

Avaliação de formulações de concreto convencional empregando distintas areias provenientes da exploração de minério de ferro

Evaluation of conventional concrete formulations using different sands from iron ore mining

Mariana Menezes (1); Hígor Moura (2); Antonio Marcos (3); Thiago Praia (4); Thailli Conte (5); Pedro P.S. Cavalcanti (6); Mauro Yamamoto (7)

(1) *Mestra em Engenharia Civil, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

(2) *Engenheiro de Produção, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

(3) *Ensino Fundamental, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

(4) *Ensino Médio, First RH*

(5) *Mestra em Geologia, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

(6) *Mestre em Engenharia de Minas, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

(7) *Geólogo, Centro Tecnológico de Soluções Sustentáveis - New Steel*

Rua Vinte e Um, 209, Quadra 15-B, Lote 1 e 2, Mantiquira, Duque de Caxias, RJ, CEP: 25250-611

Resumo

O uso em concreto da areia proveniente da exploração de minério de ferro pode contribuir para aumentar a circularidade da economia brasileira. A produção de agregados gera um impacto ambiental relevante por extrair recursos naturais, enquanto a exploração de minério de ferro gera uma grande quantidade de areia, a qual apresenta características propícias para a produção de concreto. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso de distintas areias da mineração em concreto e o impacto em suas propriedades. Neste contexto, o concreto convencional emerge como um veículo de desenvolvimento de formulações, as quais, posteriormente, podem ser adaptadas para cada aplicação específica. Com isso, realizou-se a análise de formulações em termos de proporção de areia da mineração dentre os agregados miúdos, teor de argamassa, aditivo e tipo da areia da mineração. O método contemplou a caracterização dos materiais, estudo de empacotamento e a dosagem de 50 concretos. Na análise, as areias da mineração não apresentaram nenhuma característica deletéria ao concreto. Quanto ao concreto, no estado fresco, as formulações com até 80% da areia da mineração dentre os agregados miúdos mantiveram ou reduziram a demanda de água do concreto em comparação ao concreto de referência. Além disso, no estado endurecido, observou-se estabilização ou aumento de até 20% da resistência à compressão ao utilizar as areias da mineração. Assim, concluiu-se que as areias da mineração avaliadas podem ser empregadas como agregado em concreto, sem prejuízo em sua eficiência.

Palavra-Chave: Areia da mineração, minério de ferro, concreto convencional, economia circular

Abstract

The use in concrete of the sand from the exploitation of iron ore can contribute to increase the circularity of the Brazilian economy. The production of aggregates is responsible for a relevant environmental, while the exploitation of iron ore generates a large amount of sand, which has favorable characteristics to make concrete. Thus, the objective of this work is to evaluate the use of different mining sands on concrete and the impact on its properties. In this context, conventional concrete emerges as a vehicle for the formulation development, which, afterwards, can be adapted for each specific application. Thereby, the analysis of concrete formulation was carried out in terms of mining sand proportion among the fine aggregates, mortar content, admixture type and mining sand type. The method included the characterization of the materials and concrete batches. In the analysis, the mining sand didn't present any deleterious component. In the fresh state, the formulation of concretes with up to 80% content of mining sand on the fine aggregates maintains or reduces the water demand of the concrete compared to the reference concrete. In addition, in the hardened state, a stabilization or a 20% increase of the compressive strength is observed when using the mining sands. Thus, it is concluded that the evaluated mining sands can be used as aggregate in concrete without loss in efficiency.

Keywords: Mining sand, iron ore, conventional concrete, circular economy

1 Introdução

No Brasil, são consumidas anualmente aproximadamente 500 milhões de toneladas de agregados, as quais são majoritariamente empregadas em materiais cimentícios aplicados na construção civil (ANEPAC, 2020). A produção destes agregados gera um impacto ambiental relevante por extrair recursos naturais em uma velocidade maior que estes conseguem se renovar.

De outro lado, apenas no estado de Minas Gerais, são gerados 290 milhões de toneladas de rejeito da atividade de mineração (FEAM, 2018). Neste âmbito, a exploração de minério de ferro gera uma grande quantidade de rejeito – da ordem de 0,4 toneladas para cada tonelada de concentrado de minério de ferro –, a qual tende ainda a aumentar com o empobrecimento das jazidas (IPT, 2016). O rejeito arenoso da exploração deste minério apresenta características propícias para a produção de concreto e para outras aplicações e, por isso, deve ser tomado como uma areia proveniente da exploração.

