. Nesta condição final, cominuída em partes pequenas, se a deposição for inadequada, fica exposto à lixiviação de seus componentes, podendo oferecer risco à saúde pública e ao meio ambiente, caso estes componentes sejam perigosos.

Com base nos ensaios estabelecidos pela NBR 10.005 (lixiviação), se observou que a concentração de todos os nove elementos químicos avaliados ficaram abaixo do limite de detecção ou apresentam-se abaixo dos limites máximos aceitáveis da NBR 10.004. Adicionalmente, não se observou diferenças entre as formulações com e sem RB. Portanto, o material resultante da demolição de pisos intertravados contendo RB seriam enquadrados na categoria de resíduos não perigosos, Classe II.

Uma vez caracterizado como não-perigoso (Classe II), a NBR 10.004 refina a classificação do resíduo em não inerte (Classe II-A) ou inerte (Classe II-B), conforme os resultados do ensaio de solubilização (NBR 10.006). Os resultados mostraram que os concretos T1 (RB/A) e T2 (RB/CP), bem como o próprio concreto de referência (T1/REF sem adição de RB) geram resíduos de demolição que podem ser classificados como não perigosos e não inertes: Classe II-A. Do ponto de vista tecnológico, a incorporação do RB nos concretos para produção dos pisos intertravados não acarretou em nenhuma mudança de desempenho mecânico e de aspecto químico. Nota-se que vários autores reportaram que resíduos convencionais de demolição da construção civil (RCC) em diversas localidades brasileiras também apresentam esta classificação (Silva & Arnosti Jr., 2005, de Vitória/ES; Ramos, 2007, em Piracicaba; Lima & Cabral, 2013, em Fortaleza; e Córdoba & Schalch, 2015, em São Carlos, SP).

Assim, conclui-se que, com relação à destinação final, as formulações analisadas neste trabalho não demandariam cuidados diferentes dos já dispensados atualmente. Adicionalmente, conclui-se que estes resultados não refletem uma possível lixiviação de espécies químicas no contexto real de aplicação desses pisos, sendo necessária uma forma investigação de lixiviação *in loco*, ou em ambiente controlado simulando a precipitação com as peças integras.

4.4.4.4 Avaliação de ecoeficiência pelas emissões de CO₂

Realizou-se uma avaliação preliminar de ecoeficiência das formulações deste estudo com base no seu impacto ambiental, com foco nas emissões de CO₂ oriundas de sua produção. Esta análise é descrita como segue.

Primeiro identificou-se as formulações e as respectivas resistências média à compressão aos 28 dias (Tabela 15). O cimento utilizado foi do tipo CII-F 40, produzido pela Votorantim Cimentos de Primavera/PA, a uma distância de 268 km da empresa Polimix, responsável pela preparação dos concretos. Na Tabela 16 apresenta-se a composição do cimento utilizado, conforme informações da Polimix.

Tabela 15: Resistências médias à compressão (MPa) dos pisos intertravados

Matéria prima	Marca	Traço 1 (REF)	Traço 2 (RB/A)	Traço 3 (RB/CP)
Cimento CII-F 40	Votorantin	435	435	405
Sílica ativa	Tecnosil	30	30	28
Areia	Transmacedo	725	668	725
Brita	Transbrita	975	975	975
Resíduo de bauxita	Alunorte	-	65	60
Maximent PXT76	Matchem	3,53	3,53	3,53
Maxifluid 1120	Matchem	3,61	3,61	4,513
Estabilizador	Matchem	0,9	1,86	0,9
Água	-	190	190	180
$f_{cm,28}$ (MPa)		57,2	54,2	56,6

Tabela 16: Composição do cimento utilizado na produção dos pisos intertravados (%)

Cimento	Clínquer	Escória de alto forno	Fíler Carbonático	Sulfatos
CII-F 40	72	0	25	3

Em seguida, estimou-se as emissões de CO₂ oriundas de cada matéria-prima. Na Tabela 17 apresentam-se as emissões típicas de CO₂, conforme Miller et al. (2018), para os diversos componentes do cimento.

No caso de escória, o valor mostrado, refere-se apenas à emissão do processamento adicional (moagem, transporte e processamento na fábrica de cimento) uma vez que a emissão de CO₂ gerado no processo de siderúrgico é atribuída ao produto principal (ferro) e não ao coproduto (escória).

A principal fonte de emissões de CO₂ da cadeia produtiva do cimento está localizada justamente na manufatura do principal componente de suas formulações, o clínquer, e compreende basicamente duas origens: a) química, decorrente da descarbonatação do calcário, que corresponde a cerca de 520 kg de CO₂ por tonelada de clínquer e, b) energética, decorrente do consumo de combustível, principalmente nas etapas de aquecimento dos pré-calcinadores e fornos rotativos.

Tabela 17: Contribuição (kg/t) dos diversos constituintes do cimento para as emissões de CO₂

Clínquer e Sulfatos	Escória de alto forno	Argila calcinada	Fíler Carbonático	Sílica ativa ¹	RB ²
860	90	210 a 330	8	90	8

¹Sílica ativa não é citada na referência. Adotou-se o mesmo valor da escória de alto forno

²RB não é apresentado na referência. Adotou-se o mesmo valor do fíler carbonático

A Tabela 18 mostra os resultados dos cálculos para os parâmetros comumente utilizados para comparação de emissões de CO₂: intensidade de ligante e intensidade estimada de CO₂ e a Figura 35 compara estes parâmetros em função da resistência à compressão aos 28 dias para diversas formulações de referência para o estado da arte da tecnologia atual.

Nota-se que as formulações desenvolvidas neste trabalho estão próximos aos das melhores práticas da tecnologia atual, especialmente em termos de ligantes. Quanto à eficiência de CO₂, há potencial de melhoria caso se empregue cimentos com teores mais altos de material cimentício suplementar, como por exemplo,

cimentos tipo CP-III ou CP-IV, casos em que apresentariam ainda a vantagem adicional de aumentar a fixação de íons solúveis provenientes do RB por meio dos novos componentes cimentícios.

Tabela 18: Memorial de cálculo das intensidades de ligante e de CO₂ para os pisos intertravados

Concreto	Tipo Cimento	f _{cm,28} (MPa)	Ligantes (kg/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	Intensidade de ligantes (kg/m ³ /MPa)	Intensidade de CO ₂ (kg/m ³ /MPa)
T1 (REF)	CP II-F 40	57,2	356	284	6,2	5,0
T2 (RB/A)	CP II-F 40	54,2	356	285	6,6	5,3
T3 (RB/CP)	CP II-F 40	56,6	332	265	5,9	4,7

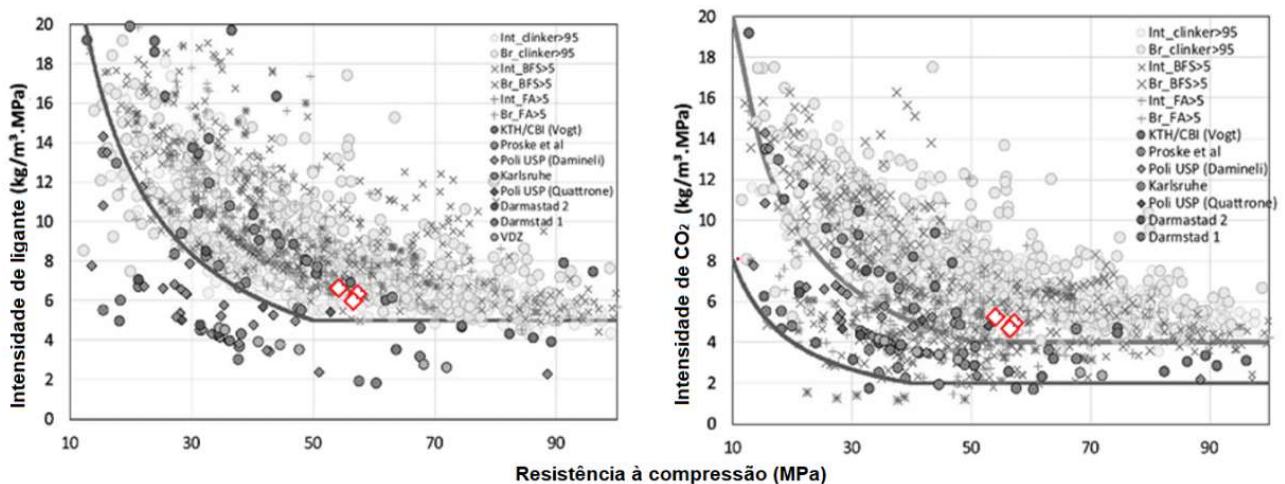


Figura 35: Comparação das emissões de CO₂ (T1, T2 e T3 em vermelho) com estudos de referência
 A curva contínua inferior da corresponde às melhores práticas da tecnologia atual. FONTE: adaptado de (Scrivener et al., 2018).

Além das emissões de CO₂ da fabricação do cimento, é necessário ainda considerar aquela decorrente do transporte do cimento da cimenteira até a concreteira. O transporte de cimento para concreteiras é realizado por carretas tipo silo, vulgarmente denominadas de “cebolões”. Como estes não permitem frete de retorno, é necessário considerar tanto o trajeto da cimenteira para a concreteira, como o trajeto de volta. Com base em dados obtidos de diferentes tipos de pode-se estimar o consumo de combustível tanto para o arranjo com carga (40 toneladas), quanto para o arranjo vazio (15 toneladas), sendo a carga de cimento de 25 toneladas em cada viagem. Tem-se assim valores de, respectivamente 0,37 e 0,14 L/km, com média de 0,25 L/km, que está próxima da de outros estudos*, que relatam consumos de 0,27 a 0,29 L/km. Como estes últimos consideram tipologias de caminhões e rodovias mais abrangentes, adotou-se consumo médio de 0,27 L/km nos cálculos deste relatório.

Adotando-se o valor de 2,799 kg de CO₂ por litro de Diesel (Ministério de Ciência e Tecnologia) temos uma emissão de 0,756 kgCO₂/km e conseqüentemente com o transporte de 25 toneladas de cimento em cada viagem emite-se 0,0302 kgCO₂ / (km.ton) que resulta nos dados mostrados na Tabela 19.

Tabela 20 sumariza as emissões de CO₂ referentes à fabricação e transporte do cimento.

Tabela 19: Cálculo da emissão de CO₂ no transporte da cimenteira à concreiteira

Cimento	Local da fábrica	Distância fábrica-concreiteira-fábrica (km)	Emissão CO ₂ (kg/t cimento)
CPII-F 40	Primavera-PA	2 x 268 = 536	25

Tabela 20: Emissões de CO₂ associadas ao cimento na manufatura dos pisos intertravados

Concreto	Tipo Cimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Fabricação	Transporte	Total (kg/m ³)
T1 (REF)	CP II-F 40	435	284	7	291
T2 (RB/A)	CP II-F 40	435	285	7	292
T3 (RB/CP)	CP II-F 40	405	265	7	272

Os valores de CO₂ emitido, consumo de água e custo para produção de cada formulação estão sumarizados na Tabela 21. Observa-se que a formulação T2 apresenta emissão de CO₂ muito próxima da referência enquanto o uso da formulação T3 resulta em queda de 7%, sendo esta última a que apresentou também a menor intensidade de ligantes.

Tabela 21: Análise de custo benefício das formulações de pisos intertravados

Concreto	Tipo Cimento	CO ₂ (t)	Água (m ³)	Custo (R\$)
T1 (REF)	CP II-F 40	3,494	2,28	5.658,60
T2 (RB/A)	CP II-F 40	3,501	2,28	5.670,96
T3 (RB/CP)	CP II-F 40	3,259	2,16	5.518,20

Para fins de avaliação da relação de custo benefício das formulações, na Tabela 22 estão sumarizados os resultados dos cálculos de custo de produção, consumo de água e emissões de CO₂ para as formulações com RB, em comparação com a formulação de referência. Observa-se que além de apresentar a menor emissão de CO₂, a formulação T3 também apresenta o menor custo e o menor consumo de água. Este é um exemplo claro de como uma otimização da composição permite ganhos técnicos, financeiros e ambientais em um cenário em que ainda há destinação em grande escala para o RB.

Tabela 22: Comparação dos concretos com RB em relação ao concreto de referência

Concreto	CO ₂ (t)	Água (m ³)	Custo (R\$)
T2 (RB/A)	+0,006 (0%)	0 (0%)	12,36 (0%)
T3 (RB/CP)	-0,235 (-7%)	-0,12 (-5%)	-140,40 (-2%)

4.4.4.5 Considerações finais

Produziu-se com sucesso e testou-se em escala de Protótipo pisos intertravados utilizando resíduo de bauxita. A partir dos resultados obtidos concluir que todas formulações apresentaram resistência característica superior a 50 MPa, sendo por este critério adequados ao tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão.

Todas formulações apresentaram baixa absorção de água, atendendo às especificações normativas quanto a este critério. Todas formulações apresentaram resistência à abrasão intermediária, sendo por este critério adequados ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Não se observou diferenças significativas dos tempos de exposição e de envelhecimento sobre as composições químicas e mineralógica das amostras de pisos intertravados do protótipo, sendo um indicativo da estabilidade do produto. Os resultados obtidos são promissores dado que as formulações empregadas ainda podem ser otimizadas.

Com base nos resultados obtidos para as avaliações da NBR 10.004, caso o entulho britado de todas as formulações precisem ser destinados como resíduo nas condições atuais, eles serão classificados como Classe II-A (não perigoso e não inerte). Esta classificação não difere dos resíduos britados da construção civil convencional e, portanto, não haveria necessidade de procedimentos especiais para os pisos com RB.

Recomenda-se que em iniciativas futuras sejam considerados projetos de instalação dos pisos que permitam coleta da água de chuva que percola através do conjunto constituído pela superfície pavimentada e sua base, para fins de quantificação das espécies químicas possivelmente lixiviadas em condições reais. Isso permitiria maior assertividade quanto aos aspectos ambientais de longo prazo da implantação deste produto.

Pelos resultados que se obteve até o momento, para tráfego leve seria possível aumentar a escala de produção do protótipo para um piloto, mantendo formulações e metodologias de fabricação inalteradas, sem incorrer em riscos ambientais ou alterar as especificações técnicas dos pisos.

4.4.4.5.1 Referências

ABNT. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

ABNT. NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

Córdob, R. E.; Schalch, V. Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação. *Revista de Engenharia Civil*, v. 51, p. 23–36, 2015.

Lima, A. S.; Cabral, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 169–176, jun. 2013.

Miller, S. A. et al. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO2 ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS. v. 114, p. 115–124, 1 dez. 2018.

Ramos, B. F. Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do Município de Vitória - ES. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)*—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

Scrivener, K. L.; John, V. M.; Gartner, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO2 ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS. v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

Silva, R.; Arnosti Jr., S. Caracterização de resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado. *Holos Environment*, v. 5, p. 151, 17 maio 2005.

4.5 Cimento de Baixo Carbono

4.5.1 Parceria

Uma parceria foi estabelecida com a Universidade Federal do Pará, publicada no diário oficial da união em 07/07/2020 para desenvolvimento de um estudo de produção de cimento de baixa emissão de CO₂ a partir de uma mistura ternária Resíduo de Bauxita – Metacaulim – Calcário, em substituição ao clínquer Portland.

4.5.2 Definição do conceito

Conforme apresentado nos relatórios anteriores o conceito desta aplicação foi definido com base em levantamentos bibliográficos e identificação na oportunidade de sinergia entre as indústrias do cimento e do alumínio com relação à sustentabilidade. A produção global de cimento deverá crescer entre 12 e 23% até 2050 em relação ao nível atual, o que fará com que a fabricação de cimento seja responsável por aproximadamente 11% a 15% das emissões globais antropogênicas de CO₂ caso não sejam alteradas a maneira de construir e de produzir cimento. O aumento do uso de materiais cimentícios suplementares (adições minerais) passa a ser uma das melhores estratégias para redução da demanda energética, da emissão de CO₂ e do consumo de matéria-prima não renovável. O projeto de pesquisa tem como objetivo, portanto, investigar a eficiência do emprego do resíduo da bauxita como uma adição mineral na produção de cimentos ecoeficientes.

4.5.3 Ensaio Isolados

Nesta fase de Ensaio Isolados busca-se desenvolver formulação de cimento composto utilizando RB, juntamente com argila calcinada e calcário, de modo a se reduzir a quantidade de clínquer no cimento. No relatório anterior apresentou-se a caracterização das matérias-primas: resíduo de bauxita (RB), os materiais cauliniticos – resíduo de lavagem da bauxita (RLV), caulins *Flint* (CF) e *Soft* (CS); e calcário (Cc).

