

Capítulo 1



10.37423/240308768

ARGAMASSA E CONCRETO COM AGREGADO ÁCIDO: ASPECTO MICROESTRUTURAL DA MATRIZ CIMENTÍCIA E COMPARATIVO DE DESEMPENHO

Ayrton Vianna Costa

*Universidade Federal de Minas Gerais –
UFMG*

Paulo Roberto Gomes Brandão (in memorian)

*Universidade Federal de Minas Gerais –
UFMG*



Resumo: O objetivo geral do estudo foi explorar a ocorrência observada na morfologia das fases cimentícias hidratadas com cimento Portland comum, o composto, os agregados convencionais e os oriundos dos rejeitos de mineração, bem como conhecer seu desempenho para os cuidados necessários. O material foi rejeito de *sinter feed* da Mina de Jangada, Itaminas, Sarzedo, MG, mineral particulado rico em Fe, com medidas de pH variando de 4,11 a 4,98 nos ensaios de solubilização e lixiviação, evidenciando seu caráter ácido quando comparado aos demais agregados de origem quartzosa, calcárea ou gnáissica. Alguns dos cimentos Portland compostos apresentaram significativos teores de escória de alto forno, alguns ácidos e/ou escórias de aciaria em substituição ao clínquer convencional, material com elevada alcalinidade. A bibliografia a respeito das matrizes cimentícias com o cimento Portland faz referência ao seu caráter essencialmente básico e elevado pH, nas quais se desenvolvem os produtos da hidratação do cimento, com exuberância de suas formas (euédricas). A presença do rejeito de *sinter feed* e os cimentos com teores de escória de alto forno, eventualmente também ácidos, conduziram à observação de fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, apresentando certo atrofiamento em sua morfologia clássica, sendo algumas até subédricas e/ou anédricas. Foram observados desempenhos reduzidos em suas performances nos diversos ensaios comparativos devido a eventuais ocorrências também de goethita terrosa. Uma relação de causa e efeito foi estabelecida, sendo que essa redução de desempenho sinaliza a necessidade de ser minimizada, adotando-se parâmetros específicos da tecnologia do concreto em suas dosagens.

Palavras-chave: mineração, rejeito, *sinter feed*, morfologia, performance.

1. INTRODUÇÃO

O rejeito de minério gerado em mineradoras tem criado enormes dificuldades e problemas em sua gestão e descarte. Sua utilização como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, é questão pouco estudada, mas além de dirimir despesas às mineradoras na gestão de seu estoque, controle e descarte, pode beneficiar o meio ambiente de maneira significativa.

O Brasil é um país que apresenta enorme vocação e desempenho para a atividade minerária, tendo na exportação do minério de ferro uma de suas *commodities* de maior expressão e um dos mais relevantes papéis em sua balança comercial. A demanda de aço no mundo é crescente, mas tem passado por uma realidade de mercado em que seu preço reflete menor índice de cotação nos mercados internacionais. Impõe-se, desta forma que, para a manutenção ou minoração desse efeito sobre a balança de pagamentos e necessidades do país, o aumento do volume exportado seja considerado. Contudo, com a conseqüente geração de rejeitos sempre associada, será inevitável a ampliação dos dispositivos e áreas necessários à contenção e deposição de seus respectivos volumes. Nos últimos anos, têm ocorrido acidentes de ruptura de barragens de rejeitos nas plantas de mineração em épocas nas quais se processam aumentos do volume barrado ou de obras de alteamento dessas barragens para o conseqüente aumento de suas capacidades.

Este estudo não aborda rejeito de barragens, mas rejeito estocado em pilhas, prevalecendo as mesmas preocupações em função dos respectivos aumentos dos rejeitos particulados.

A relevância deste trabalho se cinge às conclusões que poderão contribuir para instruir ainda mais sobre o emprego e a utilização desse material, cujas preocupações de danos ao meio ambiente são evidentes pela quantidade de seu volume gerado. Para cada tonelada de minério de ferro, é produzida em média de 0,5 tonelada de rejeitos, sendo a razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos produzidos de 2:1 [1]. Dentre outros requisitos e condicionantes, seu estoque em pilhas impõe a supressão de extensas áreas de cobertura vegetal causadora de desequilíbrio localizado nas condições naturais ambientais e paisagísticas e, tal como para todos os demais rejeitos e resíduos, são necessários mais estudos e pesquisas que visem ampliar seu conhecimento e aproveitamento, minorando essas conseqüências e gerando ganho e riquezas decorrentes da sua utilização responsável.

A presente pesquisa tem convergência total com os princípios que estimulam e norteiam os critérios de preservação do meio ambiente e os que preconizam a Lei 12.305 [2], que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e que destaca, dentre os aspectos em consonância com os conceitos modernos de gestão de resíduos sólidos contidos na Lei, os objetivos de diminuição do uso de recursos naturais no processo de produção de novos produtos - obtido por meio da redução do consumo das areias naturais; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos - obtida por meio da utilização de rejeito do processo de mineração, com a consequente redução do seu volume estocado e custos operacionais; e incentivo à pesquisa e à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados obtidos por meio de análise e validação de procedimento e tecnologia até então pouquíssimo utilizados;

Neste particular, cabe reiterar o que já foi citado em trabalhos anteriores [3,4]: (1) estabelecer, divulgar e desenvolver o mercado para este insumo, explorando como apelo de convencimento suas vantagens ecológicas e, certamente, as viabilidades econômicas e de preços de sua utilização; e (2) buscar estabelecer uma política de incentivos fiscais por meio de vantagens tributárias, coordenada em nível estadual e municipal, para os produtos ecologicamente corretos produzidos com esse material (junto às secretarias estaduais de meio ambiente e fazenda).

O desenvolvimento de tais processos e tecnologias recomendam o direcionamento a instituições com incontestável competência instalada e postura isenta não contaminada por interesses e ações de mercado sendo, sem dúvida, a Academia seu ente mais credenciado. A propósito dessas considerações, o presente trabalho alinhou-se com pesquisa deliberada pelo Ministério Público Federal (MPF) em sua Resolução 014/2016-MPF/GAB/FT, direcionada ao aproveitamento técnico e econômico de estéreis e rejeitos de mineração.

Os últimos e trágicos acidentes ocorridos em atividades mineradoras estabeleceram o aceleração das discussões referentes ao novo Marco Regulatório da Mineração e ao programa Inova Mineral que, entre outras providências, estabelecem também o desenvolvimento de tecnologias e processos para redução e mitigação dos impactos ambientais, que incluem a recuperação e aproveitamento de resíduos e elementos dispersos, recuperação, reutilização, redução ou eliminação de água nos processos da mineração. Enfim, o aprimoramento do conhecimento sobre sua utilização e sua aplicabilidade prática, inclusive e especialmente no tocante ao respeito ao meio ambiente, devem ser meta e responsabilidade de todos.

A utilização do rejeito de minério gerado em mineradoras, como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, não é prática razoavelmente corrente. As poucas experiências limitam-se a casos isolados, de motivação muito específica, mas guardam alguma semelhança com o material objeto da presente pesquisa. Recentemente, há informações acerca de emprego semelhante de bloquetes produzidos com um rejeito de minério no Instituto Cultural Inhotim, Brumadinho, MG. Trata-se de um espaço cultural internacionalmente conhecido, que abriga um museu de arte contemporânea, um jardim botânico e extenso acervo ambiental, no qual também vêm sendo aplicadas peças pré-fabricadas com a utilização de rejeito de minério em áreas de sua pavimentação interna. Poucas experiências práticas vêm sendo desenvolvidas sem maiores cuidados experimentais e sem o necessário estudo científico-tecnológico do material rejeito e de seu comportamento no compósito concreto ou argamassa.

Este trabalho tem por objetivo geral explorar de forma mais ampla a ocorrência observada na morfologia das referidas fases cimentícias hidratadas tendo como parâmetros o cimento Portland comum, o composto, os agregados convencionais e os oriundos dos rejeitos de mineração, bem como conhecer seu desempenho para os cuidados necessários.

Os objetivos específicos envolvem: (1) caracterizar, fisicamente, o novo rejeito final do minério de ferro, por meio de análises granulométricas, de área superficial específica e de porosimetria de adsorção/condensação de nitrogênio; (2) realizar análises mineralógicas e microestruturais no rejeito; (3) moldar corpos de prova de concreto produzidos com e sem o material em estudo para atender os ensaios físicos comparativos previstos; (4) desenvolver análise microestrutural em ambas as amostras dos corpos de prova produzidos, avaliando a microestrutura da interface pasta-agregado com a utilização da microscopia eletrônica de varredura convencional, utilizando a microanálise por dispersão de energia durante estes estudos; (5) enfatizar os aspectos microestruturais referentes à interface entre a pasta e os agregados, tanto no rejeito como na areia utilizada; (6) ampliar os estudos, estabelecendo ensaios comparativos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e de abrasão sob água (*Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)* [5], entre outros, nos concretos produzidos com e sem este agregado, o rejeito de *sinter feed*.

Na construção civil, essa aplicação pode ser estendida a blocos de concreto para alvenarias, assentes sobre o terreno em baldrame ou sapatas corridas, onde o aumento de peso do agregado não representa qualquer inconveniente. Nas estruturas de contenção em alvenaria, ao contrário, o aumento de peso decorrente do agregado é fator preponderante de melhoria do desempenho destas

construções. No saneamento básico, em galerias de esgotos e águas pluviais onde, periodicamente, são demandadas ações de recuperação estrutural devido ao desgaste por abrasão hídrica, esta pesquisa tende a trazer informações e alternativas que, uma vez comprovadas, podem alterar o quadro de periodicidade dessas intervenções, estabelecendo prazos mais longos de recuperação gerando, conseqüentemente, economias significativas. Nos diversos ramos das indústrias, especialmente as ligadas ao emprego do concreto, o campo pode ser vasto e outras aplicabilidades importantes poderão ser vislumbradas no decorrer ou a partir desta pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem situacional tem como referência as plantas de mineração operadas pela empresa Itaminas (ITM), no município de Sarzedo/MG, as quais representam bem o perfil de mineração de ferro desenvolvido nos demais complexos da região. Na Mina de Jangada, a Itaminas alimenta em suas unidades de tratamento de minério de ferro ITM 4, 5 e 6 cerca de 550.000t/mês, produzindo de 80 a 85% de minério de ferro e gerando de 20 a 15% de rejeito fino, também chamado “finos de barragem”, que é direcionado para barragens de rejeito e que, por sua característica, não constitui objeto desta pesquisa. A produção dessas unidades é totalmente direcionada à exportação pela empresa Vale S.A. O rejeito de *sinter feed* em sua configuração final, obtida, atualmente, depois de submetido a um processamento complementar em instalação de jigagem, que propicia uma maior separação do minério de ferro através de sistema gravimétrico, ainda contém significativa quantidade de ferro. Este método de concentração propicia maior recuperação do ferro em relação a processos usados anteriormente, o que constitui o agregado ácido objeto do presente artigo (FIG.1).