Estas duas indústrias – a mineração de agregados e de minério de ferro – estão entre as responsáveis pelos maiores fluxos de materiais do estado de Minas Gerais e sua união tem o potencial de mudar o balanço de massa do estado (ANEPAC, 2020; FEAM, 2018). Assim, o uso do material como areia em concreto contribui para aumentar a circularidade da economia brasileira, reduzindo tanto a exploração de recursos naturais, quanto a disposição dos rejeitos. Além disso, este desenvolvimento traz oportunidades de novos negócios e de melhoria da eficiência da cadeia de produção da construção civil.

Para utilizar a areia da mineração em concreto, é importante compreender sua natureza e, assim, usar suas características a fim de obter concretos eficientes. Uma forma simples de avaliar essa eficiência é através da intensidade de ligante (IL), que consiste no consumo de ligantes (por exemplo, cimento e escória) por unidade de resistência à compressão em 28 dias. Para além da correlação com o custo, este índice ainda oferece uma análise da ecoeficiência, pois as emissões de gases de efeito estufa do concreto são majoritariamente provenientes do cimento (DAMINELI, 2013). Ressalta-se, assim, que o uso da areia da mineração não deve aumentar a intensidade de ligantes.

No desenvolvimento de um novo agregado, é importante trazer luz às principais características deste material que terão impacto no desempenho do concreto, especialmente, em seu estado fresco. Para isso, vale se pautar no modelo bifásico do concreto (matriz e pasta cimentícia), no qual a fluidez está relacionada a dois fatores: o volume da pasta cimentícia em excesso – além da quantidade necessária para preencher os vazios dos agregados – e a consistência da própria pasta (POWERS, 1968). Este volume de pasta em excesso gera uma distância entre as partículas grossas (os agregados), a qual pode ser calculada pelo modelo físico proposto por Pileggi (2001), o MPT (*Maximum Paste Thickness*). Neste modelo, as variáveis que influenciam a distância entre os agregados e, conseqüentemente, a fluidez do concreto são: a área superficial volumétrica, a qual depende da distribuição granulométrica dos agregados e contempla o fenômeno de molhagem dos grãos pela pasta; a fração volumétrica de sólidos, que está correlacionada com o volume de pasta; e, por fim, a porosidade do empacotamento do sistema, que depende basicamente da distribuição granulométrica, da morfologia dos grãos e do método de compactação (DE LARRARD, 1999). Desta maneira, ao avaliar um novo agregado, destaca-se a necessidade de observar a distribuição granulométrica, a

área superficial específica, a morfologia dos grãos e o seu empacotamento com os demais agregados empregados no concreto.

Os agregados utilizados atualmente na região de Belo Horizonte são oriundos de rochas calcáreas do Grupo Bambuí, Formação Sete Lagoas, na região de Pedro Leopoldo, e dos gnaisses do Complexo Belo Horizonte, na região de Contagem. Os calcários da unidade são predominantemente constituídos por calcita (ROMANO, 2014).

A areia da mineração contém majoritariamente grãos menores de 350 μ m, se revelando mais fina que os agregados empregados usualmente na região de Belo Horizonte. Entretanto, no estado de São Paulo, se utiliza uma areia fina – constituída de grãos menores que 500 μ m (MENEZES, 2020) –, que apresenta um alto valor agregado devido à sua contribuição ao desempenho do concreto. Assim, fundamenta-se neste precedente para o desenvolvimento deste trabalho.

O objetivo do trabalho consiste em avaliar a eficiência de formulações de concreto convencional para distintas proporções de areia da mineração dentre os agregados miúdos, teores de argamassa, tipos de aditivo e tipos de areia da mineração. Desta forma, visa-se contribuir com a comunidade técnica e científica do concreto no Brasil - mais especificamente, na região da grande Belo Horizonte - de maneira a formar uma base sólida e robusta, que sirva como referência para o tecnologista ao formular concretos utilizando esta areia proveniente da mineração.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