Neste relatório é apresentado a continuação do desenvolvimento, o qual compreendeu a investigação da atividade pozolânica das matérias-primas, com foco na investigação da influência do grau de desidroxilação das argilas cauliniticas e do efeito da temperatura de calcinação do RB.

4.5.3.1 Avaliação da atividade pozolânica das matérias-primas

Para avaliação da atividade pozolânica dos materiais cauliniticos (CF, RLV, CS), 2,5 kg foram secos em estufa, à 105 °C até massa constante, calcinados em mufla à 800 °C por 1, 2 e 3 horas e moídos por 3 horas em moinho de bolas, por meio de jarros de porcelana de 10 litros com esferas de alumina na proporção 1:9 (carga: esferas). A variação dos tempos de calcinação teve o objetivo de gerar produtos com diferentes graus de desidroxilação.

Para avaliação da atividade pozolânica do RB, semelhante aos materiais cauliniticos, o RB foi seco e em seguida calcinado por 2 horas nas temperaturas de 300, 500 e 800 °C. O calcário foi seco e moído nas mesmas condições dos demais materiais. Este calcário foi utilizado como referência, uma vez que já é sabido que o mesmo apresenta atividade pozolânica bem limitada, sendo utilizado largamente apenas como filler.

Para preparação das argamassas se utilizou o cimento Portland do tipo CP V-ARI (alta resistência inicial), da fabricante MIZU. As características físico-químicas do cimento adotado como referência foram retiradas do site do fabricante.

Após preparação, a perda ao fogo residual das adições minerais foi obtida pelo método gravimétrico por calcinação a 1.000 °C durante uma hora. A massa específica foi determinada por picnometria conforme prescrições da norma ABNT NBR 16.605.

Curva granulométrica e diâmetro médio das partículas foram determinados via granulômetro a laser, marca MARVERN, modelo MASTERSIZER 300.

Análises de área superficial específica (ASE) foram efetuadas pelo equipamento de fisissorção modelo Nova 2200e, da Quantachrome Instruments. As medidas foram realizadas na temperatura de N₂ líquido, -196 °C. A partir das isotermas de adsorção–dessorção determinou-se a ASE pelo método BET (Brunauer – Emmett – Teller) e o volume total de poros (VTP) pelo método BJH (Barrett – Joyner – Halenda).

As influências do tipo de caulinita (de baixa ou de alto grau de defeitos na estrutura cristalina) e de seus graus de desidroxilação sobre a atividade pozolânica foram avaliadas por meio do ensaio de determinação da atividade pozolânica com cimento Portland (índice de desempenho – ID), descrito na norma ABNT NBR 5.751 (2014). Neste ensaio são moldadas uma argamassa de referência, somente com cimento Portland e areia, e argamassas com as diferentes adições minerais dosadas em 25% sobre a massa de cimento. O ID é a razão entre a resistência da argamassa com adição mineral e a da argamassa de referência. Para que o material seja considerado pozolânico o ID deve ser de no mínimo 90%.

As argamassas foram moldadas com razões constantes (em massa) de água/cimento de 0,48 e aglomerante (cimento e adição mineral)/areia de 0,33. O cimento Portland empregado (CP V) é constituído de 92,5% de clínquer, 5% de fíler calcário e 3,5% de gipsita. A areia foi a normal brasileira, em conformidade com a norma ABNT NBR 7.215. As resistências à compressão foram avaliadas para as idades de 3, 7 e 28 dias. A fluência das diferentes argamassas foi ajustada por adição de um superplastificante a base éteres de policarboxilatos de modo que apresentassem espalhamento em mesa de Graff de 185 ± 2 mm, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23: Ajustes de fluência na medição da atividade pozolânica dos cimentos compostos

Argamassa	Superplastificante (%)	Espalhamento Mesa Graff (mm)
REF (CP V)	0,08	185,0
CS1 / CS2 / CS3	0,40	183,0
CF1 / CF2 / CF3	0,48	182,0
RLV1 / RLV2 / RLV3	0,40	182,0
RBs/RB3/RB5/RB8	0,19	184,0
Cc	0,24	184,0

4.5.3.2 Resultados

As características físico-químicas das adições minerais são mostradas na Tabela 24. Materiais caulínicos com menor cristalinidade (CF e RLV) apresentaram menores perdas ao fogo residuais quando comparados com o CS (de maior cristalinidade), para os mesmos tempos de calcinação. Portanto, CF e RLV apresentaram maior facilidade de desidroxilação que o CS. A Figura 36 mostra esta tendência com maior clareza.

Tabela 24: Análise físico-química da matéria prima dos cimentos compostos

	CPV	CS1	CS2	CS3	CF1	CF2	CF3	RLV1	RLV2	RLV3	RBs	RB3	RB5	RB8	Cc
Perda ao fogo (%)	4,62	2,2	1,9	1,7	1,0	0,5	0,4	0,8	0,3	0,1	-	4,8	1,8	0,7	-
Massa específica (kg/dm ³)	3,15	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,85	2,83	2,85	3,12	3,18	3,22	3,23	2,7
Distribuição granulométrica (μ m)															
D_{10}	1,7	2,5	1,8	1,41	3,28	3,95	2,78	2,49	1,81	0,08	1,96	1,46	1,34	1,24	2,18
D_{50}	8,06	6,4	6,16	6,64	20,7	21,3	19,3	5,22	4,73	3,5	12,2	13,9	21,2	11,0	7,01
D_{90}	28,9	38,7	33,8	44,9	95,6	75,2	78,5	17,3	18,2	11,2	55,7	81,7	123	85,3	33,4
ASE BET (m ² /g)	1650	11,8	10,4	12,5	23,9	25	23,2	54,9	55,6	60,8	15,8	15,9	14,2	16,2	11,1
Resistência a compressão (MPa)															
3 dias	30,9	24,3	26,1	25,4	31,7	36,5	36,0	30,6	33,3	35,8	27,8	27,4	27,0	26,1	21,8
7 dias	33,7	40,4	42,9	43,9	45,3	51,5	50,0	44,8	51,2	52,5	30,2	31,3	30,7	29,9	25,4
28 dias	42,1	52,0	54,8	51,4	52,1	62,4	58,4	53,1	61,0	59,7	33,0	34,3	34,3	34,3	32,4
ID (%)	-	124	130	122	124	148	134	126	145	142	78,3	81,5	81,5	81,5	80,8

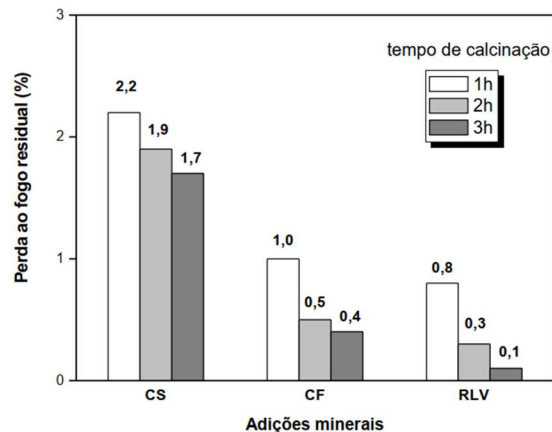


Figura 36: Desidroxilação das matérias-primas cauliniticas

O RB mostrou perda ao fogo decrescente com o aumento da temperatura de queima, o que, provavelmente, deve decorrer da desidroxilação da goethita, da gibbsita e da sodalita. A massa específica crescente do RB com o aumento da temperatura de queima, deve em parte estar associada à formação de estruturas cristalinas mais compactas decorrentes das reações de desidroxilação (a ser confirmado por DRX) e em parte por um processo de sinterização das partículas pequenas, gerando partículas maiores e mais compactas. A natureza bimodal das curvas de distribuição de tamanho de partículas das amostras calcinadas do RB (evidenciando a sinterização) pode ser notada na Figura 37, que compara o RB apenas seco com o RB calcinado em diferentes temperaturas.

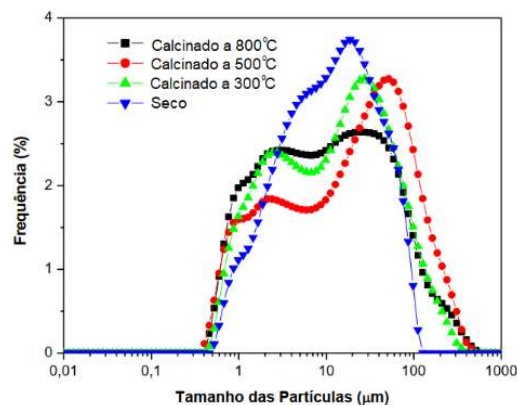


Figura 37: Efeito da calcinação sobre a distribuição de tamanhos de partículas (DTP) do RB

Evidências similares de sinterização também puderam ser observadas pelo efeito do tempo de calcinação sobre as distribuições de tamanhos de partículas dos caulins, principalmente para o tipo *Flint*, como se pode ver na Figura 38. Observa-se na mesma figura que ocorreu pequena diminuição do diâmetro de pico com o tempo de calcinação para o RLV, o que pode evidenciar mudanças para fases cristalinas mais compactas.

A adição produzida pela calcinação por 3 h do RLV resultou em distribuição de tamanhos de partículas quase monomodal, maior teor de finos ($D_{90} \sim 16 \mu\text{m}$) e maior área superficial ($\sim 70 \text{ m}^2/\text{g}$), devendo portanto destacar-se por cimentos compostos resultantes que apresentarão maiores demandas de água e aditivos, fluência e retração plástica por secagem autógena. Espera-se o mesmo comportamento, embora não tão acentuado para todas as demais adições, dadas suas áreas de superfície consideravelmente maiores que a do cimento.

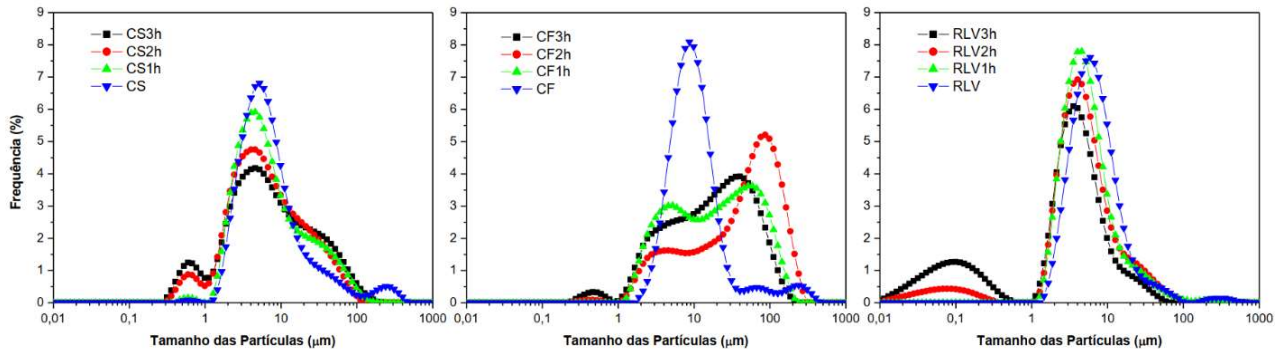


Figura 38: Efeito do tempo de calcinação a 800 °C sobre a DTP dos materiais caulínicos

A Tabela 25 mostra os resultados de medida utilizados para avaliar a atividade pozolânica das adições. O fato das adições decorrentes do CF e do RLV terem desenvolvido resistências à compressão similares ou superiores às do cimento de referência já aos 3 dias de envelhecimento é relevante para a indústria cimenteira, tendo em vista que baixas resistências mecânicas nas primeiras idades são típicas deficiências dos cimentos com elevados teores de adições minerais, produzidos atualmente.

Tabela 25: Determinação da atividade pozolânica dos cimentos compostos

Argamassa	Resistência à compressão			Índice de desempenho (ID, %)
	3d	7d	28d	
REF (CP V ARI)	30,94	33,73	42,1	-
CS1	24,3	40,38	52,05	123,7
CS2	26,1	42,94	54,84	130,3
CS3	25,4	43,9	51,42	122
CF1	31,75	45,32	52,15	123,9
CF2	36,49	51,48	62,42	148,3
CF3	35,96	50,05	58,42	138,8
RLV1	30,6	44,83	53,14	126,3
RLV2	33,33	51,2	60,96	144,8
RLV3	35,78	52,48	59,74	141,9
Cc	21,85	25,37	32,39	80,78
RBs	27,97	30,23	32,97	78,3
RB3	27,37	31,31	34,33	81,5
RB5	27,04	30,66	34,31	81,5
RB8	26,13	29,86	34,31	81,5

A Figura 39 ilustra as atividades pozolânicas das adições produzidas. Observa-se que todas adições produzidas a partir dos materiais caulínicos apresentaram atividades pozolânicas bem superiores ao mínimo estipulado pela norma ABNT NBR 16.689 (ID > 90). Aquelas provenientes das matérias primas com maior grau de defeitos cristalinos, CF e RLV, resultaram em atividades superiores às da pozolana proveniente do CS que, não obstante, também apresentou atividade muito elevada. Portanto, observa-se que maiores imperfeições cristalinas favorecem o desenvolvimento da atividade pozolânica pela calcinação.

Comparando-se as Figura 36 e Figura 39, observa-se que para os materiais caulínicos o tempo de queima de 2 h a 800 °C, que resultou nas maiores atividades pozolânicas proporcionou perdas ao fogo inferiores a 2%, que é justamente o limite adotado pela indústria do cimento para obter maior atividade pozolânica nas plantas de argila calcinada. Entretanto deve-se ainda considerar se o ganhos decorrentes do tempo de 2 h

na calcinação justificariam os custos adicionais necessários, já que as adições calcinadas por 1 h já atendem plenamente a atividade pozolânica exigida pela NBR 16.689.

Não é possível ainda determinar-se qual dos materiais cauliniticos possui a melhor relação custo/benefício, já que outros aspectos como preços dos caulins ou custos necessários para processar o resíduo da lavagem de bauxita ainda não foram considerados e serão objeto de avaliações nas próximas etapas do trabalho.

Considerava-se a possibilidade dos hidróxidos de alumínio presentes no RB desenvolverem atividade pozolânica, principalmente após calcinações a 500 e 800 °C dada a formação de aluminas de alto grau de defeitos cristalográficos e portanto elevada atividade superficial, que ocorre nesta faixa de temperaturas. Entretanto, isto não se confirmou como visto pelos baixos valores de resistência à compressão e ID para todos os RB, seco e calcinados. Verificou-se que nas condições testadas a calcinação não altera o comportamento pozolânico do RB.

Em vez de pozolana, o RB poderá ser usado como carga de enchimento, por ter apresentado resistências mecânicas e IDs muito similares aos da argamassa com calcário, justamente a carga mineral mais utilizada atualmente em cimentos compostos. A hipótese de que a alcalinidade do RB possa proporcionar ativação do caulim calcinado na mistura ternária / quaternária (clínquer + caulim calcinado + calcário + resíduo da bauxita) será investigada por experimentos subsequentes.

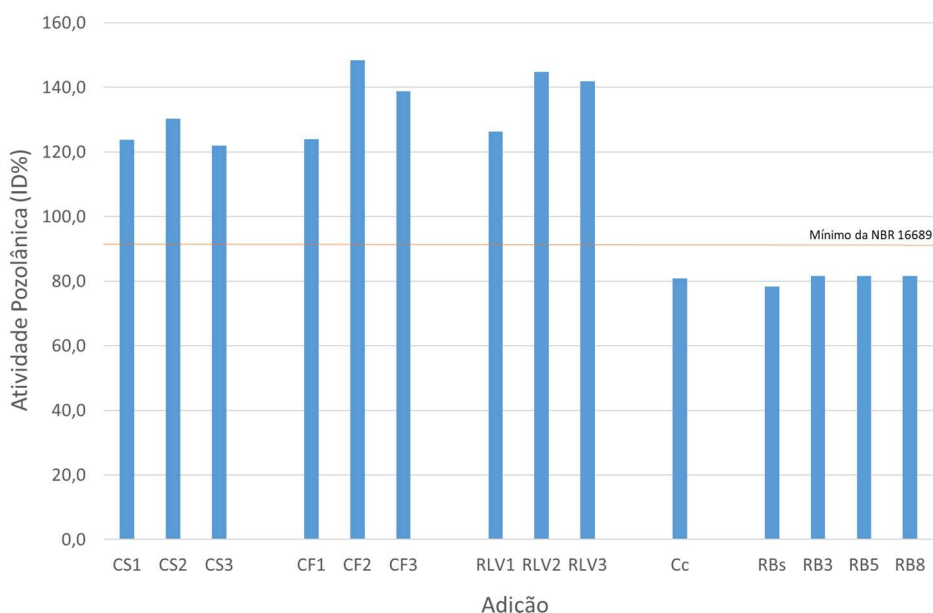


Figura 39: Desempenho pozolânico das adições preparadas para cimentos compostos

4.5.3.3 Considerações finais

Maiores imperfeições cristalinas de algum modo favorecem o desenvolvimento da atividade pozolânica pela calcinação dos materiais cauliniticos CF e RLV comparados com o CS.