Figura 1 – Aspecto do rejeito de *sinter feed*

Os demais materiais envolvidos na pesquisa são os cimentos Portland, CP II - E 32 da Holcim (fabricado em Pedro Leopoldo/MG) e o CP IV - 40 RS da Soeicom (fabricado em Vespasiano/MG), a areia normal do IPT (beneficiada pelo IPT em São Paulo/SP), a areia comum quartzosa lavada média de Esmeraldas (procedente de Areias Fernato em Esmeraldas/MG), as britas calcárias 0 e 1 da Ical (procedente da

mineração Ical em São José da Lapa/MG), aditivo plastificante polifuncional Mastermix BF 40 (fabricado pela BASF S.A.) e água comum distribuída pela Copasa/MG.

Ocorreu ampla caracterização física, química, mineralógica e microestrutural dos materiais envolvidos na pesquisa. Os métodos de análise dos materiais da pesquisa foram baseados na normalização brasileira e aplicáveis aos materiais constituintes dos concretos e argamassas de Cimento Portland.

Foram preparados dois traços de argamassa, produzidos com o rejeito de *sinter feed* e com a areia normal do IPT (com sua granulometria ajustada à granulometria do rejeito), e os demais constituintes mantidos fixos e iguais. Este procedimento, num primeiro instante, visou conhecer e avaliar aspectos diferenciais da reologia destes materiais. Amostras foram extraídas dos corpos de prova de ambas as argamassas para seu exame macroscópico e por microscopia eletrônica de varredura convencional, com ênfase na região de sua interface no estado endurecido. Os corpos de prova moldados foram cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 10cm de altura. Procedimento semelhante foi desenvolvido em uma dosagem pré-estabelecida, desta feita em concretos com e sem o rejeito, este último como substituição total ou parcial da areia comum quartzosa, visando atender à mescla pré-definida da dosagem dentro do parâmetro convencional de concreto plástico (*slump na faixa de 14 +/- 2cm*). Amostras dos respectivos concretos, extraídas dos corpos de prova moldados \varnothing 10 x 20cm, foram objeto das mesmas análises já referidas.

Também em procedimento semelhante ao anterior foram moldados, com os mesmos traços de concreto, corpos de prova \varnothing 30 x 10cm, tendo sido submetidos a ensaios comparativos de abrasão hídrica, de acordo com as prescrições do método ASTM C 1138 [5].

O foco da pesquisa se situa no ambiente da interface (zona de transição) da pasta de cimento hidratado - superfície do agregado, com o intuito de buscar o estudo comparativo e o conhecimento de suas especificidades em duas situações bem definidas: com agregados de emprego corrente em concretos e obras da engenharia civil e com agregados oriundos dos rejeitos das atividades de mineração na produção do *sinter feed*.

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas principais: (1) a primeira se constituiu em abrangente abordagem de caracterização físico-química do novo rejeito (rejeito jigado), estado final de seu processamento na mina, que nessa etapa atingiu sua massa unitária no intervalo esperado (cerca de 1,50 a 1,60kg/dm³); (2) a segunda etapa teve como foco os estudos comparativos descritos nos objetivos desta pesquisa com a utilização de materiais de uso corrente na construção civil e com o resíduo em estudo.

Para as argamassas foram tomados como base os parâmetros da Norma Brasileira que estabelece critérios para Ensaio de Qualidade de Agregado Miúdo (NBR-7221) [6]. Para os concretos foram tomados como base os parâmetros de dosagem de uma indústria de pré-fabricados da região de Belo Horizonte, priorizando a manutenção da mescla granulométrica estabelecida do agregado no traço (módulo de finura da mescla).

Seguem-se tabelas com as características dos materiais:

A Tabela 1 demonstra os resultados do ensaio químico do rejeito.

Tabela 1 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada

Itaminas – Mina Jangada – Laboratório do Controle de Qualidade							
Rejeito <i>sinter feed</i> jigado – Teores %							
Elementos / Compostos	Jan.2015	Fev.2015	Mar.2015	Abr.2015	Maio 2015	Jun.2015	
	Fe	55,55	57,31	57,57	57,03	56,52	55,65
SiO ₂	10,4	9,71	9,11	10,87	10,24	13,28	
Al ₂ O ₃	2,90	1,87	2,07	1,97	1,28	1,89	
P	0,065	0,073	0,073	0,074	0,079	0,083	
Mn	0,14	0,156	0,183	0,196	0,193	0,250	
ppc*	6,50	6,23	5,87	5,12	6,22	4,63	

Massa unitária: variando de 1,58 a 1,62kg/dm³

*ppc = perda por calcinação ou perda ao fogo

A Tabela 2 apresenta a granulometria do rejeito conforme a ABNT NBR 7211 [7].

Tabela 2 – Granulometria do rejeito

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
	01	Peneira	% Retida Acumulada
Material	Rejeito lavado	(mm)	Amostra 01
Natureza	Ferro-quartzoso	9,50	0,0
Procedência	Sarzedo	6,30	0,0
Proprietário	Itaminas	4,75	12,0
Utilização	Argam/Concr.	2,36	41,8
Impureza Orgânica	<= 300ppm	1,18	66,8
Argila em Torrões	1,30%	0,60	80,9
Material Pulverulento	7,38%	0,30	86,1
Coefficiente de Vazios	52,25%	0,15	9,9
Módulo de Finura	3,78	fundo	100

Observa-se que o rejeito se encontra fora das faixas ótima e utilizável recomendadas para os agregados miúdos, o que leva a pressupor a conveniência de se estabelecer um mix com as areias convencionais para a obtenção de uma mescla mais adequada.

A Tabela 3 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da areia comum utilizada na pesquisa.

Tabela 3 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da areia utilizada

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
	01	Peneira	% Retida Acumulada
Agregado			
Material	Areia lavada	(mm)	Amostra 01
Natureza	Quartzosa	9,50	0,0
Procedência	Esmeraldas	6,30	0,0
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	4,75	0,8
Utilização	Argam./Concr.	2,36	3,4
Impureza Orgânica	<= 300ppm	1,18	11,4
Argila em Torrões	0,65%	0,60	42,7
Material Pulverulento	2,86%	0,30	79,6
Massa Unitária	1,339 kg/dm ³	0,15	93,9
Módulo de Finura	2,3184	fundo	100

A Tabela 4 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 utilizada, cuja massa específica apresentou-se em 2,68Kg/dm³.

Tabela 4 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 – ABNT NBR 7211

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
	01	Peneira	% Retida Acumulada
Agregado			
Material	Brita zero	(mm)	Amostra 01
Natureza	Calcária	9,50	6,5
Procedência	Ical	6,30	46,2
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	4,75	78,2
Utilização	Argam./Concr.	2,36	98,6
Impureza Orgânica	0%	1,18	99,2
Argila em Torrões	0%	0,60	99,3
Material Pulverulento	1,0%	0,30	99,3
Massa Unitária	1,461 kg/dm ³	0,15	99,3
Módulo de Finura	5,80	fundo	100

A Tabela 5 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 1 utilizada na pesquisa.

Tabela 5 – Dados físicos da brita 1 – ABNT NBR 7211

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
	01	Peneira	% Retida Acumulada
Agregado			
Material	Brita 1	(mm)	Amostra 01
Natureza	Calcária	25,00	0,0
Procedência	Ical	19,00	6,7
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	12,50	73,1
Utilização	Argam/Concr.	9,60	95,9
Impureza Orgânica	0	6,30	99,0
Argila em Torrões	0%	4,80	99,4
Material Pulverulento	0%	2,40	99,4
Massa Unitária	1,406 kg/dm ³	1,20	99,4
Massa Específica	2,659 kg/dm ³	0,60	99,4
		0,30	99,4
		0,15	99,4
Módulo de Finura	6,99	fundo	100

Diante de alterações apresentadas pelo novo rejeito após as operações de jigue, novos ensaios de caracterização ambiental foram executados no Laboratório de Resíduos Sólidos do CETEC (Centro Tecnológico de Minas Gerais) (TAB.6; TAB.7).

Tabela 6 – Resultado dos ensaios de solubilização da amostra e respectivos limites

Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)	Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)
Prata	< 0,01	0,05	Sódio	0,439	200,0
Alumínio	< 0,10	0,2	Zinco	< 0,02	5,0
Bário	0,0124	0,7	Mercúrio	<0,20 (µg/l)	0,001
Cromo	< 0,04	0,05	Selênio	<0,0005	0,01
Cobre	< 0,004	2,0	Arsênio	<0,0003	0,01
Ferro	< 0,30	0,3	Chumbo	<0,005	0,01
Manganês	0,264	0,1	Cádmio	<0,0005	0,005

Em virtude dos valores apresentados pelo manganês, foi conduzida contraprova no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Engenharia Química da Escola de Engenharia da UFMG, tendo sido obtido o resultado de <0,01 µg/g (TAB.7).

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de lixiviação da amostra e respectivos limites

Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)	Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)
Prata	< 0,01	5,0	Cádmio	<0,0005	0,5
Bário	0,0321	70,0	Chumbo	<0,005	1,0
Cromo	< 0,04	5,0	Mercúrio	<0,20 (µg/l)	0,1
Arsênio	<0,0003	1,0	Selênio	<0,0005	1,0

Quanto à reatividade potencial álcali-agregado do rejeito, a análise considerou os parâmetros da norma ABNT NBR 9774, atualmente fora de vigência, mas que registrou para o rejeito sua condição de *inócuo*, apresentando para a sílica dissolvida (milimoles/litro) o valor de 3 e para a redução de alcalinidade (milimoles/litro) o valor de 500. No ensaio de durabilidade do agregado, segundo o método DNER 8994, o rejeito apresentou bom desempenho, tendo sido registrada perda total corrigida de 7,1%, bem inferior ao limite da Norma, estabelecido em 12%.

A Figura 2 apresenta a difratometria de raios-x em fração representativa do rejeito.

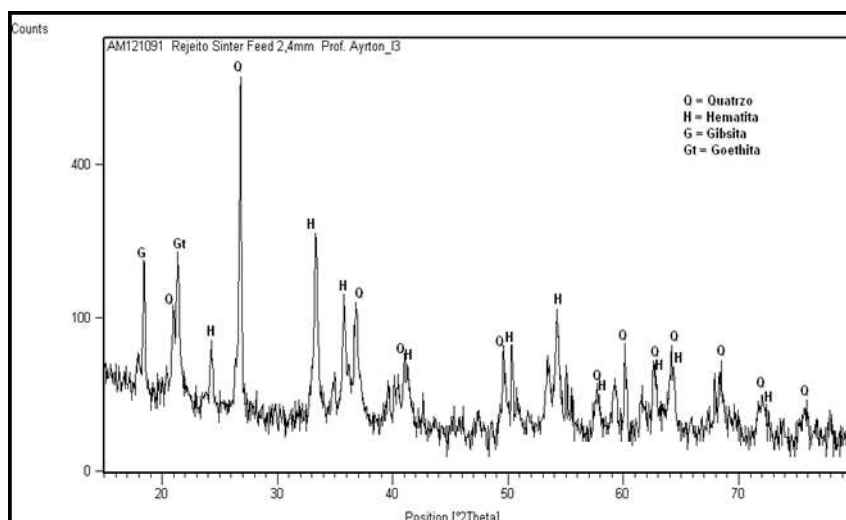


Figura 2 – Difratoograma da amostra pulverizada do rejeito

Fonte: Dados de pesquisa.