Nesta pesquisa, foram utilizados os agregados da região da Grande Belo Horizonte, incluindo agregados gnáissicos, calcáreos e quartzosos, assim como as três areias da mineração distintas, objetos deste estudo. É importante ressaltar que todos os ensaios de caracterização de agregados foram executados em triplicata. As características avaliadas dos materiais, assim como as técnicas empregadas, compreenderam:

- Distribuição granulométrica, realizada por peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Ainda, para as partículas menores que 75 μ m, foi utilizada a granulometria a laser, empregando o equipamento Malvern Mastersizer 3000;
- Massa específica dos agregados miúdos, executada por picnometria a água, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- Massa unitária compactada, conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Impurezas orgânicas, conforme NBR NM 49 (ABNT, 2001);
- Torrões de argila e materiais friáveis, conforme NBR 7218 (ABNT, 2010);
- Análise química das areias da mineração por fluorescência de raios X (FRX), perda por calcinação (PPC) a 1100°C;
- Análise mineralógica das areias da mineração, utilizando a lupa estereoscópica binocular Wild Heerbrugg e o microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM-1000, conforme norma NBR 7389-1 (ABNT, 2009). Para além destes ensaios, especificamente para a Areia da Mineração 1, foi feita a análise da composição mineralógica no equipamento QEMSCAN Quanta 650.
- Análise dos graus de esfericidade e arredondamento dos agregados, conforme determina a NBR ISO 13503-2, a partir da comparação visual com o gráfico de

Krumbien/Sloss de grãos aleatoriamente selecionados em cada faixa granulométrica (ABNT, 2011). Utilizou-se a metodologia da norma NBR ISO 13503-2 para propantes, devido a sua acurácia e ao resultado quantitativo de graus de esfericidade e arredondamento, variando de 0 a 1.

2.2 Método

Inicialmente, foi estudado o empacotamento das distintas combinações de agregados miúdos a fim de entender que proporções entre si apresentavam os menores índices de vazios. Os agregados miúdos foram misturados secos na betoneira por um minuto, e, em seguida, a massa unitária no estado compactado e o índice de vazios foram obtidos pelo ensaio previsto na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Estes ensaios foram realizados em triplicata para as misturas bicomponentes entre a Areia Natural e os demais agregados miúdos, a saber, Areia Gnaisse, Pó de Pedra Calcário e Areias da Mineração, assim como entre a Areia Gnaisse e as Areias da Mineração. As combinações foram analisadas para diferentes proporções volumétricas de agregados entre si, variando de 10 a 50%, em intervalos de 10%.

Na etapa seguinte, foi realizado o programa experimental de dosagem de concreto a fim de entender como as areias da mineração afetavam o comportamento do concreto em si. Escolheu-se um concreto convencional base com dimensão máxima 9,5mm, abatimento 100 ± 20 mm e consumo de cimento 350 kg/m^3 - cuja formulação é apresentada na Tabela 1. Como todos os concretos foram dosados com abatimento fixo, a quantidade de água variou conforme a demanda do concreto para obtenção da fluidez especificada. No estado fresco dos concretos, foram aferidos o abatimento do tronco de cone, segundo NBR NM 67, e o teor de ar incorporado pelo método pressométrico, segundo NBR NM 47 (ABNT, 1998; 2002). Ainda foram moldados cinco corpos de prova para cada idade e rompidos nas idades de 7 e 28 dias para determinação da resistência à compressão, segundo as normas NBR 5738 e 5739 (ABNT, 2015; 2018). Ao usar a mesma quantidade de cimento para todos os concretos, os resultados de resistência à compressão indicam diretamente a eficiência do concreto, pois quanto maior a resistência à compressão, menor é a intensidade de ligantes, uma vez que a variável consumo de ligantes não se altera.

Tabela 1 - Formulação do concreto base 1

Formulação do concreto	
Consumo de cimento (kg/m^3)	350
Quantidade de água teórica (l/m^3)	241
Teor de argamassa volumétrico (%)	55
Brita 9,5mm (kg/m^3)	915
Areia Natural Quartzosa (kg/m^3)	571
Areia Média Gnaisse (kg/m^3)	252
Tipo de aditivo	Polifuncional
Teor de aditivo ¹ (%)	0,7
Teor de ar incorporado teórico (%)	2,0

¹O teor de aditivo é calculado sobre a massa de cimento

O estudo foi realizado para três estruturas de agregados de referência distintas apresentadas na Tabela 2. A partir destas estruturas, objetivou-se substituir um dos agregados pela areia da mineração, mantendo o concreto com no máximo dois agregados miúdos.