O emprego do CF ou do RLV tem o potencial de suprimir o problema das baixas resistências iniciais dos cimentos compostos, desde que mitigadas as dificuldades decorrentes do elevado teor de finos nas adições produzidas com estes materiais (maiores demandas de água e aditivos, fluência e retração plástica por secagem autógena).

Análise de custo benefício deverá ser feita para determinar qual material cauliniticos (CF ou RLV) deverá ser usado nos estudos subsequentes bem como qual será o tempo de calcinação a 800 °C que o mesmo deverá ser submetido (1 ou 2 h).

A calcinação do RB não melhorou suas propriedades pozolânicas, indicando que sua principal função nos cimentos compostos deverá ser mesmo a de carga de enchimento (filler).

Experimentos subsequentes deverão ser executados para avaliar a possibilidade de ativação alcalina dos materiais caulínticos pelo RB em cimentos quaternários (clínquer + caulim calcinado + calcário + resíduo da bauxita).

Como continuidade deste estudo, no momento estão sendo desenvolvidas formulações cimentícias contendo a mistura do material pozolânico (conforme resultados apresentados acima), filler calcário e RB. Os resultados até então obtidos demonstram que incorporações de até 25% do RB ao cimento estão alcançando as exigências da norma brasileira que prescreve os requisitos para cimento Portland, tanto em termos mecânicos, quanto físico-químico. Uma vez que os resultados desta fase indicaram grande potencial de sucesso da aplicação e devido à novidade e atividade inventiva envolvida, estuda-se no momento a obtenção de patente e por este motivo maiores desdobramentos foram resguardados, conforme previsto pela Constituição Federal brasileira (por interesse social) e Lei de Propriedade Industrial.

No escopo desta parceria com a UFPA, com duração de mais 12 meses, estão previstos ainda as avaliações do cimento de baixo carbono desenvolvido em formulações de concreto, considerando ainda uma análise de ciclo de vida do produto. Tais atividades compreendendo a fase de Protótipo desta aplicação.

4.6 Componentes Cimentícios

4.6.1 Parceria

Dentro do convênio estabelecido com a Universidade de São Paulo, iniciou-se em dezembro de 2020 um projeto voltado à estudar a produção de componentes cimentícios contendo resíduo de bauxita incorporado nas formulações.

4.6.2 Definição do conceito

Conforme descrito no terceiro relatório parcial, o presente estudo de P&D engloba quatro macro etapas: 1) caracterização química, física e mineralógica dos materiais de partida; 2) investigação geoconômica e ambiental; 3) definição das formulações e desenvolvimento dos componentes cimentícios com RB; e 4) produção de componentes otimizados em escala de Protótipo com avaliação de desempenho.

As definições do conceito e escopo de trabalho foram baseadas nos dados da literatura e experiência do grupo de pesquisa, nos quais se identificou grande oportunidade técnica de utilização de RB em formulações de concreto como material cimentício suplementar, tendo como principais restrições questões relacionadas à dosagens de RB com impactos na reologia da pasta e desempenho dos produtos, além de fatores geoconômicos e ambientais. Nesse sentido, o presente trabalho visa desenvolver produtos cimentícios com características que atendam todas estas restrições.

Destaca-se que este estudo correlaciona-se com o projeto dos pisos intertravados (seção 4.4). De forma que a mesma equipe de trabalho da USP e Alunorte estão envolvidos, e o desenvolvimento e prova do conceito desenvolvida para os pisos subsidiaram inputs para este projeto.

4.6.3 Ensaio Isolados

Em janeiro de 2021 deu-se início as atividades de desenvolvimento do projeto, o qual tem duração de 24 meses. Neste relatório são apresentados os resultados do desenvolvimento dos componentes cimentícios, o qual compreende as caracterizações das matérias-primas e primeiras avaliações das pastas cimentícias no estados fresco e endurecido. Um panorama da investigação geoconômica e ambiental também é apresentado.

4.6.3.1 Matérias-primas

Conforme plano inicial, serão realizadas quatro coletas de resíduo de bauxita em períodos distintos para o monitoramento da variabilidade físico-química e mineralógica. Estas coletas foram planejadas de modo a se distribuírem ao longo do primeiro ano da pesquisa, de modo a contemplar também variações climáticas sazonais. Até o momento foram coletados os três primeiros lotes, estando ainda pendente a quarta coleta para o segundo semestre de 2021.

As caracterizações, e posteriormente o uso, do RB estão sendo realizadas preferencialmente no estado em que estes foram coletados e entregues à USP. Essa estratégia foi adotada visando desenvolver os componentes cimentícios sem nenhuma preparação especial do RB, de modo a simplificar o futuro processo de produção em campo.

Para o desenvolvimento dos componentes cimentícios, buscou-se uma parceria com a empresa Supermix de Belém para o fornecimento de areia e britas da região (Tabela 26). Além dos agregados, a empresa forneceu também CP V-ARI RS do fabricante Mizu da fábrica de Baraúna/RN.

Tabela 26: Identificação dos agregados utilizados no estudo (fornecidos pela Supermix)

Material	Origem	Local de extração
Brita 1	granítica	Tracuateua/PA
Brita 0	seixo britado	Ourém/PA
Areia	natural branca	Castanhal/PA

A caracterização físico-química foi realizada para todos os materiais. A Tabela 27 sumariza os resultados de distribuição granulométrica, área superficial e densidade real dos materiais.

Tabela 27: Caracterização física das matérias-primas

Material	D ₁₀ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	MF ¹	ASV _{esf} ² (m ² /cm ³)	Porosidad e granular teórica ³	Densidade real (g/cm ³)
RB1	0,9	4	15,7		2,696	23,30%	3,006±0,041
RB2	0,8	3,8	13		2,849	23,60%	2,983±0,044
CP V-ARI RS	2,2	16,2	58,8		1,071	20,80%	3,133±0,014
Areia	184	398	1030	1,92	0,031	29,20%	2,653±0,007
Seixo	6610	11526	16496	6,45	0,0008	33,50%	2,642±0,033
Brita	11646	15088	18939	6,89	0,0005	36,50%	2,651±0,023

¹MF = Módulo de finura, Diferente dos demais parâmetros, este foi calculado a partir da distribuição granulométrica obtida com parâmetro de dimensão BR_{min}, que é comparável ao ensaio de peneiramento utilizado para definir este parâmetro granulométrico segundo a ABNT 7217.

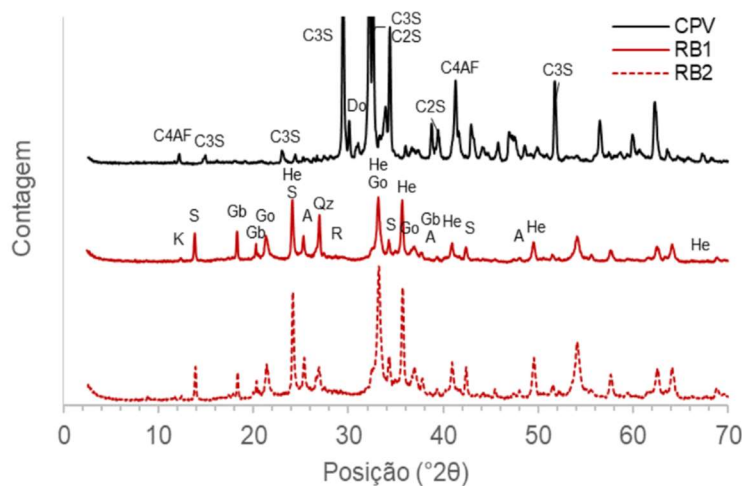
²ASV_{esf} = Área superficial volumétrica, calculada com base na distribuição granulométrica e assumindo partículas com geometria esférica.

³A porosidade granular teórica foi calculada empregando modelo de empacotamento compressível (De Larrard, 1991), com porosidade das frações discretas constante (adotada igual a 40%) e índice de compactação k=9, Reflete, portanto, um potencial de empacotamento baseado apenas na granulometria, sem considerar outros fatores como morfologia, forças de aglomeração/repulsão etc.

Observa-se que ambos os lotes de RB apresentam distribuição granulométrica muito próxima. Interessante notar que a granulometria é mais fina que o cimento, apresentando assim potencial para atuar como um filler, isto é, um material capaz de preencher vazios deixados por um material granular mais grosso, neste caso, o cimento. Este efeito pode ser explorado com finalidade de melhorar o empacotamento da pasta. Note-se ainda que a densidade é próxima à do cimento, de maneira que a introdução dos resíduos em um possível cimento composto resultaria em uma mistura com densidade semelhante ao dos cimentos atualmente disponíveis no mercado. As densidades dos demais materiais avaliados também estão de acordo com o usualmente encontrado. Quartzo possui densidade teórica de 2,65 g/cm³, o que está condizente com as densidades obtidas na areia e no seixo. Granitos apresentam densidade usualmente entre 2,65 e 2,75 g/cm³, sendo a brita localizada no limite inferior deste intervalo. Cimentos de alto teor de clínquer possuem densidades em torno de 3,15 g/cm³, condizente com o tipo de cimento CP V utilizado neste projeto. Tabela 28 apresenta a composição química das matérias-primas e a Figura 40 os difratogramas de raios-X relacionados às fases mineralógicas identificadas do cimento e lotes de RB utilizados. Se observa que a composição química e mineralógica dos lotes de RB são similares, mostrando que a Alunorte produz um resíduo com característica contínua ao longo do tempo. Os resultados do cimento também indicam conformidade as especificações deste produto.

Tabela 28: Composição química do cimento CPV e RB

Elemento	CPV	RB1	RB2
SiO ₂ (%)	17,7	16,3	16,3
CaO (%)	60,8	1,15	1,15
MgO (%)	4,4	0,18	<0,10
Fe ₂ O ₃ (%)	3,45	34,6	36,2
Al ₂ O ₃ (%)	4,01	22,7	22,1
MnO (%)	0,15	0,11	0,07
TiO ₂ (%)	0,23	5,76	5,27
SO ₃ (%)	2,41	-	-
Na ₂ O (%)	<0,10	9,7	9,72
K ₂ O (%)	0,42	0,02	0,03
Perda ao Fogo (%)	5,13	8,71	8,4



Sigla	Mineral/Composto	Fórmula química
C4AF	Ferrita	Ca ₂ FeAlO ₅
C3S	Alita	3CaO.SiO ₂
C2S	Belita	2CaO.SiO ₂
Do	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
S	Sodalita	Na ₈ (AlSiO ₄) ₆ (OH) ₂ .2H ₂ O
Gb	Gibbsita	Al(OH) ₃
Go	Goethita	FeO(OH)
He	Hematita	Fe ₂ O ₃
A	Anatásio	TiO ₂
R	Rutilo	TiO ₂
K	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Qz	Quartzo	SiO ₂

Figura 40: DRX do cimento CPV e RB

Os agregados foram caracterizados com relação à absorção de água, abrasão Los Angeles e morfologia. A Figura 41 demonstra os resultados obtidos com os agregados selecionados para esta pesquisa. A NBR 7211:2019 Agregados para concreto – Especificação, determina os requisitos dos agregados para o concreto, mas não limita ou recomenda o teor de absorção dos materiais para utilização. Quanto à abrasão Los Angeles, a norma indica que o índice de desgaste determinado no ensaio segundo a ABNT NM 51:2000, deve ser inferior a 50% em massa, do material. Apesar do seixo britado ultrapassar o limite recomendado pela norma, o estudo seguirá com o material por se tratar de um componente largamente utilizado em concreto na região de interesse.

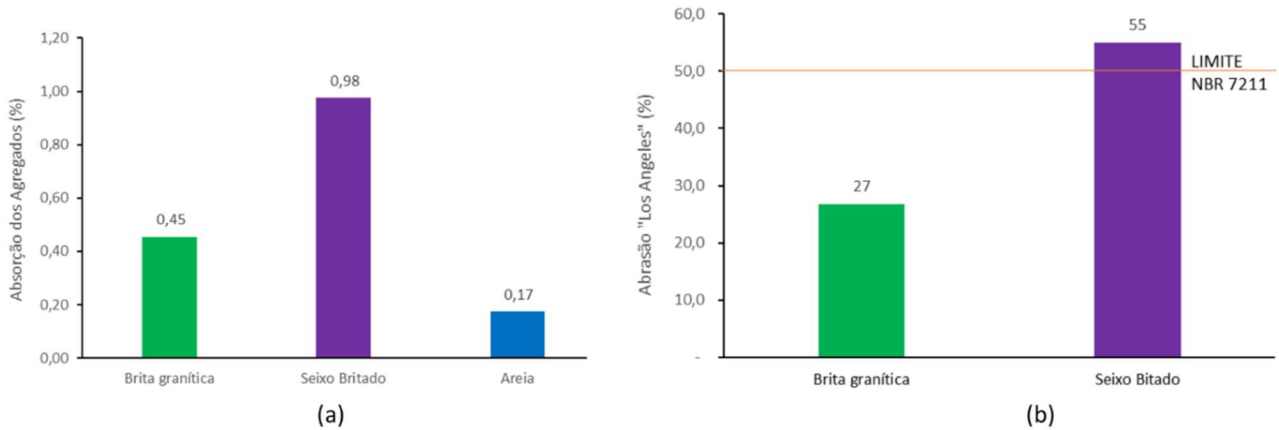


Figura 41: Absorção de água dos agregados(a) e Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos (b)

Na Figura 42 são apresentadas as curvas de distribuição morfológica de relação de aspecto e esfericidade dos agregados. Esta relação morfológica é também apresentada na Figura 43 considerando a mediana e o intervalo percentil de 10% e 90% (barras de erro) das amostras. Ambos agregados graúdos possuem relação de aspecto (macro-forma) similar. Com relação à rugosidade, o parâmetro de esfericidade indica que o seixo é um pouco mais liso que a brita, o que corresponde à percepção visual que se tem das partículas. No entanto, por ter passado por processo de britagem (seixo britado) esta diferença não é tão grande, tendo surgido angulosidades pela quebra dos seixos na britagem. A areia é mais angulosa que os agregados graúdos. Por estes resultados, não se espera diferenças relevantes oriundas de diferença macro-morfológica dos agregados graúdos.

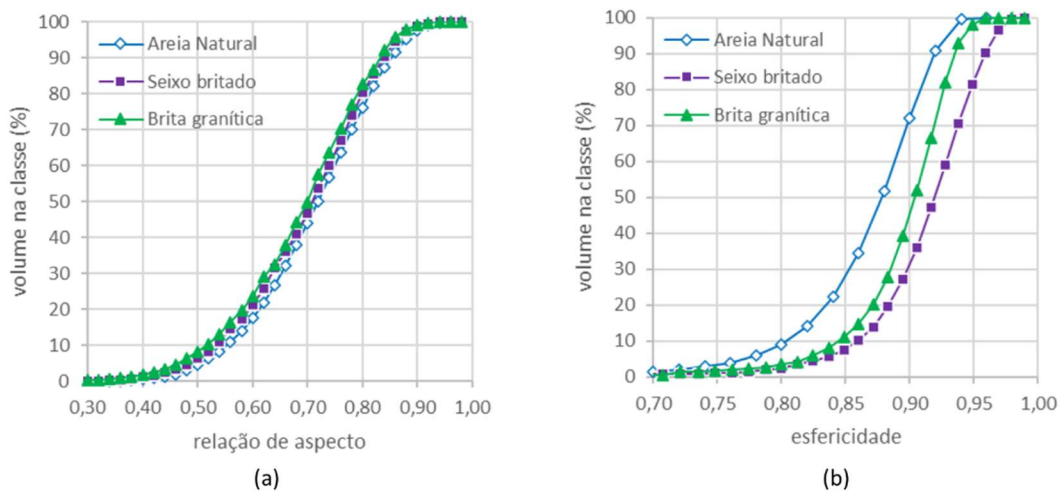


Figura 42: Curvas de distribuição acumulada – Relação de aspecto(a) e Esfericidade (b)

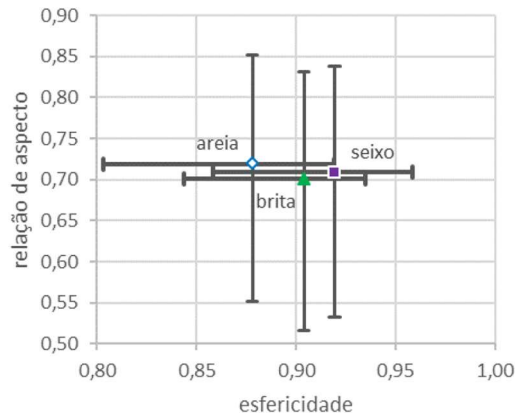


Figura 43: Variação morfológica dos agregados

4.6.3.2 Pastas cimentícias

Pastas cimentícias com diferentes teores de resíduo de bauxita estão sendo preparadas para a avaliação das propriedades reológicas e monitoramento da reação de hidratação do cimento. Inicialmente foram avaliadas composições com substituição do cimento Portland por 10, 20 e 30% de resíduo de bauxita (em volume) para uma compreensão do impacto do uso de diferentes proporções nas propriedades das pastas nos estados fresco e endurecido.