Na Figura 3 é apresentado o difratograma da amostra pulverizada da areia normal do IPT, sendo destacados os elementos mais significativos.

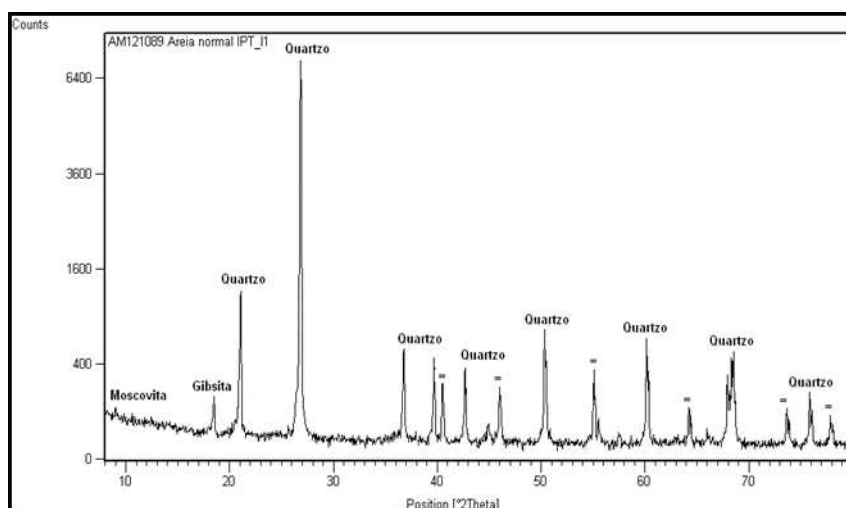


Figura 3 – Difratoograma da amostra pulverizada da areia normal do IPT

Fonte: Dados de pesquisa.

Quanto à área superficial específica (adsorção gasosa) e porosimetria (condensação gasosa) do rejeito e da areia normal do IPT, foram preparadas, respectivamente, as amostras hm20508 e hm9308, que apresentaram os seguintes resultados: área superficial específica de $8,372\text{m}^2/\text{g}$ e o maior volume de poros se encontrou na dimensão de $36,817\text{Å}$, com pequenas porções acima dos 200Å , demonstrando ser um material com características maiores de mesoporos do que de macroporos (classificação IUPAC). O volume total de poros foi de $0,0149\text{cm}^3/\text{g}$, com diâmetro médio dos poros de $71,41\text{Å}$, sob o limite de detecção máximo deste ensaio de $1322,8\text{Å}$, a uma relação de pressão (P/Po) de $0,985265$.

Quanto à técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV), procedeu-se análise microestrutural por meio de imagens de uma amostra determinada. Sequencialmente à obtenção de imagens, através do dispositivo de microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV, foram obtidas informações químicas da amostra em estudo.

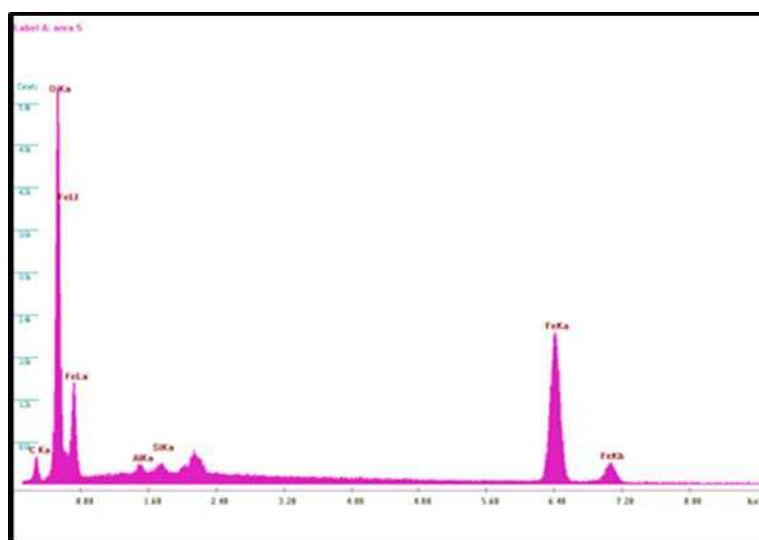
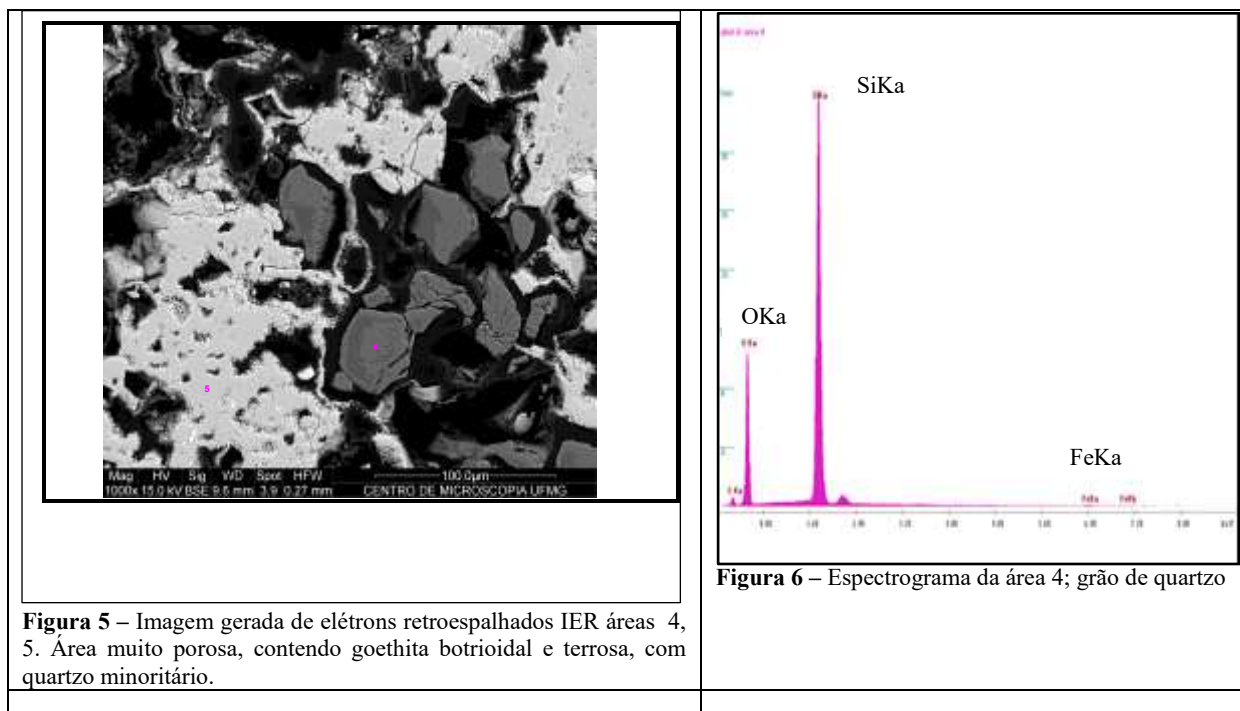
Foi preparada uma seção polida montada, em resina, de uma amostra do rejeito em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análise microestrutural por meio de imagens, com apoio da microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS) (Fig.4).

OBS.: Em todos os espectrogramas seguintes, onde necessário, foram destacados os picos mais significativos, face a redução das imagens.



Figura 4 – Seção polida de amostra do rejeito de *sinter feed*

As Figuras 5, 6 e 7 correspondem a algumas imagens geradas de elétrons retroespalhados (IER-BSE - *backscattering electrons*), que apresentam um contraste mais intenso devido não apenas à densidade, mas também ao nº atômico dos elementos, imagens adequadas ao conhecimento da topografia/morfologia dos componentes da amostra, uma vez que amplia aspectos de seu relevo, além de propiciar informações sobre a diferença composicional do material.



Na Figura 8 são apresentadas algumas imagens sequenciadas (com destaques) que propiciam um conhecimento mais ampliado de alguma das especificidades morfológicas do material. Um dos minerais mais abundantes no rejeito de *sinter feed* é a goethita, constituída por óxido de ferro hidroxilado que ocorre associada ao quartzo, podendo apresentar inclusões de hematita, gibsita ou caulinita.

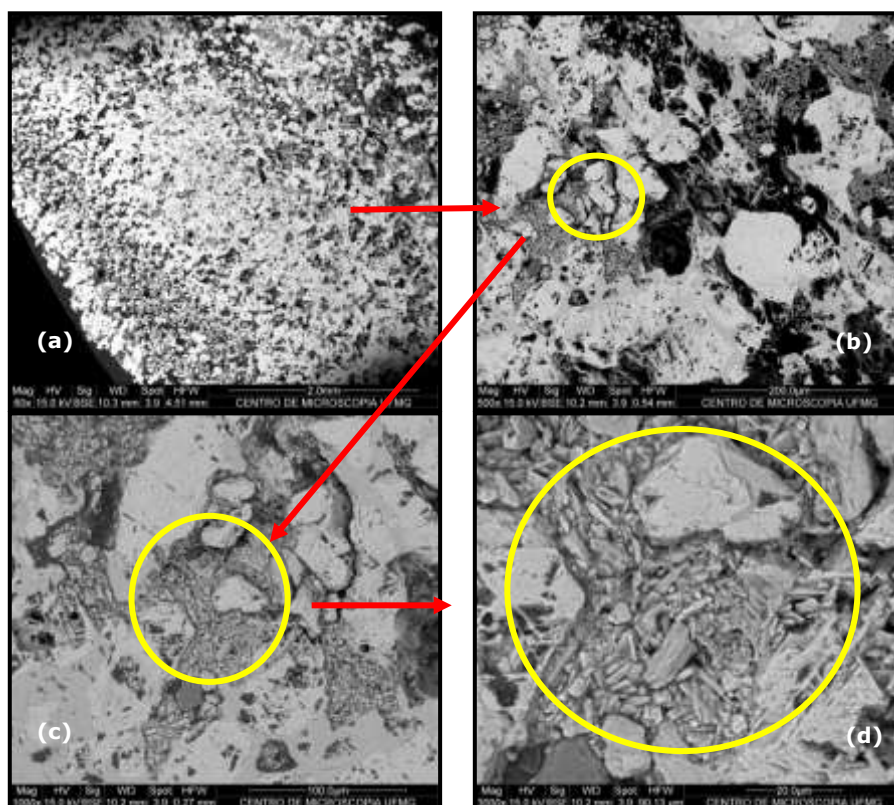


Figura 8 – Aspectos morfológicos do material. IER. (a) partícula muito porosa composta de hematita e goethita; (b), (c), (d) detalhe com área microporosa composta por minerais de ferro

A goethita apresenta clivagem, estrias e formas fibrosas, maciças, radiais, estalactíticas, tem dureza de 5–5,5 na escala Mohs e densidade relativa que varia de 3,3 a 4,3. Observa-se também, em função de intemperismo de minerais de ferro, a ocorrência da goethita terrosa de cor marrom-alaranjada ou ocre. Esta apresenta dureza de 4–5,5 e densidade relativa que varia de 2,7 a 4,3, considerável volume de poros e em consequência mais friável que a goethita compacta, de acordo com Santos e Brandão (2003) e Santos, Brandão e Sampaio (2005).

Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas informações sobre os cimentos utilizados na pesquisa. São curvas de Abrams fornecidas pelos fabricantes, a partir das quais foram definidos os parâmetros de dosagem dos concretos, resistência aos 28 dias (f_{c28}) e o necessário fator água-cimento (a/c).

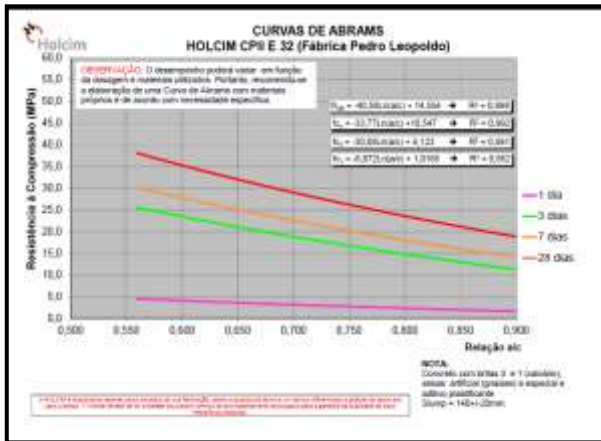


Figura 9 – Curva de Abrams cimento Holcim CP II – E 32

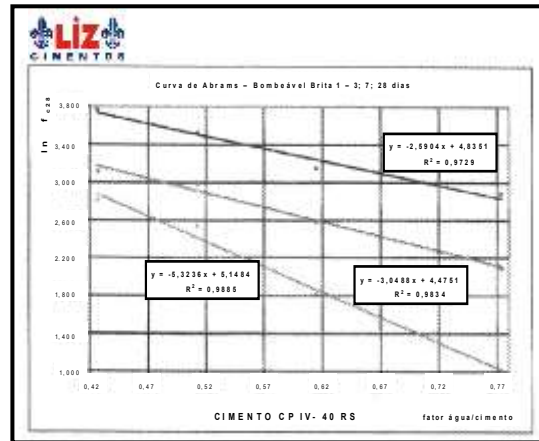


Figura 10 – Curva de Abrams cimento Liz CP IV 40 RS Super

Finalizada a fase de caracterização dos materiais e suas respectivas análises, seguem-se os ensaios comparativos da pesquisa, cumprindo o estabelecido nos objetivos.

As Figuras 11 e 12 ilustram a fase de preparo das granulometrias iguais do rejeito e areia padrão do IPT utilizadas nos ensaios comparativos das argamassas.



Figura 11 – Imagem da granulometria do rejeito para estabelecimento do percentual das respectivas frações



Figura 12 – Imagem das frações da areia normal para montagem de granulometria idêntica à do rejeito

Como critério para a quantificação dos pesos iniciais dos materiais nessas argamassas foi utilizada uma adaptação dos princípios da norma NBR 7221 no tocante ao seu proporcionamento e da água (*traço unitário em peso = 1:4, com fator água/cimento = 0,60*). Com os materiais assim preparados, foram processadas as duas argamassas em argamassadeira elétrica, com os seguintes traços, constituindo o **1º lote das argamassas:**

Argamassa de referência com areia normal do IPT:

- Areia normal do IPT: 9.367g = 5,818 litros
- Cimento CP II E - 32: 1.919g = 1,480 litros
- Água: fator a/c = 0,60

Argamassa com o rejeito de *sinter feed* em estudo:

- Rejeito de *sinter feed*9.600g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32.....1.919g = 1,480 litros
- Água.....fator a/c = 0,60

A primeira argamassa preparada foi a produzida com a areia normal do IPT, que apresentou boa plasticidade e com a qual foram moldados corpos de prova de \varnothing 5 x 10 cm para rompimento à compressão axial simples aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade. A segunda argamassa preparada foi produzida com o rejeito em estudo, recebendo o mesmo tratamento da argamassa anterior.

Depois de 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desformados e conduzidos à câmara úmida por um período de 7 dias, de lá retirados e continuada sua cura em atmosfera natural no ambiente interno do laboratório, protegidos contra o sol, correntes de vento e outros condicionantes/agentes indesejados. Desse 1º lote de argamassas foram moldados os corpos de prova \varnothing 5x10 cm para o rompimento à compressão simples aos 3, 7, 14 e 28 dias.

Neste ponto uma sensível diferença foi observada. Enquanto a argamassa com a areia normal do IPT apresentou boa plasticidade, boa moldabilidade, propiciando corpos de prova de aspecto normal e superfície lisa, regular, a argamassa produzida com o rejeito de *sinter feed*, já em sua mistura, absorveu de forma acelerada a água adicionada, proporcionando reduzidas plasticidade e moldabilidade e, ao contrário da primeira, gerou corpos de prova de superfície irregular, não lisa, apresentando muitos orifícios. A Figura 13 ilustra este registro.



Figura 13 – Corpos de prova \varnothing 5x10 cm do 1º lote de argamassas

Nota: argamassa com areia normal do IPT (esq.); argamassa com rejeito (dir.)

Assim, com os mesmos materiais e em idênticas condições, foram confeccionados novos traços de argamassas, porém iniciando-se as misturas pela argamassa que continha o rejeito e fornecendo-lhes água até que atingissem a condição requerida. Uma vez obtida essa condição desejada, o mesmo procedimento foi conduzido com a argamassa contendo a areia normal do IPT e avaliadas as respectivas consequências.

comparativo de microscopia eletrônica (MEV). A Tabela 8 apresenta os valores dos ensaios simples de resistência à compressão obtidos nas duas argamassas (dois lotes executados).

Tabela 8 – Comparativo da resistência à compressão das argamassas (Mpa) CP II-E32

COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS (MPa) - CP II E - 32									
LOTES		1º LOTE ARGAMASSA (a/c=0,60)				2º LOTE ARGAMASSA (a/c=0,80)			
ARGAMASSAS	IDADES	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CIMENTO E AREIA NORMAL (na granulometria do rejeito)	cp 1	17,02	19,23	29,72	36,88	9,25	16,68	18,69	21,61
	cp 2	19,46	24,26	22,11	27,01	11,17	15,96	21,63	23,30
	cp3	13,15	18,00	26,90	32,75	9,82	13,11	17,41	19,17
	cp4	15,40	21,71	31,42	38,37	12,18	14,75	16,30	24,78
	média	16,26	20,80	27,54	33,75	10,61	15,13	18,51	22,22
CIMENTO E REJEITO	cp 1	12,17	15,82	16,62	19,77	10,18	13,30	16,03	19,95
	cp 2	9,76	13,40	19,46	18,75	9,55	14,58	16,17	21,12
	cp3	10,21	13,01	15,85	19,52	11,53	16,73	17,40	19,35
	cp4	9,44	12,82	18,66	17,31	13,13	17,01	18,20	20,77
	média	10,40	13,76	17,65	18,84	11,10	15,41	16,95	20,30

A partir da Tabela 8 foram desenvolvidos também testes variados de consistência das argamassas produzidas, com o objetivo de verificar seus comportamentos reológicos de forma a estabelecer procedimentos a ser empregados na fase dos ensaios em concreto. Definiu-se, ao final, que deveria ser utilizado o aditivo plastificante polifuncional Mastermix-DF40 e que a adição do rejeito, por sua porosidade, deveria ocorrer por último, quando já obtida uma mistura molhada, mais coloidal.

Do total de argamassas que integraram a pesquisa, foram separados 2 corpos de prova de $\varnothing 5 \times 10$ cm, um de cada tipo de agregado do 2º lote de argamassas, com idade superior aos 28 dias, os quais apresentaram um aspecto e morfologia mais regulares. Posteriormente foram serrados transversalmente para um preparo final, tendo em vista as dimensões da mesa porta-amostra do MEV.

As amostras preparadas foram submetidas às análises de microscopia de varredura de elétrons (MEV) e aos ensaios de espectrometria por dispersão de energia (EDS) nas instalações do Centro de Microscopia da UFMG. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura FEG - 200 FEI acoplado com um microanalisador EDS, o espectrômetro de raios-X por dispersão de energia. As Figuras 15 a 17 demonstram micrografias e espectrogramas autoexplicativos. Segue a legenda dos principais compostos e elementos presentes nas imagens das micrografias apresentadas: **P** = portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; **C** = calcita – CaCO_3 ; **E** = calcita – CaCO_3 ; **CSH** = silicatos de cálcio hidratados – C-S-H ou CSH; **Q** = quartzo – SiO_2 ; **FE** = óxidos de ferro.

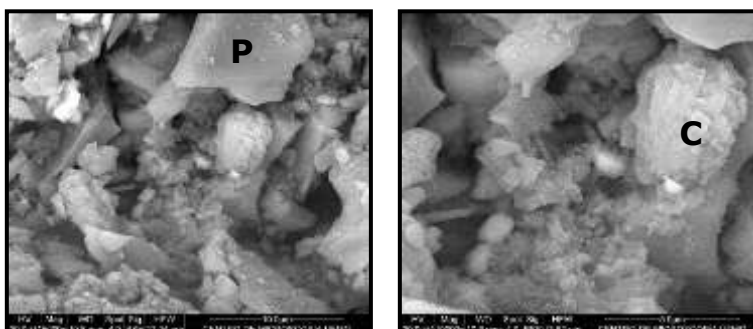


Figura 15 – Micrografias em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais euédricos, em argamassa com a areia normal do IPT; IER

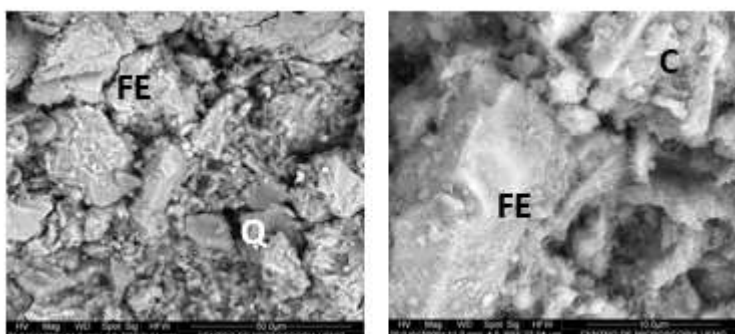


Figura 16 – Micrografia em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais subédricos; IER

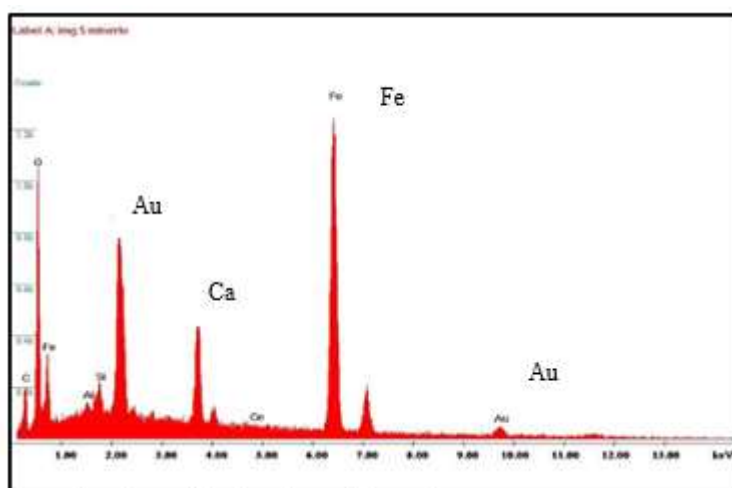


Figura 17 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior Nota: Destaca-se a sílica do quartzo, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e o ferro devido à goethita. O ouro é devido ao preparo de metalização da amostra.