Tabela 2 – Principais estruturas de agregados utilizadas na região da Grande Belo Horizonte, utilizadas como referência neste estudo

Estrutura de agregados	Brita 9,5mm	Agregado miúdo 1	Agregado miúdo 2
1	Brita Gnaisse	Areia Natural	Areia Média Gnaisse
2	Brita Gnaisse	Areia Média Gnaisse	X
3	Brita Calcário	Areia Natural	Pó de Pedra Calcário

Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros das formulações dos concretos utilizados nesta pesquisa. A partir da Estrutura de Agregados 1, avaliou-se as três areias da mineração em substituição a Areia Média Gnaisse em proporção dentre os agregados miúdos de 30% e 50%. Além disso, investigou-se o comportamento dos concretos com dois aditivos polifuncionais distintos, assim como o concreto sem aditivos, a fim de eliminar o efeito da interação aditivo-agregado miúdo.

Para a Estrutura de Agregados 2, foi feito um estudo prévio com estes agregados utilizando aditivo polifuncional e observou-se que os concretos apresentavam viscosidade alta. Desta maneira, utilizou-se nesta pesquisa aditivos do tipo *midrange* a fim de mitigar este efeito, e avaliou-se as três areias da mineração em 30% de substituição a Areia Média Gnaisse. Ademais, examinou-se o comportamento dos concretos com dois aditivos *midrange* distintos, assim como o concreto sem aditivos.

Na Estrutura de Agregados 3, analisou-se diferentes teores de areias da mineração e pó de pedra dentre os agregados miúdos (de 30 a 80%), assim como distintos teores de argamassa (de 52 a 55%).

Tabela 3 - Variáveis de interesse das formulações dos concretos ensaiados nesta pesquisa

Estrutura de agregados	Concreto	Teor dentre os agregados miúdos (%)						Teor de Argamassa (%)	Aditivo
		Areia Natural	Areia Gnaisse	Pó de Pedra Calcário	Areia da Mineração 1	Areia da Mineração 2	Areia da Mineração 3		
1	1	70	30					55	1 - Polifuncional
	2	70			30			55	1 - Polifuncional
	3	70				30		55	1 - Polifuncional
	4	70					30	55	1 - Polifuncional
	5	30					70	53	1 - Polifuncional
	6	50				50		53	1 - Polifuncional
	7	50					50	53	1 - Polifuncional
	8	70	30					55	2 - Polifuncional
	9	70				30		55	2 - Polifuncional
	10	70					30	55	2 - Polifuncional
	11	70					30	55	2 - Polifuncional
	12	70	30					55	X
	13	70				30		55	X
	14	70					30	55	X
2	15		100				55	X	
	16		70		30		55	X	
	17		70			30	55	X	
	18		70				30	55	X
	19		100				55	3 - Midrange	
	20		70			30	55	3 - Midrange	
	21		100				53	4 - Midrange	
	22		70		30		55	4 - Midrange	
	23		70			30	55	4 - Midrange	
	24		70				30	55	4 - Midrange
3	25	50		50			55	5 - Polifuncional	
	26	30		70			55	5 - Polifuncional	
	27	30			70		55	5 - Polifuncional	
	28	30				70	55	5 - Polifuncional	
	29	30					70	55	5 - Polifuncional
	30	50			50		55	5 - Polifuncional	
	31	50				50	55	5 - Polifuncional	
	32	50					50	55	5 - Polifuncional
	33	70		30			53	5 - Polifuncional	
	34	50		50			53	5 - Polifuncional	
	35	30		70			53	5 - Polifuncional	
	36	50				50	53	5 - Polifuncional	
	37	30			70		53	5 - Polifuncional	
	38	30					70	53	5 - Polifuncional
	39	20					80	53	5 - Polifuncional
	40	40					60	53	5 - Polifuncional
	41	20			80		53	5 - Polifuncional	
	42	40			60		53	5 - Polifuncional	
	43	40				60	53	5 - Polifuncional	
	44	60				40	53	5 - Polifuncional	
	45	20		80			53	5 - Polifuncional	
	46	40		60			53	5 - Polifuncional	
	47	40		60			52	5 - Polifuncional	
	48	40			60		52	5 - Polifuncional	
	49	40				60	52	5 - Polifuncional	
	50	40					60	52	5 - Polifuncional

3 Resultados

A fim de compreender a natureza da areia da mineração em comparação aos demais agregados utilizados para a construção civil, é importante caracterizá-los de maneira ampla. A caracterização dos materiais empregados nesta pesquisa é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Materiais utilizados no trabalho, contemplando o cimento, agregados gnáissicos, calcáreos e quartzosos, assim como três tipos de areias da mineração.