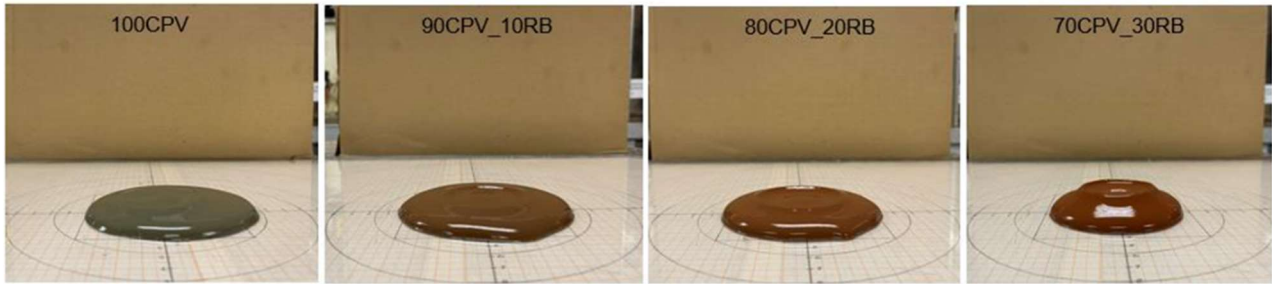
A Tabela 29 mostra as composições das pastas avaliadas nesta etapa do projeto, sendo constituídas de cimento (CP V-ARI RS), RB e água (relação água/materiais secos = 0,50 em massa). Nesta etapa não foi empregado aditivo redutor de água, pois pretendia-se avaliar puramente o impacto da associação do RB com o cimento. Nas etapas futuras do trabalho será utilizado o aditivo Mira Set 63, visto que se trata do produto comercial utilizado pelas concreteiras na região de Barcarena.

Tabela 29: Composição cimentícias analisadas

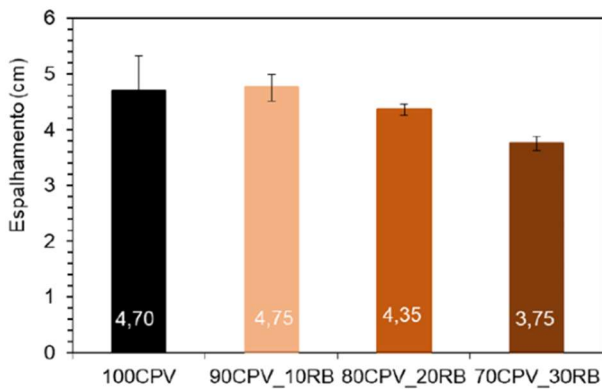
Composição	Teor de cimento (% em volume)	Teor de RB (% em volume)
100CPV	100	0
90CPV_10RB	90	10
80CPV_20RB	80	20
70CPV_30RB	70	30

As pastas cimentícias foram caracterizadas com relação a reologia, reações de hidratação e resistência no estado endurecido.

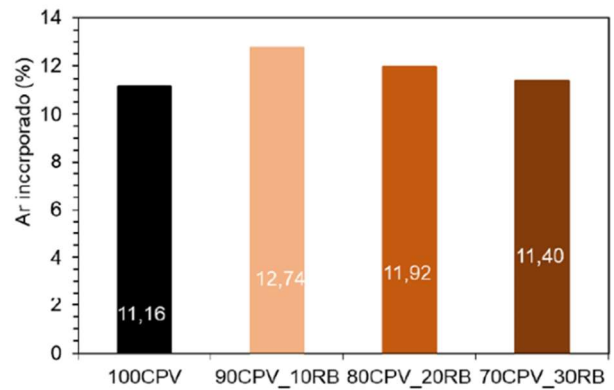
A Figura 44 mostra o aspecto visual e os valores de espalhamento em fluxo livre das 4 pastas analisadas, além do teor de ar incorporado em cada uma delas. Observou-se que, em função do aumento da área superficial específica das partículas com o aumento do teor de RB nas composições, houve diminuição do fluxo livre e um pequeno aumento no teor de ar incorporado.



(a)



(b)



(c)

Figura 44: Pastas cimentícias- mini cone de Kantro (a), espalhamento (b) e teor de ar incorporado (c)

Por meio do ensaio de reometria oscilatória, aplicando-se uma deformação e frequência constantes dentro da região viscoelástica linear, foi possível monitorar o aumento das forças de aglomeração das partículas, representado pelo módulo de armazenamento de energia (G'), mostrado na Figura 45. Essa é uma forma de monitoramento das alterações viscoelásticas do fluido em função do tempo. Observou-se que, o aumento na quantidade de RB na composição resulta em diminuição no tempo para a acentuação do valor de G' , indicando maior rigidez microestrutural. No entanto, após 5 horas de monitoramento não foram observadas alterações tão nítidas na viscoelasticidade dos materiais avaliados.

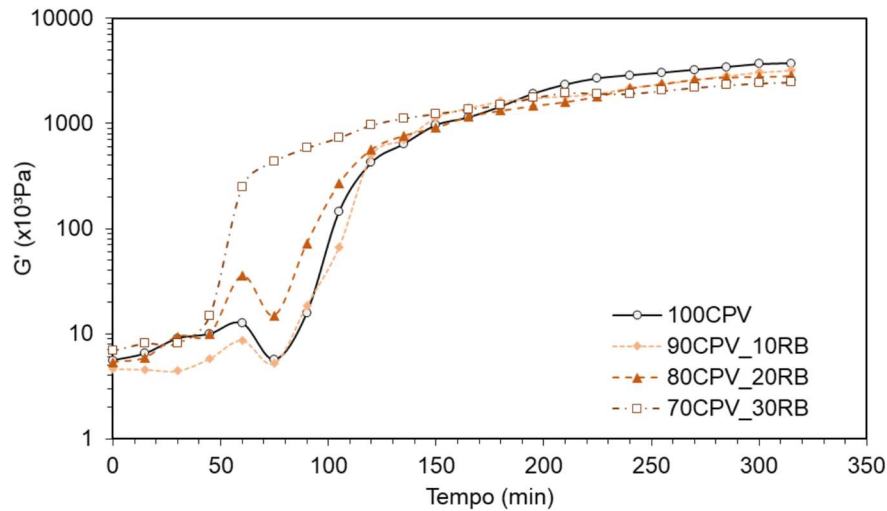


Figura 45: Módulo de armazenamento de energia (G') das pastas cimentícias versus o tempo

Os resultados do ensaio de calorimetria podem ser vistos na Figura 46, mostrando o calor acumulado (esquerda) e fluxo de calor (direita) ao longo do tempo. O ensaio foi realizado por 72 horas, porém como não houve mudança significativa do calor liberado após as 48 h, os gráficos aqui são mostrados apenas até este período. Com a inserção do RB, houve considerável aumento do calor total acumulado após 72 horas de hidratação do cimento, principalmente devido ao aumento da área de superfície do pó. Também é importante salientar que houve um pequeno aumento na taxa de reação, indicando que a nucleação das partículas pode ter interferido de forma predominante na reação.

Além disso, em função da presença de maior quantidade de aluminatos na composição com o maior teor de RB, houve intensificação da conversão de etringita em monossulfoaluminato, ilustrado pela inflexão da curva de liberação de calor da composição com maior teor de RB (70CPV_30RB) entre 18 e 30 horas de monitoramento.

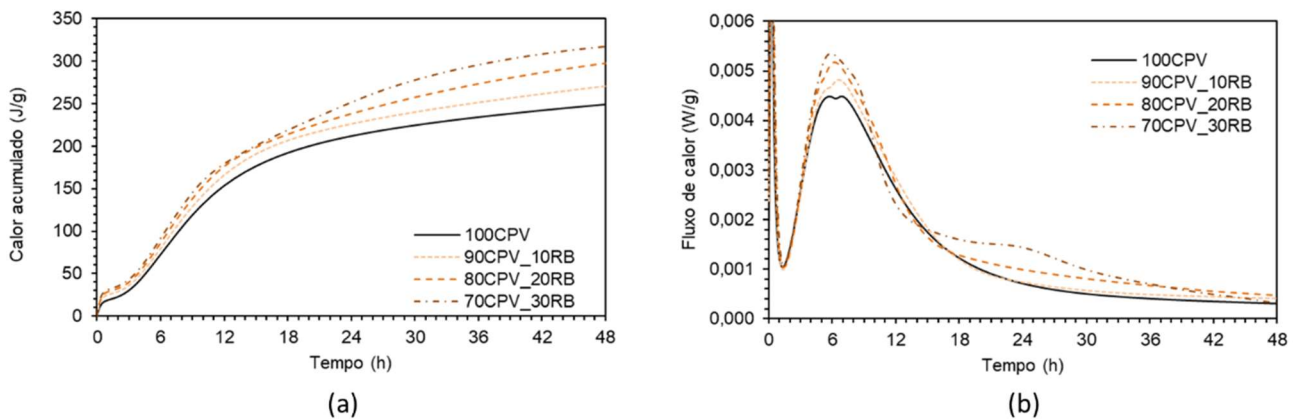


Figura 46: Calor acumulado (a) e fluxo de calor (b) ao longo tempo das pastas cimentícias

Os valores da resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias de cura das pastas os respectivos módulos de elasticidade dinâmico são apresentados na Figura 47. Estes resultados foram avaliados com base em teste ANOVA (para nível de significância $\alpha = 0,05$). Com base nas análises estatísticas se concluiu que a adição de até 30% de RB não ocasionou mudanças significativas nas propriedades dos cimentos no estado endurecido. Embora este resultados sejam muito promissores, no sentido de alcançar grandes volumes de incorporação de RB, um aprofundamento do estudo ainda deverá ser feito, com relação à reologia e trabalhabilidade dos concretos com RB, além da estabilidade mecânica e química ao longo do tempo, para

se obter valores mais assertivos e realistas do teor máximo de incorporação de RB no concretos e componentes cimentícios desenvolvidos.

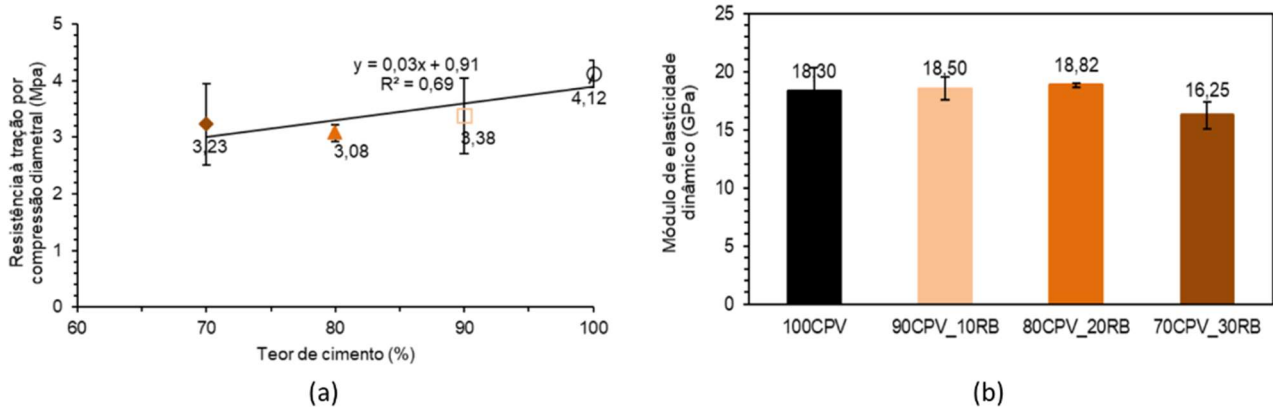


Figura 47: Resistência à compressão (a), módulo de elasticidade (b) - 28 dias das pastas cimentícias

4.6.3.3 Investigação geoeconômica e ambiental

Antes da apresentação dos conceitos e da proposta relacionada à investigação geoeconômica e ambiental, merece ser destacado que a proposta inicial de desenvolvimento deste projeto contempla a avaliação de composições para pisos moldados por *casting*, no qual as formulações podem também servir para a produção de outros componentes cimentícios aplicados na construção civil. Além disso, em uma etapa que será iniciada no segundo semestre de 2021, serão também desenvolvidos componentes produzidos por prensagem de composições semissecas visando outras potenciais aplicações do resíduo em escala industrial.

A investigação geoeconômica e ambiental tem como objetivo avaliar as condições geoeconômicas das regiões impactadas pelo resíduo, visando identificar características dos mercados consumidores, demandas por produtos de construção, potenciais logísticos, disponibilidades de matérias-primas, além de aspectos ambientais (benefícios e impactos que o RB deve introduzir na cadeia industrial).

Para tanto, o projeto avaliará inicialmente informações fornecidas pela empresa Alunorte através de uma dinâmica de questionários e reuniões entre as equipes da universidade e da empresa. A premissa é de que em função do grande volume de RB gerado continuamente, além do volume já depositado, soluções diversas precisam ser consideradas. Especificamente nesta pesquisa, o RB será utilizado como material cimentício suplementar ou filer, por ser menos restritiva, sejam em produtos fornecidos em estado fresco para aplicações diversas, como concretos (por exemplo, usinado, pré-fabricado, pavimentação, barragens etc.) e argamassas (assentamento, revestimento, estabilizada), bem como na forma de componentes cimentícios. Nestas aplicações, mais que atender normas com requisitos físico-químicos estreitos, é importante atender aos requisitos de desempenho.

Quanto às principais linhas de produtos destacam-se:

- Blocos (estrutural e vedação): mercado grande, mas competitivo e com grande oferta impulsionado pelo déficit habitacional;
- Telha: impulsionado pelo déficit habitacional, ainda é pouco empregado, pois tem concorrência forte da telha cerâmica;
- Pisos intertravados / Meio-fio: impulsionado pelo déficit de pavimentação urbana;
- Tubos: impulsionado pelo déficit de saneamento.

A análise de fluxo de materiais (*materials flow analysis* – MFA) investiga como os recursos extraídos da natureza são transformados em produtos e resíduos (UNEP, 2021). A ferramenta emprega o conceito de balanço de massa, onde tudo o que entra no processo deve sair, na forma de produtos e resíduos; ou seja, sem perdas (*input-output analysis*) (Krausmann et al, 2018). No contexto deste estudo, a análise de fluxo de materiais será realizado para avaliar as etapas de extração, beneficiamento e manufatura e quantificar os respectivos fluxos de materiais envolvidos no processo, de modo a quantificar o total de resíduo gerado. O

objetivo desse mapeamento é desagregar os produtos minerais possíveis (agregados, finos etc.) com suas respectivas massas. Nesse levantamento será incluída a incerteza de cada tipo de produto.

Será realizada a avaliação do impacto ambiental simplificada no ciclo de vida pela metodologia da Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (ADAC) (John et al., 2020), onde serão quantificados cinco indicadores ambientais: emissão de CO₂; consumo de recursos, de energia e de água; e geração de resíduos. A metodologia da ADAC foi desenvolvida pela Escola Politécnica da USP em colaboração com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). A simplificação teve como princípio tornar a sua aplicação acessível às empresas e com baixo custo, com coleta de dados primários junto ao setor da construção, de modo a permitir a identificação de pontos de melhoria no sistema analisando.

Os cinco indicadores ambientais serão calculados para cada produto em desenvolvimento nesse projeto e comparados com produtos de referência atualmente disponíveis no mercado. O objetivo dessa comparação é estimar e identificar qual seria o impacto na fabricação do produto com a inserção dos RB na sua composição. Assim, serão considerados dois sistemas: a) sem incluir a reciclagem dos resíduos, e b) com reciclagem.

4.6.3.4 Considerações finais

Com base nos resultados obtidos até o momento pode-se concluir que quanto maior o teor de RB nas composições cimentícias, maior é efeito da nucleação das partículas e intensificação da reação dos aluminatos durante a hidratação do cimento. Adicionalmente, as propriedades reológicas foram impactadas pela quantidade de RB utilizado, seja sob solicitação de cisalhamento ou durante o endurecimento, aumentando a tensão de escoamento e viscosidade e acentuando o potencial de aglomeração das partículas nos instantes iniciais.