Fonte: Dados de pesquisa.

Para os ensaios comparativos com os concretos estabeleceu-se como parâmetro da análise um traço que apresentasse características de concreto plástico, com uma medida de *slump* que propiciasse

inclusive o seu lançamento bombeado (14 +/- 2 cm), atendendo uma tensão de dosagem aos 28 dias de valor usual utilizado pelo mercado, no intervalo de 30 a 35MPa (considerado 32,5MPa). Este valor constitui, aproximadamente, cerca de 90% das demandas de concreto pré-misturado, classe C25 a C30, informação obtida em consulta oficiosa formulada a algumas concreteiras e com a mera finalidade de se estabelecer um parâmetro com alguma procedência.

Para a definição do fator água/cimento que atendesse as premissas anteriores foi utilizada a curva de Abrams do CP II - E 32 fornecida pelo respectivo fabricante.

Utilizando-se os critérios de dosagem do INT os dados básicos dos concretos ficaram assim definidos: (1) Com o cimento CP II - E 32: $x = 0,63$; $A\% = 10,5$; $m = 5$; Argamassa no traço $\geq 50\%$; (2) Com o cimento CP IV - 40 RS: $x = 0,63$; $A\% = 10,5$; $m = 5$; Argamassa no traço $\geq 50\%$. Com o objetivo também de ampliar as observações foram dosados concretos respeitando o mesmo parâmetro de resistência ($f_{c28} = 32,5\text{MPa}$) para o cimento CP IV - 40 RS, com base em sua curva de Abrams específica: com o cimento CP IV-40 RS: $x = 0,52$; $A\% = 10,5$; $m = 4$; Argamassa no traço $\geq 50\%$. A proporção dos agregados nos respectivos traços foi obtida por tentativas estabelecidas sobre um gráfico de mesclas calculadas em planilhas eletrônicas, tendo como referência a Curva II de Bolomey para agregados de $\phi_{\text{max}} 25\text{mm}$. Trabalhando-se sobre a mescla granulométrica do concreto sem rejeito e buscando no mix areia/britas/rejeito, a proporção que melhor se encaixa na Curva II de Bolomey foi estabelecida como sendo: 21% de areia, 19% de brita 0, 30% de brita 1 e 30% de rejeito, obtendo-se um módulo de finura da mescla de 4,77, idêntica à do concreto sem rejeito.

E assim, finalmente, os traços dos concretos resultantes para os ensaios comparativos foram: (1) Concreto sem rejeito: TUP = 1: 2,1: 1,05: 1,85, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; $a/c = 0,63$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”; (2) Concreto com rejeito: TUP = 1: 1,05: 0,95: 1,50: 1,50, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; $a/c = 0,63$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

O emprego do aditivo teve o objetivo de reduzir a tensão superficial da água, dotando-a de maior capacidade de molhação face à maior área superficial do rejeito e no sentido de prevenir a ocorrência verificada na fase dos ensaios desenvolvidos exclusivamente com argamassa.

Para os concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, com fator água/cimento = 0,52 os traços unitários em peso ficaram assim constituídos: (1) Concreto sem rejeito: TUP = 1: 1,68: 0,84: 1,48, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; $a/c = 0,52$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”; (2) Concreto com rejeito: TUP = 1: 0,84: 0,76: 1,20:

1,20, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; $a/c = 0,52$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

Quanto aos estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator $a/c = 0,63$, ocorreu o seguinte: para as análises comparativas das zonas de transição (interface pasta/agregado) foram escolhidos aleatoriamente, dentre os concretos produzidos e descritos anteriormente, com os quais foram preparadas as amostras a serem levadas ao microscópio.

A Figura 18 ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP II - E 32, **sem o rejeito de *sinter feed***.

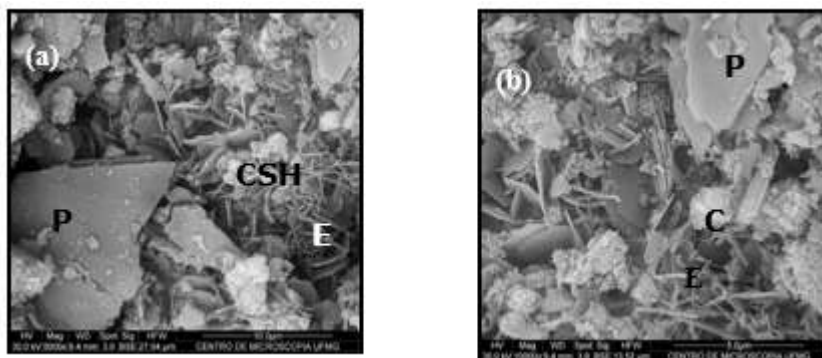


Figura 18 – Micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto sem o rejeito de *sinter feed*, destacando detalhes da microestrutura na zona de transição, formação de cristais euédricos; a e b = IER

A Figura 19 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto, apresentando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado.

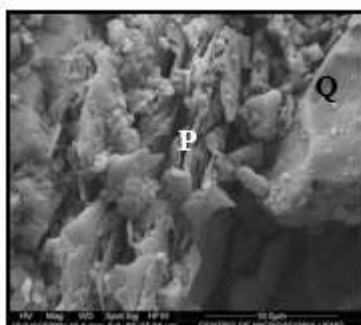


Figura 19 – Micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior, destacando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado; IES

Pode ser observada na Figura 18 uma microestrutura de concreto padrão bastante compacta, com presença predominante de cristais muito pequenos, principalmente de portlandita, com sua morfologia tipicamente lamelar.

A Figura 20 mostra espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 19, destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita.

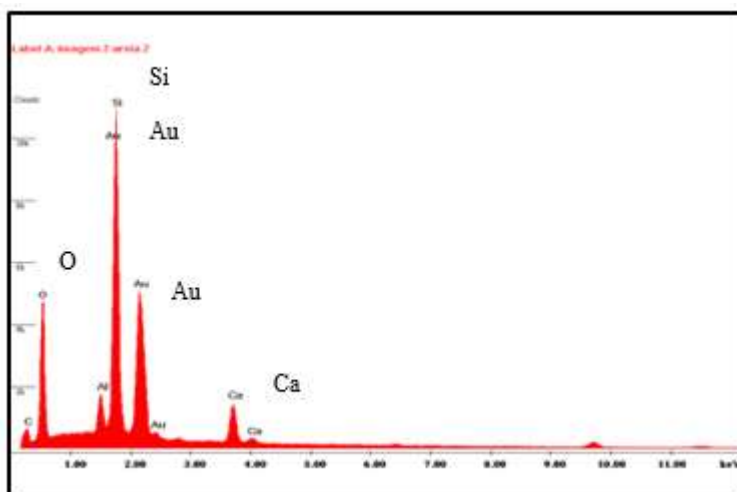


Figura 20 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (d) destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita

A Figura 21 apresenta micrografia de regiões de interface obtidas em amostras do concreto produzidos com o cimento CP II - E 32 com o rejeito de sinter feed.

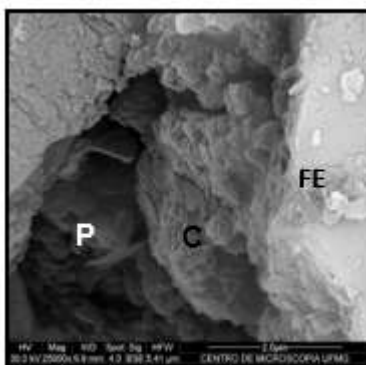


Figura 21 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto, com rejeito de *sínter feed*, destacando em (d) detalhes da microestrutura na interface; IER

A Figura 22 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia acima.

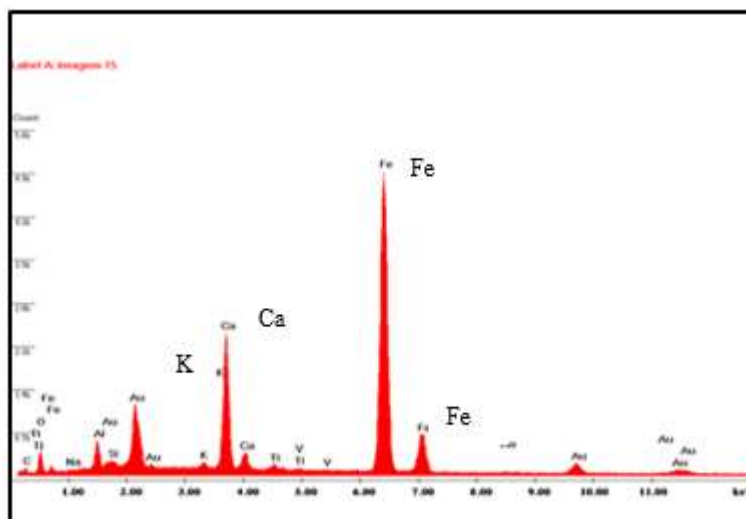


Figura 22 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior, destacando elemento de cristalização do cimento

A Figura 23 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto.

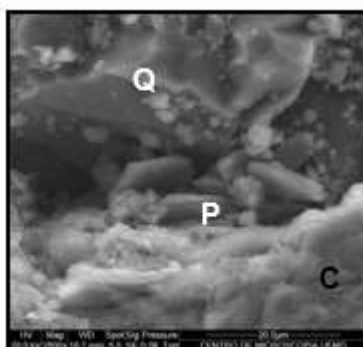


Figura 23 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto com rejeito de *sinter feed*; detalhes da microestrutura; IES

Na Figura 23 pode-se observar CSH fraturado na interface com o agregado quartzoso com resquícios de portlandita/carbonato de cálcio.