Identificação	Procedência	Módulo de finura	Área superficial específica (m ² /cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária compactada (kg/l)	Torrões de argila	Impurezas orgânicas
Cimento CP III 40 RS	CSN	X	0,659	X	X	X	X
Areia Natural Quartzosa	Esmeraldas (MG)	2,4	0,030	2,67	1,51	2,7%	Não
Areia Média Gnáissica	Montreal (MG)	2,5	0,064	2,75	1,77	1,5%	Não
Brita 0 Gnáissica	Montreal (MG)	5,3	0,010	X	1,51	0,6%	Não
Pó de pedra Calcáreo	ICAL (MG)	2,5	0,121	2,67	1,89	3,0%	Não
Brita 0 Calcáreo	ICAL (MG)	5,6	0,007	X	1,49	0,6%	Não
Areia da Mineração 1	MG	0,5	0,070	2,75	1,57	0,0%	Não
Areia da Mineração 2	MG	0,2	0,077	2,83	1,51	Não se aplica	Não
Areia da Mineração 3	MG	0,8	0,031	3,02	1,60	0,0%	Não

Ao analisar as características das areias da mineração como agregados miúdos, nota-se a densidade igual ou ligeiramente superior aos demais agregados miúdos. Como a magnitude desta diferença não é alta, é possível calcular que o impacto na densidade do concreto final é baixa. As areias da mineração dispõem de massa unitária na faixa coberta pelos demais agregados miúdos, não apresentam torrões de argila e tampouco impurezas orgânicas. Avaliando a distribuição granulométrica e o módulo de finura, nota-se que as areias da mineração são mais finas e mais concentradas em sua faixa granulométrica que os agregados miúdos usualmente empregados em Belo Horizonte (Figura 1). Entretanto, é interessante observar também a área superficial específica dos materiais, uma vez que esta área representa a superfície que necessita ser molhada pela água para separar as partículas a fim de obter a mobilidade do concreto. Quanto a esta propriedade, o Pó de Pedra apresenta valores maiores que as areias da mineração.

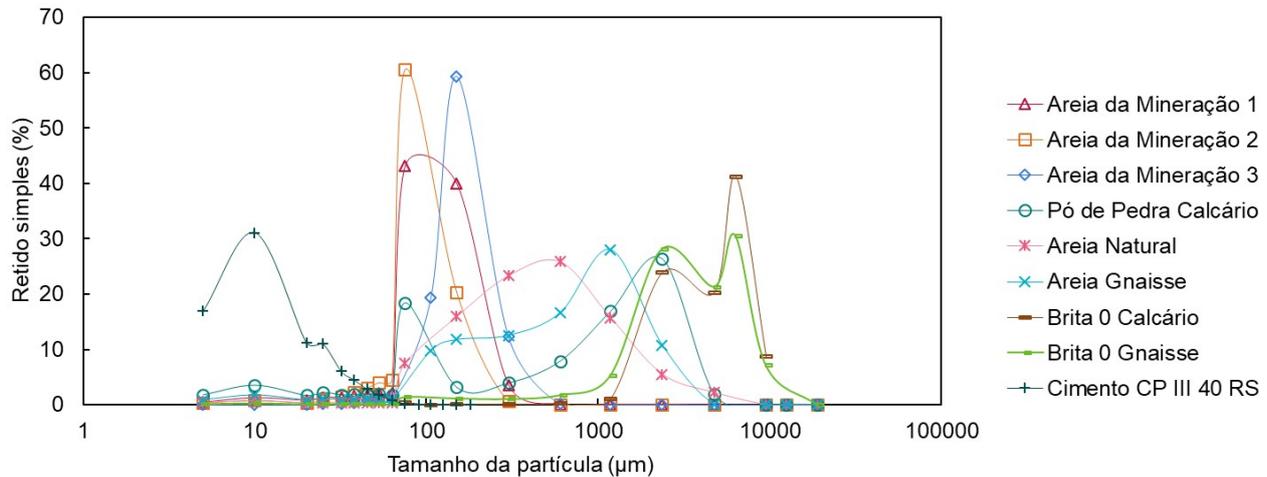


Figura 1 - Distribuição granulométrica dos materiais (Autores, 2020)