Com relação ao desempenho mecânico das pastas no estado endurecido, após 28 dias de cura não foram observadas diferenças estatisticamente significativas nas propriedades avaliadas, mesmo com a utilização de até 30% de RB em substituição do cimento Portland.

A investigação geoeconômica e ambiental descrita neste relatório foi iniciada e será conduzida até o final desta fase do estudo. O escalonamento (fase de protótipo) deverá iniciar na sequência, com a avaliação integrada dos resultados para definição dos componentes cimentícios a serem produzidos, desenvolvimento, moldagem e produção escalonada dos componentes para caracterizações tecnológicas.

4.6.3.5 Referências

UNEP. The use of natural resources in the economy - A Global Manual on Economy Wide Material Flow Accounting, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2021.

Krausmann, F.; Lauk, C.; Haas, W.; Wiedenhofer, D. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015, *Global Environmental Change*, 52 (2018) 131–140.

John, V.M.; Silva, F.B.; Reis, D.C.; Oliveira, L.S.; Gomes, B.M.; Sonvezzo, C.S.; Punhagui, K.R.G.; de Oliveira, L.A.; Degani, C.M. Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção, *Revista Do Ibracon - Concreto & Construções*, (2020) 48–56.

4.7 Agregados Sintéticos

4.7.1 Parceria

Uma parceria com a Universidade Federal do Pará foi estabelecida em novembro 2020 com objetivo de desenvolver um estudo de produção de agregados sintéticos utilizando o resíduo de bauxita para aplicação na construção civil.

4.7.2 Definição do conceito

Como já destacado nos relatórios anteriores, o setor da construção civil se destaca por apresentar diversas oportunidades de sinergia, no qual o RB pode ser viabilizado como matéria-prima, reduzindo tanto os impactos relacionados à sua disposição, quanto à extração de matérias-primas naturais que são tradicionalmente utilizadas. Nesse contexto, este projeto tem o objetivo de estudar a produção de agregados sintéticos com RB para diversas aplicações na construção civil.

Com base em estudos laboratoriais preliminares desenvolvidos pelo grupo de pesquisa da UFPA, se observou que é possível produzir agregados graúdos, tanto leves quanto densos, utilizando argila, sílica e resíduo de bauxita, chegando a incorporações de RB de até 90% na formulação (conforme apresentado no 3º relatório parcial). Neste trabalho se avaliará as melhores formulações e aplicações mais desejáveis no contexto local. Os agregados produzidos serão avaliados quanto ao seu desempenho físico e mecânico sendo, posteriormente, avaliados em solicitações de elementos estruturais e concreto armado quanto aos aspectos químicos e mecânicos, conforme ensaios normatizados.

4.7.3 Ensaio Isolados

A etapa de Ensaio Isolados teve início em janeiro/2021. Esta fase compreende as etapas de caracterização dos materiais, definições das misturas, avaliação das características do agregado produzido com relação ao método de produção (por extrusão e tambor rotativo), mistura e temperatura de sinterização.

Este relatório apresenta o desenvolvimento da primeira fase do projeto (primeiro semestre de 2021) – preparação dos materiais de partida, ajuste das rotas de produção dos agregados, elaboração das matrizes para sinterização e caracterização física preliminar dos agregados.

4.7.3.1.1 Materiais

Para desenvolvimento das formulações dos agregados sintéticos são utilizados juntamente ao resíduo de bauxita uma argila caulínica e sílica (areia). O RB utilizado é proveniente da Alunorte produzido utilizando filtro prensa o qual apresenta umidade ~21% e a seguinte composição química (Tabela 30).

Tabela 30: Composição química do Resíduo de Bauxita

Composição	(%)
<i>Al₂O₃</i>	21,27
<i>SiO₂</i>	17,72
<i>Fe₂O₃</i>	34,31
<i>TiO₂</i>	6,89
<i>Na₂O</i>	9,25
<i>CaO</i>	1,22
<i>Perda ao Fogo</i>	8,11

A argila caulínica utilizada é proveniente da região de São Miguel do Guamá, estado do Pará. Este material tem como objetivo agregar maior a plasticidade à mistura, mantendo o material coeso na secagem e no início do processo de sinterização. Como fonte de sílica foi utilizada uma areia quartzosa comercializada na região metropolitana de Belém.

Todos os materiais foram secos em estufa com recirculação de ar, modelo MARCONI MA 035, à 105 °C por 24 horas, a fim de se remover o excesso de umidade dos materiais de partida. Os materiais também foram submetidos à desagregação para ajuste da granulometria utilizando um moinho de bolas, modelo WORK

INDEX série 005, por 30 minutos. Por fim, o RB e a areia foram classificados em peneiras para se estabelecer a faixa granulométrica ideal para as formulações. Assim, utilizou-se apenas a areia com granulometria menor que 0,21 mm (-65# mesh) e RB passante em 100# mesh (0,105 mm).

4.7.3.1.2 Ajuste do processo produtivo

A Figura 48 apresenta o fluxograma do processo de produção do agregado sintético, desde o preparo das matérias-primas até a obtenção do produto.

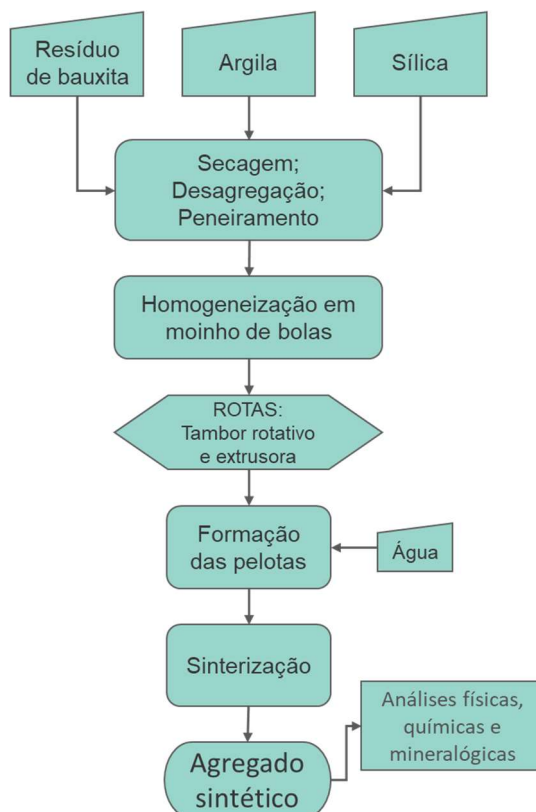


Figura 48: Fluxograma do processo de produção dos agregados sintéticos

Os experimentos foram conduzidos em diferentes proporções das matérias-primas e aditivos (biomassa), conforme descrito na Tabela 31, produzindo-se cerca de 30 kg dos agregados sintéticos. A adição de biomassa está relacionada à formação de agregados porosos leves, uma vez que durante a sinterização são liberados gases causando a expansão e formação destes poros.

A produção dos agregados foi realizada por duas rotas: por tambor rotativo a seco e por extrusão. Para o processo utilizando a extrusora, o material é homogeneizado em um misturador e o produto resultante é obtido em um formato cilíndrico; enquanto que por tambor rotativo, utiliza-se uma betoneira, conforme mostrado na Figura 49.

Tabela 31: Formulações utilizadas na fabricação dos agregados sintéticos

Matéria-prima	Formulações											
	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5*	AG6*	AG7	AG8	AG9	AG10	AG11	AG12*
RB (%)	60	60	60	60	60	60	70	70	80	80	80	80
Argila (%)	15	15	15	25	25	25	15	30	5	5	5	5
Sílica (%)	-	15	20	15	15	15	10	-	15	15	15	15
Carvão (%)	5	10	5	-	-	-	5	-	-	-	-	-

* réplicas com diferentes granulometrias



Figura 49: Betoneira utilizada na rota de produção de agregados via tambor rotativo a seco

Após o tratamento das matérias-primas, foi realizada a mistura e homogeneização desses materiais em moinho de bolas. A matéria-prima homogeneizada foi colocada no tambor rotativo, onde houve a formação das pelotas. Água foi adicionada ao tambor com o auxílio de um borrifador, numa proporção de até 10% (em relação a massa total), para que em contato com a matéria-prima ocorresse a formação do agregado esférico (pelotas). Em seguida, as pelotas foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, seguido da sinterização em forno mufla por 3 horas a 1.250 °C (um teste adicional em 1.100 °C também foi conduzido).

4.7.3.1.3 Sinterização

O processo de sinterização do agregado representa o fechamento dos poros, podendo estar associado com a resistência mecânica e com a eficiência das reações de estado sólido, as quais são responsáveis pela formação da mulita e fase vítrea. Essas transformações podem ser controladas através de ajustes nas granulometrias das matérias-primas, temperatura e tempo de sinterização, formulação da matriz, etc. O material pode apresentar também uma expansão na temperatura de sinterização, sendo essencial para que ocorra a formação do agregado leve de alta qualidade com massa específica inferior a 2 g/cm³.

Para produção do agregado sinterizado utilizou-se um forno mufla com taxa de aquecimento de 10 °C/min até temperatura pré-estabelecida, onde foi mantida por 3 horas. Nesta etapa ocorre transformações de fase: formação de fase vítrea e mulita, responsáveis, respectivamente, pela coesão e redução da porosidade do material e pelo aumento das propriedades mecânicas. Interessante notar que o RB apresenta composição adequada para formação de mulita (Al₂O₃ e SiO₂) além de cátions Fe³⁺ e Na⁺ que possibilitam a formação de fase vítrea de baixa viscosidade (Souza, 2010).

Os agregados sintéticos sinterizados pela rota de tambor rotativo estão representados na Figura 50, cujos diâmetros estão compreendidos entre 0,5 e 1,5 cm.



Figura 50: Agregados sintéticos produzidos por tambor rotativo a seco, após sinterização

4.7.3.1.4 Caracterização física do agregado

As caracterizações físicas foram realizadas de acordo com a norma Mercosul NM 53:2002 “Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. O conhecimento da massa específica do agregado tem por finalidade avaliar se o produto desenvolvido apresenta o baixo peso desejado sem afetar sua resistência mecânica. A avaliação da porosidade aparente é utilizado como medida do grau de sinterização em função da temperatura. Por fim, a medida de absorção de água é importante para se verificar o comportamento da mistura do agregado com o concreto, de modo que o controle deste parâmetro servirá como referência para a análise da trabalhabilidade e do processo de cura da mistura. Os resultados destas análises para as amostras de agregados produzidos nas diversas proporções são apresentados na Tabela 32.

Pode-se observar que as composições testadas que resultaram em agregados com massa específica menor que 2 g/cm^3 foram as misturas constituídas de 60% de RB, 25% de argila e 15% de sílica, sinterizada a $1.250 \text{ }^\circ\text{C}$ (amostra AG5, massa específica = $1,88 \text{ g/cm}^3$), e 80% de RB, 5% de argila e 15% de sílica, sinterizada a $1.100 \text{ }^\circ\text{C}$ (amostra AG11, massa específica = $1,94 \text{ g/cm}^3$), ambos sem adição de biomassa. Nestas amostras a porosidade aparente foi de 0,78% e 15,34%, respectivamente.

Tabela 32: Resultado das propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos

Propriedades físicas	Formulações											
	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5	AG6	AG7	AG8	AG9	AG10	AG11	AG12
Massa específica aparente (g/cm^3)	2,21	2,15	2,05	2,06	1,88	2,1	2,28	2,46	2,22	2,71	1,94	2,27
Porosidade aparente (%)	0,52	0,49	0,44	0,48	0,78	1,57	0,26	0,21	0,27	4,59	15,34	0,77
Absorção de água aparente (%)	0,24	0,23	0,21	0,24	0,41	1,61	0,12	0,09	0,12	1,71	7,9	0,34

Os resultados apresentados na Tabela 32 estão de acordo com outros apresentados na literatura, como o de Takahashi (2006) que utilizou escória de alumínio para a fabricação de argila expandida e obteve um valor de massa específica aparente de $1,6 \text{ g/cm}^3$; Magalhães (2008) que utilizou uma mistura de resíduo de bauxita, sílica, argila e aditivo orgânico, aplicando um controle refinado do processo de secagem dos materiais, resultando em agregados com características normais e leve com valores de massa específica aparente na faixa de $1,25$ a $2,38 \text{ g/cm}^3$ e porosidade aparente de 0,8% a 1,41 %, sinterizados nas temperaturas de 1150 e $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Conforme observado no gráfico de componentes principais (Figura 51) obtido através da matriz de correlação das variáveis, a absorção de água está diretamente correlacionada com a porosidade aparente do agregado, e ambos são inversamente correlacionados com a temperatura de sinterização aplicada, o que era esperado devido à formação de fase vítrea. Adicionalmente, observa-se que uma maior incorporação de RB

na mistura tende a resultar em agregados de maior massa específica. Os resultados de correlação também indicaram que, nestes testes, a adição de biomassa (carvão) não resultou em agregados de maior porosidade.

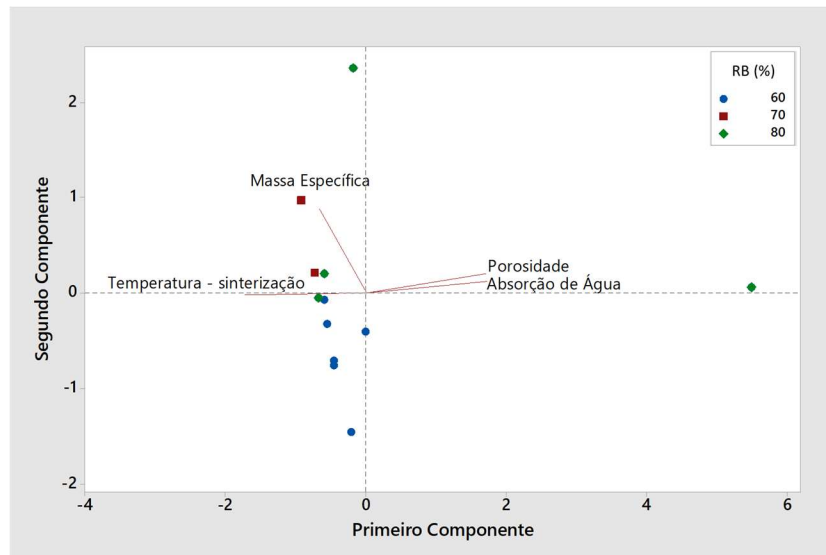


Figura 51: Gráfico de escores e cargas fatoriais para os 2 primeiros Componentes Principais

4.7.3.1.5 Considerações finais

De forma geral, pode-se concluir pelos resultados das propriedades físicas apresentados que o processo de produção de agregado leve ($< 2 \text{ g/cm}^3$) é viável utilizando o RB gerado na Alunorte em formulações juntamente com argila e sílica, com uma incorporação de até 80% de RB. A rota avaliada até o momento – por tambor rotativo a seco, se mostrou adequada para produção dos agregados sintéticos, os quais apresentaram granulometria entre 0,5 e 1,5 cm. Avaliação dos agregados produzidos por extrusão estão em andamento. Estes materiais produzidos serão avaliados quando à estabilidade mecânica e química, de modo a atender as especificações brasileiras, bem como, assegurar o seu desempenho em aplicações em concretos.

Dentro deste projeto de pesquisa desenvolvido em parceria com a UFPA, com duração de mais 8 meses, ainda estão previstas o escalonamento da produção de agregados sintéticos (Protótipo), com a avaliação do desempenho deste produto em componentes estruturais.

4.7.3.1.6 Referências

Magalhães, E.A. *Estudo Da Cinética De Secagem De Agregados Produzidos A Partir De Resíduo Do Processo Bayer*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

Souza, J.A.S. *Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil*, Tese (Doutorado em Engenharia de recursos naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

Takahashi, E.A.N. *Utilização da escória de alumínio na fabricação de argila expandida*, Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

5 ESTUDO DE MERCADO

Adicionalmente ao programa de P&D, conforme relatado anteriormente, houve o início da parceria com a empresa Hatch para a realização de um estudo mercadológico sobre as diversas aplicações do resíduo de bauxita, para que as informações obtidas sejam utilizadas para delinear as novas estratégias de negócios. Neste relatório são apresentadas uma síntese das informações obtidas.

5.1.1 Dados de mercado

A Tabela 33 mostra os dados da aplicação do RB em cimentos de baixa emissão de carbono como material cimentício suplementar (MCS).