A Figura 24 demonstra o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 23. A Figura 25 apresenta parte da sequência de micrografias anteriores, ressaltando-se a presença de CSH e grãos anédricos de calcita/portlandita.

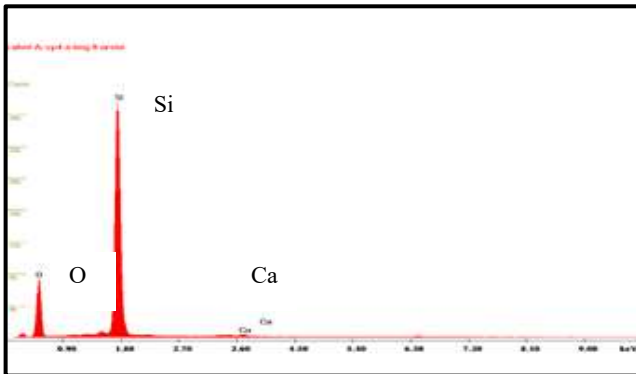


Figura 24 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

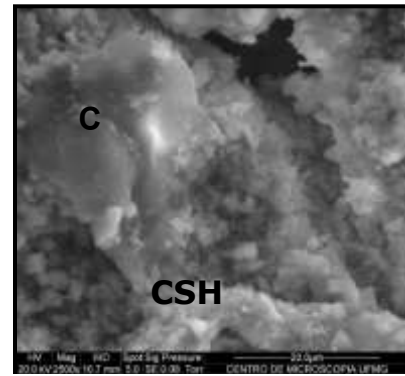


Figura 25 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto com rejeito de *sinter feed*, destacando detalhes da microestrutura; IES

A Figura 26 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior. Pode-se notar presença de CSH e grãos anédricos de calcita/portlandita.

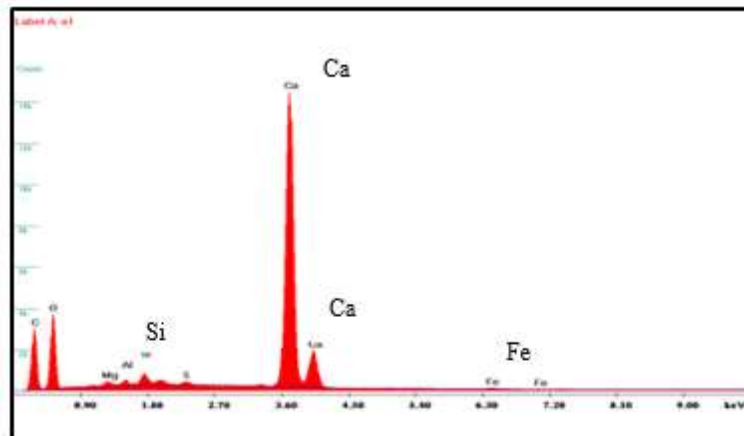


Figura 26 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

O conjunto de imagens seguintes (a,b) ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, **com o rejeito de *sinter feed*** (Fig. 27).

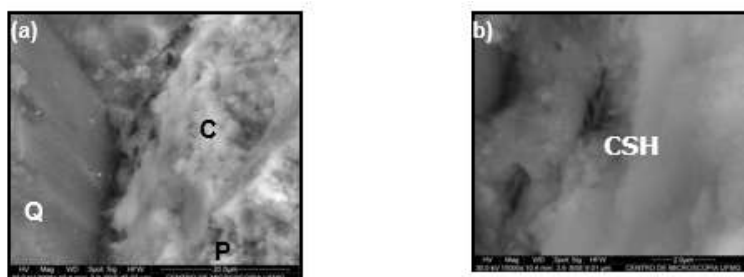


Figura 27 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto

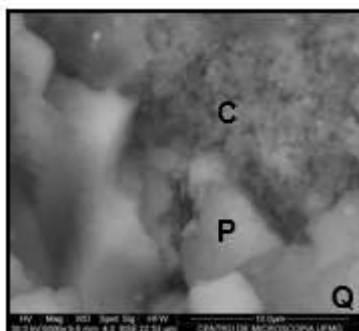


Figura 28 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER

A Figura 29 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

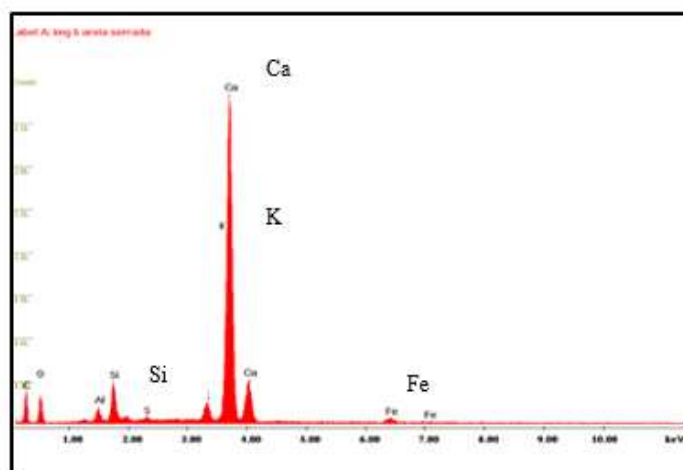


Figura 29 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

O conjunto de imagens seguintes (Fig. 30) (a,b) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS com o rejeito de *sinter feed*.

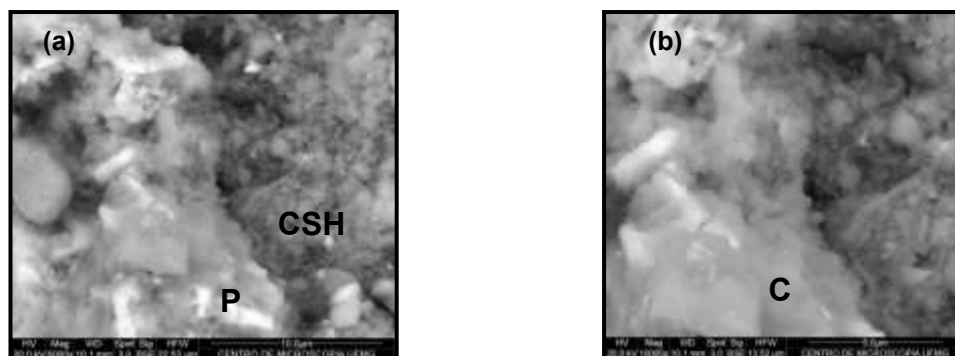


Figura 30 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (a) e (b) detalhes da microestrutura; IER

A Figura 31 a seguir integra a sequência anterior.

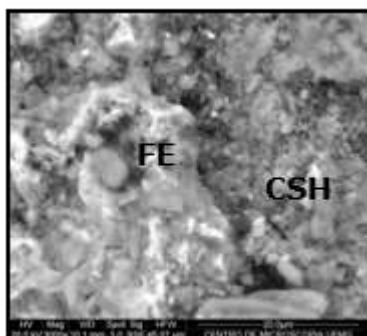


Figura 31 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER

A Figura 32 apresenta o espectrograma da Figura 31.

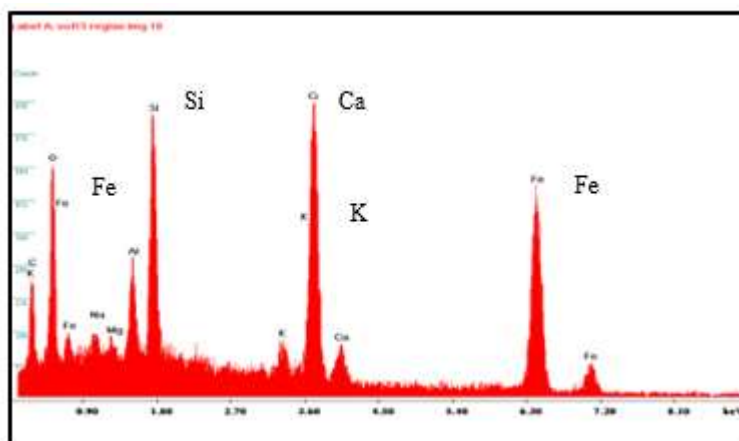


Figura 14 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

É possível observar que a falta de organização morfológica dos cristais na microestrutura é grande quando se tem a presença do cimento CP IV-40 RS. Possivelmente, isto se deve a sua composição específica e variada, pois é obtido a partir do uso de gesso, escória de alto-forno (ácida e/ou básica sendo granulada e/ou bruta) e clínquer.

Assim sendo, de forma resumida, foram observadas as seguintes tendências de cristalização, de morfologia e de tamanho de grãos: (1) Concreto sem rejeito, $a/c=0,63$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, com presença tímida nas zonas de interface agregado x pasta. Foram observados CSH e etringita, igualmente, de forma tímida e em tamanhos pequenos; (2) Concreto sem rejeito de *sinter feed*, $a/c=0,52$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho corrente usual quando localizado fora da zona de interface. Nas zonas

de interface observou-se um emaranhado de CSH, etringita e carbonato de cálcio um pouco mais refinado. O tamanho de pouquíssimos silicatos e monossulfatos observados é diminuto/pequeno; (3) Concreto com rejeito de *sinter feed*, $a/c=0,63$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, caracterizada por região de refinamento de grãos cristalizados e se comparada com a morfologia dos carbonatos de misturas sem rejeito, apresenta menores tamanhos. Em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, $a/c=0,52$; (4) Concreto com rejeito, $a/c=0,52$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho reduzido tal como aquela observada em concreto com rejeito, $a/c=0,63$. Igualmente, em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, $a/c=0,52$.

Como comentários adicionais, a literatura consultada faz referência aos seguintes comportamentos/tendências: (1) O fator a/c interfere nas características da zona de transição; (2) Maior fator a/c conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa; (3) Maior ϕ do agregado conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa; (4) Por conseguinte, em ambos os casos a densidade da ITZ é inferior em relação ao corpo da matriz (*bulk*), situações que foram identificadas na observação das imagens, o que, certamente, se deve também aos materiais utilizados nas misturas, com ênfase na sua mineralogia, finura, morfologia do grão, polaridade.

Há registro de nucleação e crescimento de carbonato de cálcio a partir dos finos do rejeito em zonas de transição. Observam-se cristais de CaCO_3 , morfologicamente modificados, apresentados mais arredondados. A presença da goethita contribui para a redução no tamanho dos cristais formados, sobretudo em zona de transição.