No tocante a análise química e mineralógica (Tabela 5, Tabela 6 e Figura 2), as areias da mineração são constituídas fundamentalmente por óxidos de ferro, entre 9% e 20%, principalmente na forma de hematita e sílica na forma de quartzo. Vale destacar os teores de Al_2O_3 inferiores a 0,5%, evidenciando uma baixa presença de aluminossilicatos, assim como o teor de caulinita de 0,4%, para a Areia da Mineração 1. Os teores de sulfato e de cloreto também são adequados para o uso como agregado. Além disso, na análise petrográfica das areias da mineração, não foram identificadas fases minerais deletérias ou potencialmente deletérias para agregados de concreto conforme NBR 7389-1 e NBR 15577-3 (ABNT, 2009; 2018).

Tabela 5 - Análise química das areias da mineração

Material	Análise química (%)												
	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SiO_2	P	TiO_2	Mn	PPC	Fe_2O_3	Na	SO_4^-	Cl (ppm)*
Areia da Mineração 1	0,19	<0,06	<0,03	0,0	87,90	x	x	<0,02	x	10,25	<0,01	0,12	39,29
Areia da Mineração 2	0,44	0,01	0,01	x	90,67	0,01	0,08	0,02	0,36	8,72	x	x	x
Areia da Mineração 3	x	0,06	x	0,04	79,93	x	x	x	x	19,78	x	x	x

*O teor de cloreto é apresentado em ppm.

Tabela 6 - Análise mineralógica da Areia da Mineração 1 pelo QEMSCAN

Material	Óxido/hidróxido de Ferro	Quartzo	Feldspato	Muscovita	Caulinita	Anfibólios	Carbonatos	Outros
Areia da Mineração 1	10,4%	88,7%	0,1%	0,1%	0,4%	0,0%	0,0%	0,3%

A partir da análise petrográfica (Figura 2), nota-se que as partículas das areias da mineração apresentam coloração branca e amarelada como a Areia Natural, bem como uma rugosidade superficial semelhante aos demais agregados artificiais. Comparando-se o grau de esfericidade das areias da mineração ao dos agregados miúdos usuais (Tabela 7), observa-se que este índice é ligeiramente superior aos demais, inclusive próximo ao grau de arredondamento da Areia Natural, fato que pode ser explicado devido à origem sedimentar das rochas das quais as areias derivam. No tocante ao arredondamento, o

grau das areias da mineração é da mesma ordem dos agregados industriais, como a Areia Média Gnaise e Pó de Pedra Calcário, porém, inferior ao grau de arredondamento da Areia Natural. Vale destacar o impacto positivo na demanda de água do concreto do alto grau de esfericidade, arredondamento e baixa rugosidade superficial.