Tabela 33: Aspectos de mercado do RB como material cimentício suplementar

Cientes	<ul style="list-style-type: none"> • Cibrasa, do Grupo João santos, em Capanema-PA a 230 Km de distância de Barcarena • Primavera, do Grupo Votorantim, em Primavera-PA a 270 Km de distância de Barcarena • Xambioá, do Grupo Votorantim, em Xambioá-TO a 630 Km de distância de Barcarena 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • CPlIZ: 71-94% de clínquer e gesso, 6-14% de pozolana e 0-15% de Calcário, 171 e 42 US\$/t preço e custo • CPlIV: 45-85% de clínquer e gesso, 15-50% de pozolana e 0-10% de Calcário, 163 e 42 US\$/t preço e custo 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Pozolanas • Argilas calcinadas • Calcário moído 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição de clínquer por RB evita emissões de CO₂ por descarboxilação do calcário e por queima de combustíveis na manufatura deste componente e facilita o cumprimento da meta de sustentabilidade global da indústria do cimento (mínimo 48% de material cimentício suplementar no cimento até 2050). • Substituição de pozolanas, calcário ou argilas calcinadas pelo RB evita impacto ambiental de extrações minerais e emissões de CO₂ por queima de combustíveis na calcinação de argilas. • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção do depósito do RB • Parcerias da Alunorte com grupos especializados da UFPA e da USP já fornecem sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes. • Já existe uma iniciativa global de aproximação entre as indústrias do cimento e do alumínio, sob o protagonismo do Instituto Internacional do Alumínio a fim de integrar esforços conjuntos para viabilizar o uso do RB em cimentos. 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizado como pozolana o resíduo de bauxita <i>in natura</i>, contém cerca de 9% Na₂O e, portanto, não cumpre os requisitos da NBR12.653, que determina a aceitação de pozolanas em concretos. Mistura com outras pozolanas de baixa alcalinidade ou revisão da norma se fará necessário. • Ainda não existem estudos de longo prazo quanto à durabilidade de artefatos produzidos com resíduo de bauxita, os quais serão necessários para a aceitação internacional, já que as diretrizes da indústria do cimento são determinadas atualmente por normalizações globais. • As indústrias do cimento e do alumínio ainda não estão suficientemente engajadas para suportarem os esforços de P&D necessários para elucidação de todas as questões técnicas envolvidas no uso de RB em cimentos. • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados. • Cor avermelhada conferida aos cimentos não é bem vista pelo mercado. 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de cimento de 2.068 kt/ano nos estados do Pará e do Amapá, estimado pela média histórica entre 2010 e 2019, sendo 1.515 kt/ano para o varejo e 395 kt/ano para a indústria. • Substituição de cimento por RB de 20% no varejo e 8,5% na indústria resultaria em consumos de 303 kt/ano no primeiro caso e 34 kt/ano no segundo, totalizando 337 kt/ano do resíduo.
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • 70% dos números acima (100% da região metropolitana de Belém) = 236 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • Metade dos números acima = 118 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção de cimento na região norte do Brasil, o consumo de RB seria 1.148 kt/ano, que será considerado como mercado alvo num primeiro momento.

A Tabela 34 sumaria os dados da aplicação do RB como fonte de ferro e alumínio na produção do clínquer.

Embora o cenário realista represente uma porcentagem relativamente pequena da geração de RB pela Alunorte (~0,25%), esta aplicação tem uma relevante natureza estratégica uma vez que é um das poucas aplicações do resíduo já implementada em larga escala pela indústria do cimento ao longo do globo e portanto não apresenta fatores desconhecidos que possam dificultar a implantação ou impactar negativamente na sustentabilidade.

Tabela 34: Aspectos de mercado do RB como fonte de ferro e alumínio na produção de clínquer

Clientes	<ul style="list-style-type: none"> • Cibrasa, do Grupo João Santos, em Capanema, PA a 230 Km de distância de Barcarena • Primavera, do Grupo Votorantim, em Primavera, PA a 270 Km de distância de Barcarena • Xambioá, do Grupo Votorantim, em Xambioá, TO a 630 Km de distância de Barcarena • São João do Pirabas, da CSN, em São João do Pirabas, PA, a 270 km de Barcarena 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Clínquer Portland 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Minério de ferro de baixo teor • Bauxita 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos especificados por resolução Conama n° 499/2020, que regulamenta o uso de resíduos em fornos rotativos para produção clínquer, As limitações estão principalmente relacionadas às emissões à atmosfera, como partículas matéria, NOx, SOx, entre outros, que não são afetadas pelo RB • Uso de dosagens de RB da ordem de pouco pontos percentuais já ocorre comercialmente em cimenteiras de diversas localidades ao longo do planeta e se enquadra dentro dos limites de sódio admissíveis no clínquer • Substituição de matéria prima não renovável por RB, evita impacto ambiental de extrações minerais • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Parcerias da Alunorte com grupos especializados da UFPA e da USP já fornecem sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes • Já existe uma iniciativa global de aproximação entre as indústrias do cimento e do alumínio, sob o protagonismo do Instituto internacional do alumínio a fim de integrar esforços conjuntos para viabilizar o uso do RB em cimentos 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados • As indústrias do cimento e do alumínio ainda não estão suficientemente engajadas para suportarem os esforços de P&D necessários para elucidação de todas as questões técnicas envolvidas no uso de RB em cimentos • Cor avermelhada conferida aos cimentos não é bem vista pelo mercado 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de cimento de 2,068 kt/ano nos estados do Pará e do Amapá, estimado pela média histórica entre 2010 e 2019 • Substituição de minério de ferro e bauxita por RB de 3% na fabricação do clínquer resultaria em consumo de 21 kt/ano do resíduo
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • 70% dos números acima (100% da região metropolitana de Belém) = 14,7 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • Metade dos números acima = 7,35 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção de cimento na região norte do Brasil, o consumo de RB seria 1.148 kt/ano, que será considerado como mercado de referência

A Tabela 35 mostra os dados da aplicação do RB em componentes cimentícios (artefatos de concretos, em geral).

A implantação do cenário realista representaria um importante passo para o conhecimento das consequências de longo prazo do uso de RB para confecção de artefatos de concreto, o que justificaria o pequeno volume inicial em relação à geração. Com o sucesso nestas condições mais controladas ter-se-ia um potencial muito

relevante considerando-se todo o mercado da região Norte (~19%). Entretanto, o nível atual de conhecimento sobre durabilidade e a grande pulverização de aplicações finais são fatores que impactam fortemente na sustentabilidade deste tipo de uso.

Tabela 35: Aspectos de mercado do RB em componentes cimentícios

Clientes	<ul style="list-style-type: none"> • Premazon, em Marituba, PA, a 80 Km de distância de Barcarena • Pará Blocos, em Belém, PA, a 50 Km de distância de Barcarena • Inbloco, em Belém, PA, a 50 Km de distância de Barcarena • JM Concretos, em Xinguara, PA, a 710 Km de distância de Barcarena • Melotto, em Rio Maria PA, a 740 Km de distância de Barcarena 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Pré-moldados, incluindo blocos de concreto, pisos intertravados, tubos, dormentes ferroviários, entre outros 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Areia • Cimento 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição de matéria prima não renovável por RB, evita impacto ambiental de extrações minerais • Substituição de cimento resulta na redução de emissões de CO₂ • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Parcerias da Alunorte com grupos especializados da UFPA e da USP já fornecem sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • O resíduo de bauxita <i>in natura</i>, contém cerca de 9% Na₂O de álcalis disponíveis e, portanto, não cumpre os requisitos da NBR12653, que determina a aceitação de pozolanas em concretos. Mistura com outras pozolanas de baixa alcalinidade ou revisão da norma se fará necessário • Ainda não existem estudos de longo prazo quanto à durabilidade de artefatos produzidos com resíduo de bauxita, os quais serão necessários para a aceitação definitiva dos produtos • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de cimento de 1.881 kt/ano no estados do Pará, estimado pela média histórica entre 2010 e 2019 • 1,6% (30 kt/ano) do cimento é destinado à confecção de artefatos de concreto • Relação cimento: concreto de 30% resulta num total de 100 kt/ano de concretos para este mercado • Uso de 6% do RB no concreto resulta num consumo de 6 kt/ano
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • 70% dos números acima (100% da região metropolitana de Belém) = 4,2 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • 35% dos números acima = 2,1 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção de artefatos concreto na região norte do Brasil, o consumo de RB seria 1.148 kt/ano, que será considerado como mercado de referência

A Tabela 36 mostra os dados da aplicação do RB para manufatura de agregados sintéticos para aplicações na construção civil.

Este projeto apresenta um potencial de volume muito relevante já no cenário realista, cerca de 23% da geração total de RB pela Alunorte e mais que 100% da geração se considerada toda a região norte. Não obstante trata-se de uma aplicação com questões de durabilidade ainda desconhecidas, que exige portanto cautela, implantação gradual e monitoramento ao logo do aumento da escala comercial.

Tabela 36: Aspectos de mercado do RB em agregados sintéticos para concretos

Clientes	<ul style="list-style-type: none"> • Concreteiras Polimix, em Barcarena e Belém, Tabalmix e Supermix, num raio de 50 Km de Barcarena • Concreteiras Di Brita em Marituba e Tabalmix em Ananindeua, a 94 Km de Barcarena • Concreteira Polimix, em Marabá a 484 Km de Barcarena 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados são usados na fabricação de dormentes ferroviários e na construção civil para misturar com cimento, betume, cal, gesso, entre outros ligantes, para preparar concretos ou argamassas. Estes materiais conferem volume, estabilidade, resistências mecânica e à abrasão, entre outras características físicas desejadas para os produtos finais 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Concretos ou pedras britados, seixos, cascalho e argila queimada para agregados graúdos • Areia e pedra moída para agregados miúdos 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Expansões dos mercados ferroviário e da construção civil no Pará são contrapostas por crescentes limitações da matéria prima, logística e ambiental, resultando em uma escalada de custos e preços. A utilização de RB para manufatura de agregados sintéticos apresenta-se como uma solução possível para conciliar oferta e procura de matérias primas dentro de uma perspectiva amiga do meio ambiente • Substituição de matéria prima não renovável por RB, evita impacto ambiental de extrações minerais • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Não há restrições regulatórias que possam representar empecilhos para o uso de agregados feitos com RB • Parceria da Alunorte com um grupo especializado da UFPA já fornece sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes locais 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • Ainda não existem estudos de longo prazo quanto à durabilidade de agregados produzidos com resíduo de bauxita, os quais serão necessários para a aceitação definitiva dos produtos • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de cimento de 1,881 kt/ano no estado do Pará, estimado pela média histórica entre 2010 e 2019 • Consumo da área metropolitana de Belém = 1.316 kt/ano (70% do estado) • 40% do cimento é destinado à confecção de concreto = 526 kt/ano • Razão cimento/agregado graúdo na composição do concreto: 1 : 3,5 = 1.843 kt/ano de agregado graúdo • Relação cimento/agregado miúdo na composição do concreto: 1 : 5 = 2.633 kt/ano de agregado fino • Substituição de BR por agregados graúdos = 1.474 kt/ano (80% da massa dos agregados graúdos) • Substituição de BR por agregados miúdos = 1.316 kt/ano (50% da massa dos agregados miúdos) • Consumo total de RB , considerando 100% da região metropolitana de Belém = 2.791 kt/ano
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • 50% da região metropolitana de Belém = 1.395 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • 25% da região metropolitana de Belém = 698 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção de cimento na região norte do Brasil, o consumo de RB seria 14.946 kt/ano, que será considerado como mercado de referência

A Tabela 37 mostra os dados da aplicação do RB para manufatura condicionadores de solo para aplicações agrônômicas.

O uso do RB para manufatura de condicionadores de solo apresenta importantes vantagens estratégicas, como as possibilidades de sinergia com clientes, de logística reversa, escassez de calcário na região norte e enquadramento como fertilizante pela regulamentação brasileira. Adicionalmente, embora o volume do cenário realista represente cerca de 5% do RB gerado pela Alunorte, a região norte tem potencial para absorver quase 80% da mesma. Não obstante, recomenda-se estudos para avaliar efeitos de longo prazo do uso continuado para esta aplicação, particularmente impactos sobre segurança alimentar e meio ambiente.

Tabela 37: Aspectos de mercado do RB em condicionadores de solos

Cientes	<ul style="list-style-type: none"> • Agropalma e Brasil BioFuels, produtores de azeite de dendê num raio de 130 Km de Barcarena • Sococo, produtora de Coco em Moju, a 100 Km de Barcarena • Citropar, produtora de Frutas Cítricas, em Capitão Poço a 250 Km de Barcarena 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionador de solos da classe B, conforme instrução normativa 35 (Jul, 2006) do Ministério da Agricultura, produzido a partir da compostagem do RB com resíduos da produção agrícola do dendê, com inoculação de agentes microbiológicos 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Calcário, ao preço de 10,41 US\$/t 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Oportunidade para estabelecer parcerias sinérgicas com os clientes, uma vez que as mesmas empresas que irão potencialmente consumir o condicionador de solo podem atuar como fornecedores dos resíduos orgânicos necessários para sua produção • Possibilidade de utilizar-se no futuro da logística reversa das meios ferroviários de transporte da soja do Mato Grosso para exportação pelo Porto de Barcarena, o que permitirá ampliar o consumo de RB para os produtores agrícolas daquele estado • Por escassez de reservas de calcário não há produção de condicionador de solo no Pará, o que resulta em vantagem logística para a produção a partir de matérias primas locais, como o RB e resíduos agrícolas • Ao contrário do calcário, o condicionador de solos proposto atende aos requisitos mínimos de suprimento de nutrientes, exigidos na Instrução Normativa do MAPA, n° 25 - 23 de julho de 2009 para ser enquadrado também como Fertilizante, o que lhe confere um importante diferencial competitivo • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Parceria da Alunorte com um grupo especializado do Instituto Senai de Inovação em tecnologias minerais de Belém já fornece sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes locais 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • A Tecnored está desenvolvendo o projeto para sua primeira planta em escala industrial no Brasil, localizada em Marabá-PA. Esta planta, com capacidade para 500 kt/ano de ferro esponja, pode vir a ser um concorrente direto para matéria orgânica na região • Próximas etapas de pesquisa devem incluir investigações minuciosas para determinar potenciais riscos do uso do condicionador proposto sobre as cadeias produtivas dos alimentos para garantir a segurança do consumo, • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • 100% das lavouras de 4 agroindústrias a 250 km de Barcarena + 10% das lavouras em 4 cidades a 100 km de Sinop - MT (polo de exportação de soja no Centro-Oeste) • Total de área cultivada = 284.500 ha • Dosagem de condicionador de solo = 1,25 t/ha (anual) • Consumo de condicionador de solo = 355,6 kt/ano, base RB
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • 100% das lavouras de 4 agroindústrias a 250 km de Barcarena, 199000 ha * 1,25 = 298,5 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • 50% das lavouras de 4 agroindústrias a 250 km de Barcarena = 149,2 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção da região norte do Brasil, o consumo de RB seria 4.782 kt/ano, que será considerado como mercado de referência

A Tabela 38 mostra os dados da aplicação do RB como concentrado de ferro na indústria siderúrgica.

Possibilidades de relevante contribuição para a sustentabilidade sócio econômica da região de Marabá, bem como as sinergias para implantação do projeto Tecnored somam-se à sustentabilidade ambiental do processo de transformação do RB em produto comercial, aumentando a importância estratégica desta aplicação. Não obstante, as barreiras identificadas requerem novos estudos e cuidados especiais referentes ao impacto das concentrações de alumina e titânio sobre alto fornos, ao destino sustentável dos efluentes líquidos dos processos de elutriação e flotação e à natureza das novas parcerias empresariais necessárias.