Comparativamente, pode-se perceber que a presença de cristais de minério gera uma microestrutura refinada de grãos mais finos, mantendo a morfologia típica de cada um dos cristais. A portlandita foi observada em todas as amostras, com morfologia típica e, comumente muito adensada nas zonas de transição, fato que, motivado pela idade, propiciou a precipitação de carbonatos de cálcio mais refinados.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Com relação às análises comparativas das performances dos concretos ensaiados, as Figuras 33 a 50 apresentam a variedade dos ensaios e seus resultados plotados graficamente:



Figura 33 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E – 32, a/c 0,63



Figura 34 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

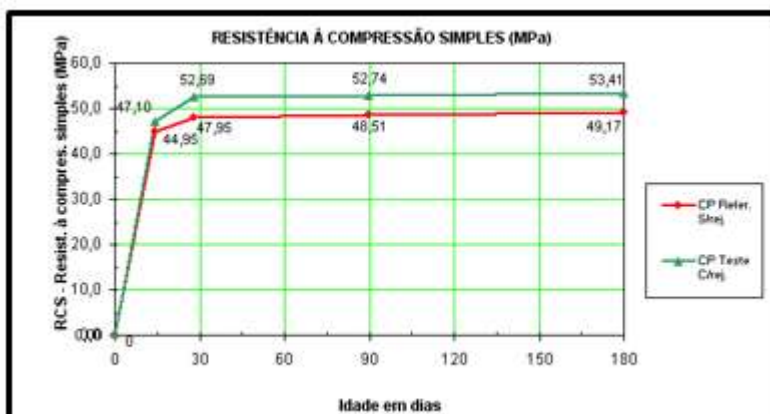


Figura 35 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

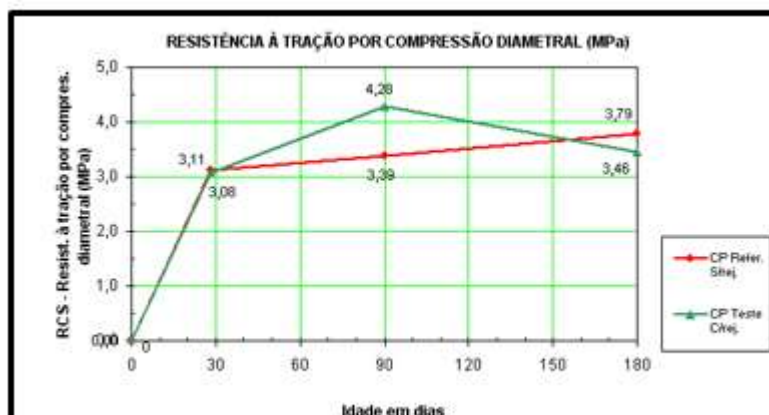


Figura 36 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63.



Figura 37 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

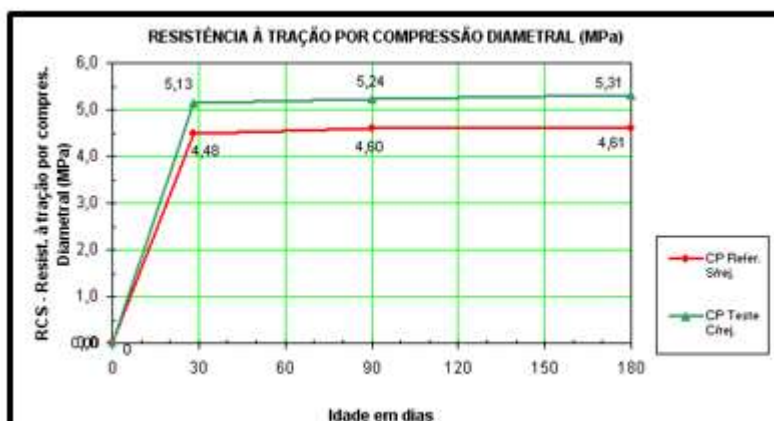


Figura 38 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

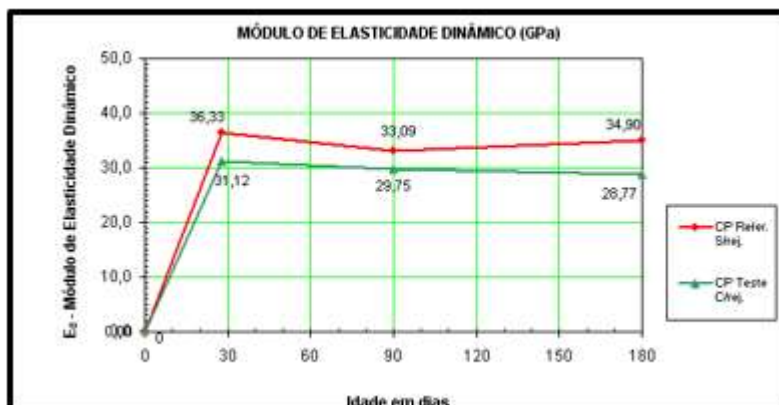


Figura 39 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63

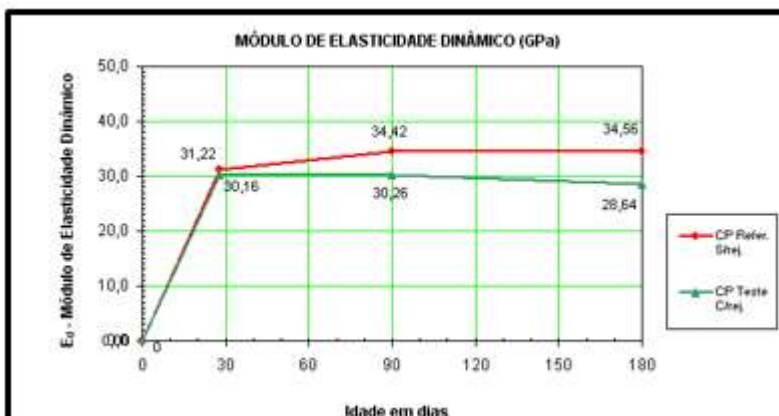


Figura 40 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

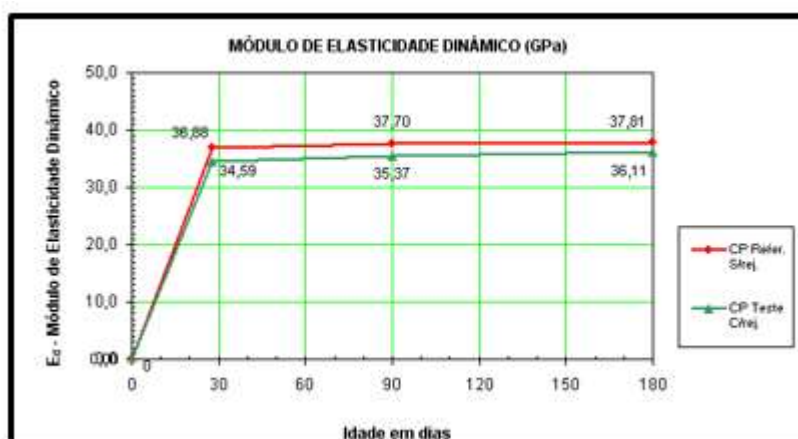


Figura 41 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

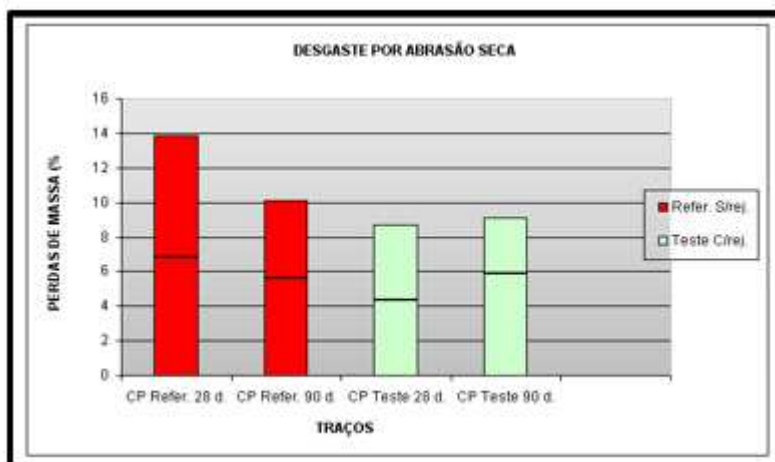


Figura 42 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de massa

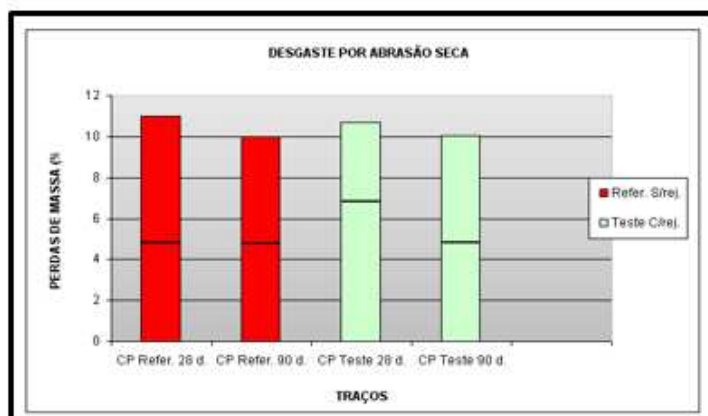


Figura 43 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de massa

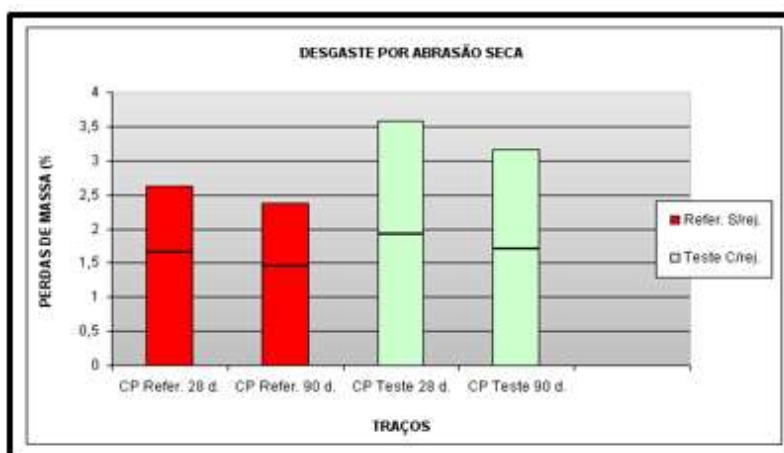


Figura 44 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 – Desgaste expresso em percentual de massa

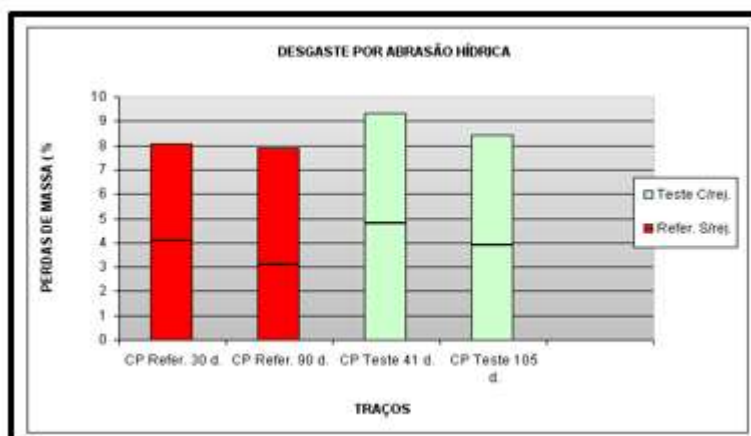


Figura 45 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

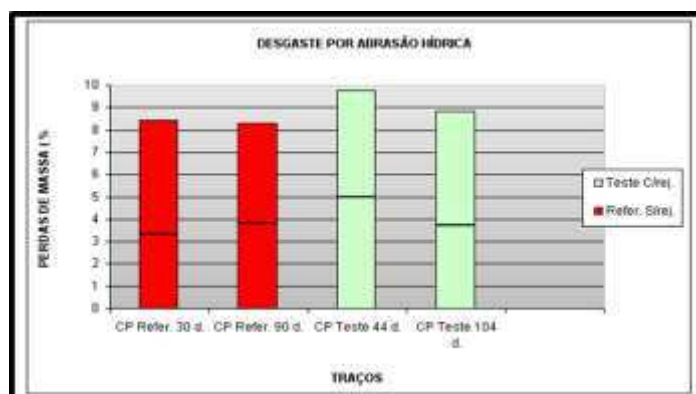


Figura 46 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II 40 RS, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

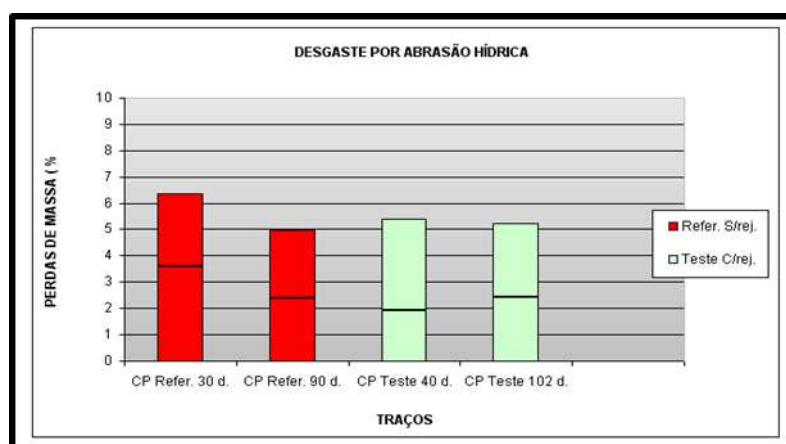


Figura 47 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

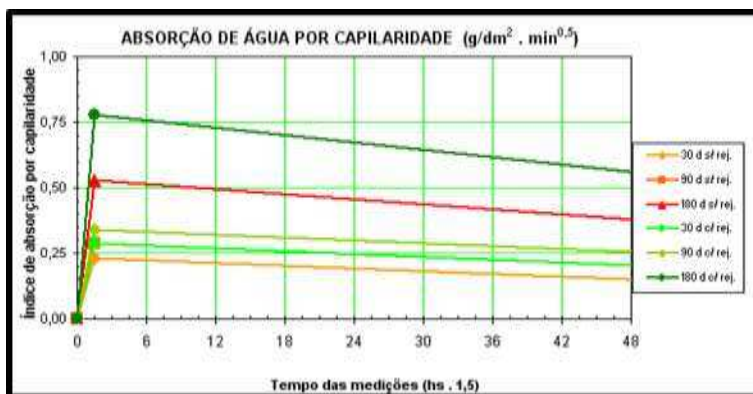


Figura 48 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63

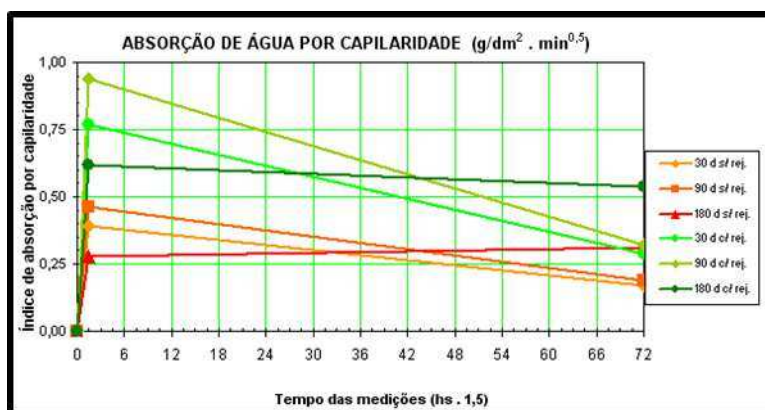


Figura 49 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63.

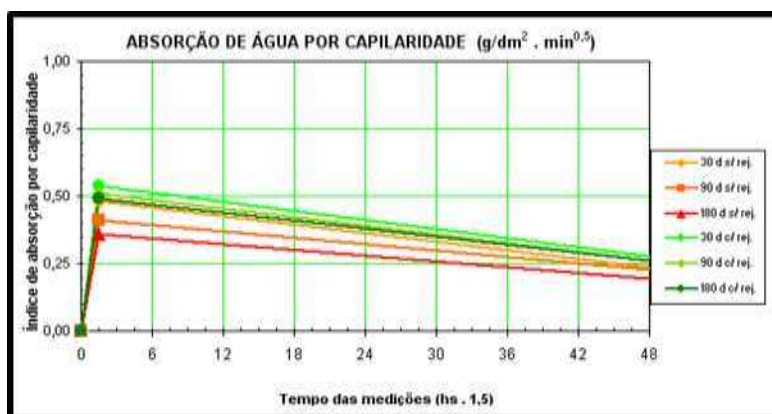


Figura 50 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

A tabela 9 foi montada a partir dos gráficos dos resultados anteriores de cada desempenho obtido nos respectivos ensaios. Apresenta uma visão dos desvios percentuais obtidos nos concretos em estudo

(com o rejeito) em relação aos respectivos concretos de referência (sem o rejeito), propiciando uma das performances verificadas em função do emprego do rejeito de *sinter feed* como adjuvante na redução de consumo das areias naturais em traços de concreto.

Tabela 9 – Percentuais de Desempenho em relação ao traço referência, ou seja, sem rejeito

Ensaio	Traço	Condição	Desempenho	Idades (dias)						
				14	28	30	40	90	100	180
Resistência Compressão	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = satisfatório (-) = insatisfatório	-27,5	-7			-7		-2,5
	CP 40 a/c 0,63			-6	-5			-7,5		-3,5
	CP 40 a/c 0,52			+5	+10			+9		+9
Resistência Tração	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = satisfatório (-) = insatisfatório		-1			+26		-9,5
	CP 40 a/c 0,63				-3			-1		-0,5
	CP 40 a/c 0,52				+14,5			+14		+15
Módulo Elasticidade	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = satisfatório (-) = insatisfatório		-14,5			-10		-17,5
	CP 40 a/c 0,63				-3,5			-12		-17
	CP 40 a/c 0,52				-6			-6		-4,5
Abrasão seca	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = insatisfatório (-) = satisfatório		-37			-9		
	CP 40 a/c 0,63				-3			+1		
	CP 40 a/c 0,52				+36			+33		
Abrasão hídrica	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = insatisfatório (-) = satisfatório				+15		+7	
	CP 40 a/c 0,63						+15		+6	
	CP 40 a/c 0,52						-15		+4,5	
Absorção Capilaridade	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	(+) = insatisfatório (-) = satisfatório			+26		+17		+47
	CP 40 a/c 0,63					+45		+31		+50
	CP 40 a/c 0,52					+97		+104		+121
						+70		+68		+74
						+12		+24	0	+36
						+27				+27

Nos ensaios físicos, são relevantes as observações detectadas na microestrutura da matriz cimentícia dos traços, constantes da descrição das Figuras 15 e 16.

De forma análoga, nos ensaios de absorção hídrica, há que se considerar a porosidade elevada do rejeito e o fato não raro de se apresentar ainda botrioidal e terrosa, constantes da descrição das Figuras 5 e 8.

Contudo, uma análise individualizada dos desvios apresentados induzirá às condutas, também específicas de dosagem dos concretos, com vistas a prevenir performances indesejáveis.

5. CONCLUSÕES

Os objetivos foram alcançados em virtude da especificidade e da amplitude da pesquisa desenvolvida. Os aspectos relativos à microestrutura das matrizes cimentícias analisadas, sua tipologia e morfologia, bem como os resultados dos ensaios realizados, foram suficientes para serem colimados nas seguintes observações:

- A microestrutura da interface pasta/agregado da argamassa e dos concretos estudados, particularmente, aquelas nas quais se registra o emprego do rejeito de *sinter feed*, apresenta as fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, apresentando certo atrofiamento em sua morfologia clássica, diferente da exuberância observada na vasta bibliografia e trabalhos conhecidos.
- O emprego do rejeito de *sinter feed* como agregado nos concretos de consistência plástica, com vistas à melhoria de seu desempenho na abrasão hídrica, carece de avaliação mais ampla, inclusive, quanto à caracterização específica e escolha do rejeito de *sinter feed* empregado (incidência das variedades conhecidas do mineral goethita).
- Técnicas, procedimentos e experimentação de dosagem dos concretos podem compensar fragilidades do agregado rejeito de *sinter feed*, devido as ocorrências da goethita terrosa e sua porosidade.
- É viável o emprego do rejeito de *sinter feed* como coadjuvante integrante das mesclas dos agregados na produção de concretos, em circunstâncias e finalidades específicas, não apenas em função dos desempenhos observados, mas, principalmente, pelas conveniências ecológicas e de sustentabilidade que o seu emprego propicia.
- O emprego do rejeito de *sinter feed* em estruturas convencionais de edificações (pilares, vigas e lajes), ou ainda alvenarias sobre estas estruturas, pela própria característica de peso do agregado, pode não se mostrar interessante uma vez que demandaria acréscimos no dimensionamento estrutural das mesmas. Uma avaliação que envolva aspectos de custo envolvidos tornar-se-á pertinente.
- Como conclusão final deste trabalho fica viabilizado, com o devido cuidado, o uso e emprego do rejeito de *sinter feed* na produção de concretos convencionais (f_{ck} até 30MPa).

REFERÊNCIAS

- [1] BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p.185-207.
- [2] BRASIL. Lei 12.305. 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, 03 de agosto de 2010.
- [3] COSTA, A. V. Utilização do Rejeito de Sinter Feed como Agregado na Produção de Peças de Concreto para Pavimentação. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil] – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [4] COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.7, n.2. p.228-259, 2014.
- [5] ASTM C 1138 M. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. Disponível em: www.astm.org. Acesso em: 30ago.2022.
- [6] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 1987
- [7] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ORCID

Ayrton Vianna Costa <https://orcid.org/0000-0002-2316-9795>

Paulo Roberto Gomes Brandão <https://orcid.org/0000-0002-5893-1073>