Tabela 38: Aspectos de mercado do RB como fonte de ferro em siderurgia

Cientes	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades da Vale em Carajás: Serra norte, Serra Sul e Serra Leste, entre 600 e 750 Km de Barcarena • Produtores de Gusa em Marabá: Gusa Brasil, Sidepar, Ferrogusa Carajás, Carvopar, Siderúrgica Âncora e Sinobrás entre 500 e 600 Km de Barcarena • A Tecnoled está desenvolvendo o projeto para sua primeira planta em escala industrial no Brasil, a ser localizada em Marabá e pode também vir a ser um cliente 	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Concentrado de óxido de ferro com teor de > 55% para <i>blend</i> com minério exportado pela Vale • Concentrado de óxido de ferro com teor de > 55% como fonte de ferro para a fabricação de gusa ou ferro esponja em Marabá 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Minério de ferro produzido pela Vale em Carajás, ao preço de 105 US\$/t (média de 2020) e teor de 67% 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade instalada ociosa para produção de gusa em Marabá pode ser retomada com a oferta de uma fonte de ferro mais barata • Presença de cálcio e magnésio, remanescentes do RB, pode propiciar reduções de custo para produtores de gusa, com eliminação de outras matérias primas, normalmente usadas para ajuste dos teores destes elementos, • Prática corrente da Vale de misturar outras fontes para acerto do teor do minério para exportação • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Parceria da Alunorte com Instituto Senai de Inovação em tecnologias minerais de Belém já fornece sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes locais • Planta em estudos pela Tecnoled terá capacidade para 500 kt/ano de ferro esponja e seu processo prevê a utilização de fontes alternativas de ferro, como o concentrado de ferro oriundo do RB 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • Necessário entender se pode haver impacto da alumina e óxido de titânio no concentrado de óxido de ferro de RB na operação do alto forno • O risco de barreiras regulatórias não pode ser estabelecido com o atual nível de conhecimento e portanto deve ser o foco de estudos futuros • A tecnologia de enriquecimento de ferro no RB por elutriação e flotação gera novos fluxos de efluentes. Avaliações técnicas para gerenciamento e uso desses materiais bem como um balanço econômico do processo integrado são fundamentais. • Alunorte deve investigar atentamente as operações de cada nova empresa parceira, para evitar associação com aquelas que não cumprem com as regulamentações atuais quanto ao ambiente de trabalho e ao meio ambiente. • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de minério de ferro no Pará = 180.000 kt/ano • Mercado de fontes alternativas de ferro (0,5% do total) = 900 kt/ano, base óxido de ferro • Volume equivalente do concentrado de RB (considerando teor de 48% de Fe₂O₃) = 1.868 kt/ano
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • Metade do cenário otimista = 934 kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • 10% do cenário otimista = 180 kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • Considerando a capacidade total de produção de minério de ferro no Pará, o consumo de RB seria 375.000 kt/ano, que será considerado como mercado de referência

A Tabela 39 mostra os dados da aplicação do RB em propantes cerâmicos para extração de Óleo & Gás.

Melhoria das condições de trabalho pela substituição de propantes à base de sílica parece muito relevante caso a produção do propante à base de RB tenha custos competitivos no mercado internacional. Não obstante é preciso esclarecer a possibilidade de barreiras regulatório para exportação além da viabilidade de produção e logística de exportação. O Volume do cenário realista parece relevante com relação à geração do resíduo pela Alunorte (cerca de 7%).

Tabela 39: Aspectos de mercado do RB em propantes para extração de Óleo & Gás

Clientes	Schlumberger Limited (EUA), Baker Hughes Co. (EUA), Basic Energy Services (EUA), NexTier Oilfield Solutions Inc. (EUA) e Calfrac Well Services Ltd (Canadá), Todas essas grandes empresas são potenciais consumidoras do propante. Considerando a natureza fragmentada do mercado, há também muitos outros participantes menores, alguns dos quais podem apresentar como opções viáveis, dependendo da estratégia de vendas adotada pela Alunorte	
Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Propante cerâmico 	
Matéria prima alternativa	<ul style="list-style-type: none"> • Areia de sílica, 0,077 – 0,138 USD/kg • Areia resinada, 0,430 – 0,540 USD/kg • Cerâmica, 0,595 – 1,984 USD/kg 	
Facilitadores	<ul style="list-style-type: none"> • Custos competitivo do agregado cerâmico de RB (US\$ 31/t) • Uso sustentável evita custos de construção, estocagem e manutenção e pegada ecológica do depósito do RB • Parceria da Alunorte com Drend Solutions já fornece sólida base científica para P&D e suporte técnico à clientes 	
Barreiras	<ul style="list-style-type: none"> • O principal concorrente no mercado nacional de propantes cerâmicos é a forte Mineração Curimbaba, com uma planta localizada em Poços de Caldas - MG, No cenário global, existem muitos outros concorrentes potenciais, como Fores, Carbo Ceramics, Imerys, Hexion, Saint-Gobain, Fineway Ceramics, Badger Mining, JSC Borovichi Refractories Plant, U,S, Sílica Holdings, Hi-Crush, CCRMM e Wanli Proppant • O risco de barreiras regulatórias não pode ser estabelecido com o atual nível de conhecimento e portanto deve ser o foco de estudos futuros • Licenciamentos ambientais e de transporte, bem como o desenvolvimento dos meios logísticos necessários para fazer o RB chegar, de forma competitiva aos clientes são processos novos a serem dominados 	
Volumes Potenciais de RB	Otimista	<ul style="list-style-type: none"> • 1% de todos os tipos de propantes produzidos globalmente = 834 Kt/ano
	Realista	<ul style="list-style-type: none"> • Metade do cenário otimista = 417 Kt/ano
	Pessimista	<ul style="list-style-type: none"> • 25% do cenário otimista = 208 Kt/ano
	Alvo	<ul style="list-style-type: none"> • 100% de todos os tipos de propantes produzidos globalmente = 83.460 Kt/ano

5.1.2 Estágio Tecnológico das aplicações em estudo

Uma adaptação do estudo de mercado desenvolvido pela Hatch ao modelo de análise de estágios de projetos de inovação (descrito no 3º relatório parcial) é mostrada na Tabela 40. Salienta-se, no entanto, que os dados apresentados em todas as análises deste capítulo podem ser significativamente alterados à medida em que o conhecimento de cada aplicação vai sendo aprofundado ao longo dos estágios tecnológicos.

Tabela 40: Definição do estágio tecnológico atual dos produtos a partir do RB

Aplicação	Estágio atual	Principais justificativas
Siderurgia	Protótipo	<ul style="list-style-type: none"> Viabilidade técnica demonstrada em escala de laboratório Sucesso da produção de concentrado siderúrgico com 59% de Fe₂O₃ foi alcançado em escala de laboratório e, em seguida, semi-piloto (protótipo) utilizando-se operações unitárias de atrição, elutrição e flotação, com otimização das dosagens dos aditivos. No momento o material produzido está sendo avaliado para produção de pelotas para aplicação siderúrgica.
Condicionador de solos	Protótipo	<ul style="list-style-type: none"> Viabilidade técnica das rotas <i>in situ</i> e <i>ex situ</i> demonstradas em ensaios isolados em laboratório Condicionador de solo produzido pela rota <i>in situ</i> em casa de vegetação demonstrou adequação aos limites da legislação brasileira. Testes de crescimento de plantas em solo tratado com estes condicionadores de solo demonstraram ótimos resultados. Sucesso na produção escalonada dos condicionadores de solo com 25% e 50% de RB (protótipo). Após 80 dias de monitoramento os materiais produzidos já atendem as especificações técnicas para comercialização como fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.
Pisos intertravados de concreto	Protótipo	<ul style="list-style-type: none"> Viabilidade técnica demonstrada em ensaios isolados em laboratório. Uma área de 278 m² dentro da área de depósitos de resíduos da Alunorte foi pavimentada com pisos intertravados produzidos com RB. Após um ano de monitoramento das peças produzidas, com base em ensaios normalizados se avaliou o desempenho destas peças. Os resultados indicaram que o produto atende as especificações para tráfego leve, não havendo mudança na classificação do resíduo gerado. Avaliação de ecoeficiência demonstrou que os pisos produzidos com RB substituindo o cimento no concreto permitem uma significativa redução dos custos e da emissão de CO₂ com relação ao concreto tradicional.
Extração de Óleo & Gás	Protótipo	<ul style="list-style-type: none"> O sucesso da escala protótipo foi demonstrado por adequação das características físico-químicas do produto às necessidades dos clientes, por determinações dos custos de produção e da emissão de CO₂ e por balanços de massa e energia.
Fonte de Ferro e Alumínio para Clínquer Portland	Protótipo	<ul style="list-style-type: none"> Viabilidade técnica da aplicação com base em ensaios de laboratório Aplicação industrial já realizada em indústrias ao redor do mundo No momento a Alunorte está em negociação com um produtor de cimento da região para realização de testes industriais para coprocessamento de RB um forno clínquer
Agregado para concreto	Ensaio Isolados	<ul style="list-style-type: none"> Conceito demonstrado pela literatura e ensaios preliminares No momento ensaios isolados estão sendo conduzidos para validar o conceito. Resultados preliminares apresentados são promissores
Componentes cimentícios	Ensaio Isolados	<ul style="list-style-type: none"> Conceito demonstrado pela literatura e ensaios preliminares Caracterização das matérias-primas e avaliação preliminar das pastas cimentícias demonstraram viabilidade de aplicação de até 30% de RB no concreto. No momento estão sendo desenvolvidas em laboratório as formulações para produção dos componentes cimentícios e avaliação geoeconômica e ambiental para estes produtos.

Cimento de baixo carbono	Ensaio Isolados	<ul style="list-style-type: none"> • Conceito demonstrado em ensaios preliminares • Caracterização das matérias-primas e avaliação das respectivas atividades pozolônicas demonstraram viabilidade da utilização de até 25% RB na produção de cimentos de baixa emissão de CO₂. • No momento estão sendo realizados testes em laboratório das formulações dos cimentos. Resultados preliminares são muito promissores, dos quais se busca a aplicação de patente.
--------------------------	-----------------	---

6 QUADRO DOS PROJETOS

É apresentado nesta sessão um resumo evolução de cada aplicação ao longo dos 36 meses do programa de P&D estabelecido conforme item 8.13 do Termo de Ajuste de Conduta firmado pela Norsk Hydro Brasil Ltda, Alunorte, com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade e os Ministérios Públicos do estado do Pará e Federal.

6.1 Siderurgia

Objetivo: Desenvolver um concentrado de ferro, a partir do RB, para uso pela indústria siderúrgica.

Realizado: Produto com 59% de teor Fe₂O₃, potencialmente adequado para adição ao minério de ferro da Vale para exportação, para produção de gusa na região de Marabá e/ou para o novo processo TecnoRed, em estudos para a mesma região.

A Tabela 41 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 41: Eventos mais importantes do desenvolvimento do concentrado siderúrgico

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Granulometria fina e baixa suscetibilidade magnética das fases de ferro (goethita e hematita), tornam inviável gerar um concentrado de ferro para a indústria siderúrgica por separação magnética do RB.</p> <p>Conversão de hematita em magnetita por digestão caustica na presença de ferro metálico não se mostrou eficiente.</p> <p>Seis operações unitárias convencionais foram testadas como alternativas: peneiramento, hidrociclonagem, centrífuga Knelson, mesa oscilatória, concentrador em espiral e elutriação/flotação. Concluiu-se que, todas as tecnologias fundamentadas em diferenças granulométricas e gravimétricas não apresentam eficiência satisfatória de separação e que, as tecnologias baseadas em propriedades superficiais: elutriação e flotação apresentaram resultados promissores. Optou-se por seguir com o conceito de flotação.</p>	<p>Verificou-se que as principais fases do resíduo de bauxita (RB) apresentam boa liberação mineral, com média para as fases de ferro em torno de 80%.</p> <p>Verificou-se que as etapas de atrição e elutriação, preliminares à flotação, devem ser mantidas para reduzir os flotados e, conseqüentemente, custo com coletores. Em teste preliminar com as três etapas, obteve-se massa média de concentrado de fundo de 17% da alimentação com 57% de Fe₂O₃ em teor em de fases de ferro.</p> <p>Confirmou-se a limitação da eficiência de flotação para partículas abaixo de 10 µm (cerca de 72% do RB). Portanto 28% do resíduo pode ser tratado por esta rota, com recuperação máxima de 31% do Fe₂O₃ presente no RB original.</p>	<p>Produção escalonada permitiu alcançar um produto com até 59% de Fe₂O₃. Este produto será avaliado para aplicação siderúrgica na forma de pelotas.</p> <p>Identificados clientes potenciais: Unidades da Vale em Carajás: Serra norte, Serra Sul e Serra Leste, entre 600 e 750 Km de Barcarena ; Produtores de Gusa em Marabá: Gusa Brasil, Sidepar, Ferrogusa Carajás, Carvopar, siderúrgica Ancora e Sinobrás entre 500 e 600 Km de Barcarena; e TecnoRed, que está desenvolvendo o projeto para sua primeira planta em escala industrial no Brasil, a ser localizada em Marabá e pode também vir a ser um cliente.</p>

6.2 Condicionador de solos

Objetivo: Desenvolver uma formulação de condicionador de solos com RB.

Realizado: Desenvolvido condicionador de solos da classe B, em conformidade com a Instrução Normativa nº 35 (Jul, 2006) do Ministério da Agricultura, por compostagem do RB com biomassas da produção agrícola do dendê e inoculação de agentes microbiológicos.

A Tabela 42 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 42: Eventos mais importantes do desenvolvimento do condicionador de solos

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Inicialmente definiu-se duas rotas alternativas para bio-neutralização do RB, a geração <i>in situ</i> de ácidos por inoculação de bactérias em misturas do mesmo com resíduos agroindustriais e a geração <i>ex situ</i> de ácidos, em biorreatores de forma similar, porém com posterior adição do ácido biogênico isolado ao RB.</p> <p>A rota <i>in situ</i> mostrou que composições de diversos substratos orgânicos foram capazes de neutralizar parcialmente o RB, sendo que algumas formulações produzirão consumo de sodalita e redução do teor de sódio na fase sólida. A rota <i>ex situ</i> mostrou eficiência similar dos ácidos biogênicos em relação aos de grau analítico, tendo o ácido sulfúrico biogênico apresentado maior eficiência do que o ácido cítrico ainda que ambos possam ser considerados satisfatórios.</p> <p>Ácido sulfúrico biogênico, produzido pela bactéria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>, nas concentrações 0,3 e 0,6 M, mostrou-se eficaz tanto para a neutralização das espécies alcalinas em solução quanto para a redução do tamponamento (reduzindo conseqüente retorno da alcalinidade) pela destruição da sodalita e redução do teor de sódio. As pesquisas decorrentes deste estudo resultaram na publicação de 05 capítulos nos livros <i>Light Metals</i> (2020 e 2021), sendo que na edição de 2021, o artigo "Bayer Process Towards the Circular Economy – Soil Conditioners from Bauxite Residue", recebeu uma inédita premiação internacional da American Society of Minerals, Metals and Materials (TMS), renomada entidade do setor de mineração e metais.</p> <p>A rota <i>in situ</i> foi escolhida por apresentar menores custos de implantação e de logística e a possibilidade de utilizá-la para biorremediação, diretamente na áreas de disposição do RB, adicional em relação à geração de um produto condicionador de solos.</p>	<p>Em testes de compostagem em laboratório, após os 90 dias observou-se degradação das fibras do dendê, significativa queda de pH, retenção de espécies iônicas, presença de pequenos insetos e crescimento de fungos, todas evidências muito positivas.</p> <p>Ensaio laboratorial com mistura de resíduos do dendê (<i>in natura</i> e composto estável) com até 50% de RB e inóculo bacteriano gerou produto em conformidade com legislação vigente e com todas as especificações técnicas requeridas para aplicação comercial</p> <p>Formulações com 25% de RB e 75% de composto estável de dendê e com 50% de RB e 50% dos resíduos de dendê <i>in natura</i> foram submetidos ao ensaio de lixiviação em coluna com latossolo, O pH do lixiviado proveniente da formulação com 25% de RB e 75% de composto de dendê mostrou-se equivalente ao controle com solo e calcário para a dosagem de 40 t/ha e superior para dosagens mais elevadas, indicando a primeira como limite para esta formulação. Mesmo ensaio, com 41,7% de RB, 8,3% de solo, 50% de resíduos de dendê e 2% de nitrogênio, evidenciou tendência de estabilização do pH com aumento da dosagem, com valores próximos aos do solo com calcário para as dosagens mais elevadas, o que caracteriza esta formulação como uma boa alternativa de destinação sustentável para maiores quantidades de RB.</p> <p>Estimativa do impacto das maiores dosagens das formulações dos condicionadores de solo sobre águas subterrâneas após percolação de 553 mm de precipitação incorporadas na camada arável do solo (0-20 cm) mostrou que todos elementos estabelecidos na resolução do CONAMA 420/2009 se mostraram abaixo dos limites máximos requeridos pela da mesma e portanto não se identificou possibilidade de impactos negativos sobre águas subterrâneas.</p>	<p>Testes de crescimento de plantas utilizando os condicionadores de solos produzidos nos Ensaio Isolados demonstraram excelentes resultados.</p> <p>Produziu-se em escala de protótipo condicionadores de solo utilizando-se as formulações com RB e biomassa de dendê (25 e 50% de RB) e dois tipos de inoculantes microbianos, um comercial e outro desenvolvido pelo próprio ISI-Belém.</p> <p>Após 30 dias de incubação os parâmetros de qualidade dos condicionadores de solo já se mostraram adequados aos critérios estabelecidos pelas IN do MAPA (nº 7, 25 e 35). Do material incubado após 90 dias serão realizados ensaios definitivos para classificação do produto.</p> <p>Identificados como cliente potenciais, empresas nas proximidades de Barcarena, que por gerarem resíduos agrícolas e usarem condicionadores de solos, podem vir a consumir o RB para gerar os condicionadores que consomem:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agropalma e Brasil BioFuels, produtores de azeite de dendê num raio de 130 Km de Barcarena; • Sococo, produtora de Coco em Moju, a 100 Km de Barcarena; • Citropar, produtora de Frutas Cítricas, em Capitão Poço a 250 Km de Barcarena.

6.3 Extração de Óleo e Gás

Objetivo: Desenvolver um propante cerâmico a partir do RB para uso pela Indústria de Óleo e Gás, que se enquadre nos requisitos da norma API STD19C:2018.

Realizado: Desenvolvido propante cerâmico a partir do RB e Cinzas volantes da Alunorte. Com base em ensaios normatizados em laboratório de referência (Stim-Lab), enquadrou-se na categoria 7k da norma API STD19C:2018.

A Tabela 43 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 43: Eventos mais importantes do desenvolvimento do propante cerâmico

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Firmada parceria com a empresa Drend Solutions, que tem substancial experiência, em laboratório e escala piloto, na síntese e teste de propantes a partir de uma gama de materiais de partida, incluindo resíduo de bauxita.</p> <p>Por experiência prévia da empresa definiu-se um conceito de propantes cerâmico preparado por sinterização de misturas de RB e Cinza Volante da Alunorte, juntamente com outros aditivos.</p>	<p>Diferentes misturas de RB e Cinza Volante da Alunorte foram granuladas com sucesso ajustando-se parâmetros de granulagem e conteúdo de água. Foi possível produzir, com diferentes técnicas de mistura, granulados bem arredondados com superfície lisa e uma boa distribuição granulométrica.</p> <p>Os propantes sinterizados com 70% de RB e 30% de Cinza Volante alcançaram os melhores resultados nos testes de resistência ao esmagamento.</p> <p>A melhores condição de sinterização deste material foi 1170 °C na 3ª zona de aquecimento do forno, propante 4k (apenas 8,3% de finos @ 4000 psi) com densidade de apenas 1,24 g/cm³.</p> <p>Observou que, enquanto o RB e CV <i>in natura</i> apresentam pH alcalinos, os propantes deles decorrentes mostraram pH neutros ou ligeiramente alcalinos, indicando que o processo produtivo dos propantes, principalmente a etapa de sinterização, proporciona transformação das fases cristalinas presentes nos resíduos para novas fases com estruturas cristalinas mais estáveis e inertes, o que foi comprovado pela redução da lixiviação iônica dos produtos finais, quando comparados com os resíduos originais.</p>	<p>Procedeu-se um estudo de otimização do processo de produção do propante com a proporção RB-Cinzas 70/30. Chegou-se à conclusão que é possível obter um produto final com custo de produção de 31 US\$/t, muito menor do que os propantes cerâmicos convencionais, produzidos a partir da bauxita ou do caulim, que custam 489–1630 USD/t e 100 – 170 USD/t, respectivamente.</p> <p>As emissões de CO₂ do processo de produção do propante foram estimadas em 0,18 t CO₂/t de produto para um volume de produção de 100 kt/ano.</p> <p>Foram medidas no novo produto todas características especificadas pela norma API STD19C:2018:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esfericidade e arredondamento de 0,7; • Resistência ao esmagamento 49 MPa; • Diâmetro médio entre 0,595 e 0,297 mm; <p>Com estas características o material enquadrou-se perfeitamente na categoria de propantes 7k, conforme ensaios normatizados realizados no laboratório de referência da indústria internacional de Óleo e Gás, Stim-Lab.</p> <p>O estágio de Protótipo foi concluído com a definição de taxas de produção, fluxos, consumos de energia e rendimento de cada etapa do processo.</p> <p>Identificou-se como potenciais clientes do propante: Schlumberger Limited (EUA), Baker Hughes Co, (EUA), Basic Energy Services (EUA), NexTier Oilfield Solutions Inc, (EUA) e Calfrac Well Services Ltd (Canadá) ou, alternativamente a Mineração Curimbaba, caso pretenda-se vender o RB e as Cinzas, já que esta empresa brasileira é uma das grandes produtoras e exportadoras de propantes cerâmicos.</p>

6.4 Pisos intertravados de concreto

Objetivo: Desenvolver artefatos de concreto com misturas de resíduo de bauxita da Alunorte, areia, agregados e cimento.

Realizado: Produto desenvolvido em escala de protótipo com RB *in natura* substituindo areia e cimento na formulação dos concretos, avaliado quanto ao seu desempenho mecânico e estabilidade química apor ensaios normatizados em laboratório de referência (Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP).

A Tabela 44 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 44: Eventos mais importantes do desenvolvimento dos pisos de concreto com RB

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Escolhido os pisos intertravados para se avaliar o conceito do desenvolvimento de artefatos de concreto.</p> <p>Conceito foi desenvolvido na central da Polimix em Santana de Parnaíba-SP e consistiu na preparação de amostras dos pisos intertravados nas formulações de referência (apenas concreto) e com incorporações do resíduo de bauxita substituindo parcialmente a areia.</p>	<p>Desenvolveu-se formulações de concreto contendo resíduo de bauxita que atendessem características de alto desempenho mecânico ($F_{ck} = 50 \text{ MPa}$), considerando as matérias-primas da região de Barcarena e incorporação do resíduo da ordem de 3% da composição total.</p> <p>Formulações atenderam as especificações de projeto conforme ensaios normatizados (ABNT NBR 5.739:2018), alcançando resistência de $\sim 63 \text{ MPa}$ aos 28 dias.</p> <p>Estabelecida parceria com USP para desenvolvimento das formulações, com a Polimix em Barcarena para preparo dos concretos e com a Marks, Engenharia de Belém para produção e instalação da área de prototipagem.</p>	<p>Foram produzidas aproximadamente 2.000 peças de pisos intertravados de cada uma das formulações: Traço 1 (REF, referência), Traço 2 (RB/A, resíduo substituindo 10% da areia) e Traço 3 (RB/CP, resíduo substituindo 15% do cimento Portland).</p> <p>Com parte das peças instaladas numa área exposta de 278 m^2 dentro de um local já devidamente licenciado na região de depósito de resíduo de bauxita da Alunorte e as demais guardadas ao abrigo das intempéries, coletou-se amostras após 100, 200 e 360 dias de exposição e envelhecimento, para realização de ensaios normatizados de desempenho mecânico e estabilidade química.</p> <p>Para todos os ensaios e peças avaliadas ao longo do tempo, não se observou diferenças significativas entre peças expostas e não expostas sobre o desempenho mecânico, composições químicas e mineralógica. Também não houve variação significativa entre as formulações com RB e a de referência.</p> <p>Todas as formulações atenderam critérios mínimos adequados ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, sendo classificados nesta categoria de pisos pela norma NBR ABNT 9.781:2013</p> <p>Avaliação pela NBR 10.004 mostrou que caso o entulho britado de todas as formulações precise ser destinado como resíduo, ele seria classificado como classe II-A (não perigoso e não inerte). Esta classificação não difere dos resíduos convencionais da construção civil e portanto não haveria necessidade de tratamento especial para disposição do entulho com o uso do RB.</p> <p>Identificou-se como potenciais clientes de diversos tipos de artefatos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Premazon, em Marituba, PA, a 80 Km de distância de Barcarena • Pará Blocos, em Belém, PA, a 50 Km de distância de Barcarena • Inbloco, em Belém, PA, a 50 Km de distância de Barcarena • JM Concretos, em Xinguara, PA, a 710 Km de distância de Barcarena • Melotto, em Rio Maria PA, a 740 Km de distância de Barcarena

6.5 Fonte de ferro e alumínio para clínquer Portland

Objetivo: Utilizar o RB *in natura* como fonte de ferro e alumínio no lugar de matérias primas não renováveis, como bauxita ou minério de ferro.

Realizado: Ensaios laboratoriais demonstrando viabilidade de aplicação do RB na produção de clínquer Portland. Aguardando autorização de teste protótipo, já protocolada na Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS).

A Tabela 45 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 45: Eventos mais importantes do desenvolvimento do RB como fonte de Fe e Al em clínquer

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Bielo-Rússia, China, Ucrânia, Índia, Rússia, Romênia, Geórgia, Moldávia, Chipre e Grécia já usam regularmente BR <i>in natura</i> como fonte de Fe e Al na produção do clínquer Portland. Estima-se que de 1 Mt/a a 1,5 Mt/ano de BR sejam usadas nesta aplicação, (Fonte: <i>Roadmap</i> do Instituto Internacional do Alumínio).</p> <p>Não se identificou restrições regulatórias no Brasil para esta aplicação.</p> <p>Substituição de matérias primas não renováveis é uma das principais estratégias de sustentabilidade da indústria do cimento no mundo conforme <i>Roadmap</i> da <i>Sustainable Cement Initiative</i>.</p>	<p>Foi enviada amostras para Votorantim para caracterização, avaliação de qualidade e balanços químico e de massa. A partir destes resultados o RB foi aprovado para realização de teste industrial.</p>	<p>A Alunorte e a Votorantim Cimentos estão elaborando a carta consulta para solicitação do teste industrial à SEMAS.</p> <p>Identificou-se como potenciais clientes, a cimenteiras:</p> <ul style="list-style-type: none"> •Cibrasa, do Grupo João Santos, em Capanema, PA a 230 Km de distância de Barcarena •Primavera, do Grupo Votorantim, em Primavera, PA a 270 Km de distância de Barcarena •Xambioá, do Grupo Votorantim, em Xambioá, TO a 630 Km de distância de Barcarena •São João do Pirabas, da CSN, em São João do Pirabas, PA, a 270 km de Barcarena

6.6 Agregados sintéticos

Objetivo: Desenvolver agregado sintético com misturas de resíduo de bauxita da Alunorte, argilas e sílica.

Realizado: Estabelecida parceria com UFPA e definido conceito do agregado por via sinterização cerâmica. Desenvolvimento das formulações em fase de ensaios isolados estão em andamento.

A Tabela 46 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 46: Eventos mais importantes do desenvolvimento de agregados cerâmicos com RB

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Estabelecida parceria com UFPA.</p> <p>Definido conceito de agregado cerâmico por sinterização de misturas de RB, Argila e Sílica, com proporções que permitem a produção de agregados graúdos de baixa, média e alta densidade.</p> <p>Identificou-se como potenciais clientes, as concreteiras:</p> <ul style="list-style-type: none"> •Polimix, em Barcarena e Belém, Tabalmix e Supermix, num raio de 50 Km de Barcarena •Di Brita em Marituba e Tabalmix em Ananindeua, a 94 Km de Barcarena •Polimix, em Marabá a 484 Km de Barcarena 	<p>Foram preparadas as primeiras formulações de agregados sintéticos através de tambor rotativo, nos quais se obteve um material granulado esférico de diâmetros entre 0,5 e 1,5 cm.</p> <p>A caracterização destes materiais após sinterização indicou que é possível produzir agregados leves (densidade < 2 g/cm³).</p> <p>Caracterização de resistência mecânica e estabilidade química destes materiais, bem como a produção de agregados via extrusão estão em andamento.</p>	

6.7 Cimento de baixo carbono

Objetivo: Desenvolver um material cimentício suplementar, a base de RB (Alunorte), Rejeito da lavagem da bauxita (Mineração Paragominas) e calcário, adequado para substituir o clínquer em formulações de cimento composto, que atendam a norma NBR 16.697: 2018, considerando as tipologias CP II-F, CP II-Z ou CP IV e assim mitigar as emissões de CO₂ decorrentes da produção deste material.

Realizado: Desenvolvimento das formulações em escala de laboratório. Estudo da aplicação do rejeito da lavagem da bauxita como pozolana e incorporação do RB como fíler para produção do material cimentício suplementar mostrando resultados muito promissores.

A Tabela 47 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 47: Eventos mais importantes do desenvolvimento do cimento de baixo carbono

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>Redução de emissões de CO₂ por substituição do clínquer Portland por materiais cimentícios suplementares (MSC) é uma das principais estratégias de sustentabilidade da indústria do cimento no mundo conforme Roadmap da <i>Sustainable Cement Initiative</i>.</p> <p>Com base nestes direcionamentos, estudo bibliográfico e experiência do grupo de trabalho da UFPA, se estabeleceu o conceito de produção de cimentos de baixa emissão de CO₂ pela utilização da mistura RB – Argila calcinada – Calcário, com possibilidade de incorporação de até 25% de RB, de forma a atender as tipificações de cimento atualmente estabelecidas pelas normas brasileiras.</p>	<p>Concluiu-se ensaios de caracterização e produção de adições minerais a partir da calcinação das matérias primas Caulim Flint (CF), Caulim Soft (CS), resíduo de lavagem da bauxita (RLV), RB e calcário.</p> <p>Materiais caulínticos CF e RLV resultaram em atividades pozolânicas, muito superiores ao mínimo exigido pela norma NBR 16.689, demonstrando potencial para a aplicação na formulação do cimento de baixo carbono.</p> <p>O RB não apresentou atividade pozolânica, mas sua incorporação nas argamassas como fíler apresentou desempenho mecânico superior ao do próprio fíler calcário.</p> <p>Identificou-se como potenciais clientes, a cimenteiras:</p> <ul style="list-style-type: none"> •Cibrasa, do Grupo João santos, em Capanema, PA a 230 Km de distância de Barcarena •Primavera, do Grupo Votorantim, em Primavera, PA a 270 Km de distância de Barcarena •Xambioá, do Grupo Votorantim, em Xambioá, TO a 630 Km de distância de Barcarena 	

6.8 Componentes cimentícios

Objetivo: Desenvolver artefatos de concreto com resíduo de bauxita da Alunorte no contexto de Material Cimentício Suplementar

Realizado: Convênio com a USP estabelecido

A Tabela 48 mostra um sumário dos eventos mais importantes ocorridos durante o desenvolvimento desta aplicação.

Tabela 48: Eventos mais importantes do desenvolvimento de artefatos de concreto com RB

Conceito	Ensaio Isolados	Protótipo
<p>As definições do conceito e escopo de trabalho foram baseadas nos dados da literatura e experiência do grupo de pesquisa, nos quais se identificou a oportunidade técnica de utilização de RB em formulações de concreto como Material Cimentício Suplementar (MCS), tendo como principais restrições questões relacionadas à dosagens de RB com impactos na reologia da pasta e desempenho dos produtos, além de fatores geoeconômicos e ambientais.</p>	<p>Para este estudo foram utilizadas apenas matérias-primas da região, os quais foram caracterizados quanto a aspectos físico-químicos e mineralógicos.</p> <p>Argamassa contendo até 30% de RB apresentaram resistência mecânica estatisticamente igual à referência sem RB. O RB, no entanto, resultou em uma pasta de menor escoamento e maior calor liberado durante a hidratação. A dosagem ideal ainda precisa ser ajustada para atender os critérios de trabalhabilidade e resistência dos respectivos componentes cimentícios produzidos.</p> <p>Os clientes identificados, por ora, são os mesmo apresentados para os pisos de concreto (Tabela 54). Mas uma avaliação geoeconômica e ambiental está sendo desenvolvida no escopo do Convênio para se delinear a melhor estratégia de definição de produtos e mercados.</p>	

6.9 Conclusão

Com base no escopo estabelecido no item 8.13 do TAC, a empresa acelerou seu programa de P&D voltado a utilização de resíduo de bauxita. Foram apresentados quatro relatórios parciais descrevendo o avanço das pesquisas, um relatório preliminar de conclusões, e este relatório final.

Quatro produtos foram desenvolvidos tecnicamente com protótipos no âmbito de projetos de P&D, nos termos solicitados pelo TAC. Outras quatro iniciativas também são mencionadas no presente relatório e fazem parte de investimentos adicionais feitos pela empresa na pesquisa e seguirão em desenvolvimento da fase de Ensaio Isolados – validação do conceito em escala laboratorial. Todos estes estudos foram desenvolvidos em parcerias com importantes instituições de pesquisa do Brasil e estrangeiras, destacando-se as parcerias com o Instituto Senai de Inovação – Tecnologias Mineraias (ISI-TM) e UFPA, localizadas no estado do Pará, além da USP e a empresa de pesquisa alemã Drend Solutions.

Os produtos obtidos em fase de Protótipo como conclusão do programa de P&D previsto no TAC foram: 1) concentrado de ferro para utilização na siderurgia; 2) condicionador de solo; 3) propante cerâmico para utilização na indústria de óleo e gás; e 4) pisos intertravados de concreto.

Assim, restou cumprida a obrigação do TAC e os investimentos em pesquisa continuarão.