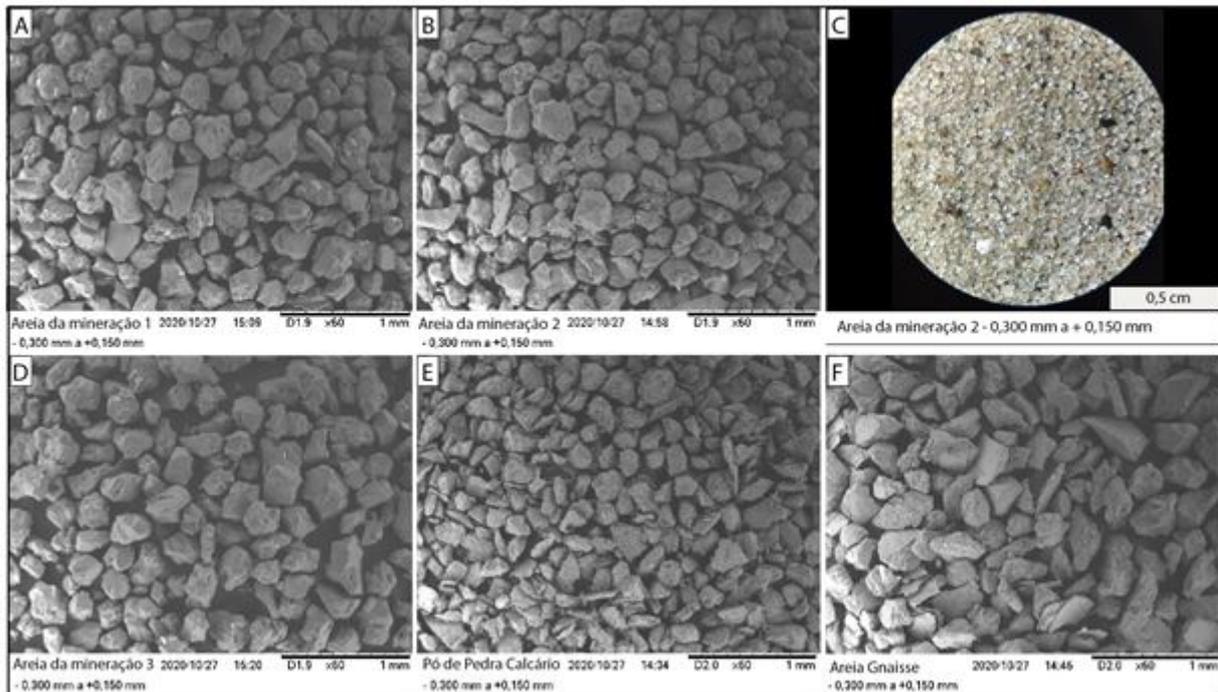


Figura 2 – Imagem MEV-BSE da fração 300 a 150µm dos agregados, com aumento de 60x. a) Areia da Mineração 1; b e c) Areia da Mineração 2, em (c) imagem na lupa estereoscópica; d) Areia da Mineração 3; e) Pó de Pedra Calcário; f) Areia Gnaise (Autores, 2020).

Tabela 7 – Graus de esfericidade e arredondamento dos agregados

Material	Esfericidade	Arredondamento
Brita 0 Gnaise – Montreal	0,64	0,25
Areia Média Gnaise - Montreal	0,70	0,19
Brita 0 Calcário – ICAL	0,66	0,23
Pó de pedra Calcário – ICAL	0,70	0,25
Areia Natural – Esmeraldas	0,72	0,44
Areia da Mineração 1	0,73	0,23
Areia da Mineração 2	0,82	0,26
Areia da Mineração 3	0,79	0,27

Para o estudo do empacotamento de partículas, foi avaliado o índice de vazios de diferentes misturas dos agregados miúdos. A Figura 3 apresenta a mescla das areias da mineração e do Pó de Pedra com a Areia Natural em diferentes proporções, assim como as areias da mineração adicionadas à Areia Média Gnaise.

Ao compor com a Areia Natural, notou-se que as Areias da Mineração 1 e 3 apresentaram os menores índices de vazios entre 30 e 50%, ao passo que a Areia da Mineração 2 atingiu seu mínimo entre 20 e 40%. Por isso, ao estudar a Estrutura de Agregados 1, na ANAIS DO 62º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2020 – 62CBC2020

qual as areias da mineração foram combinadas com a Areia Natural, utilizou-se majoritariamente as proporções 30 e 50% de areia da mineração dentre os agregados miúdos dos concretos. O Pó de Pedra Calcário associado à Areia Natural não atingiu um mínimo, pois quanto maior a proporção de Pó de Pedra Calcário menor foi índice de vazios medido, até atingir o menor índice: o Pó de Pedra Calcário puro. Desta maneira, na Estrutura de Agregados 3, optou-se por proporções maiores – de 40 a 80% – de Pó de Pedra Calcário, assim como de areias da mineração, para compor com a Areia Natural nos concretos.

Na composição com a Areia Média Gnaisse, as três areias da mineração apresentaram valores mínimos entre 20 e 30%. Assim, ao estudar a Estrutura de Agregados 2, utilizou-se a proporção de 30% das areias da mineração em conjunto com a Areia Média Gnaisse. É importante destacar que o índice de vazios das areias da mineração em conjunto com a Areia Média Gnaisse se mostrou em todos os casos inferior ao com a Areia Natural, com uma diferença da ordem de 4%.

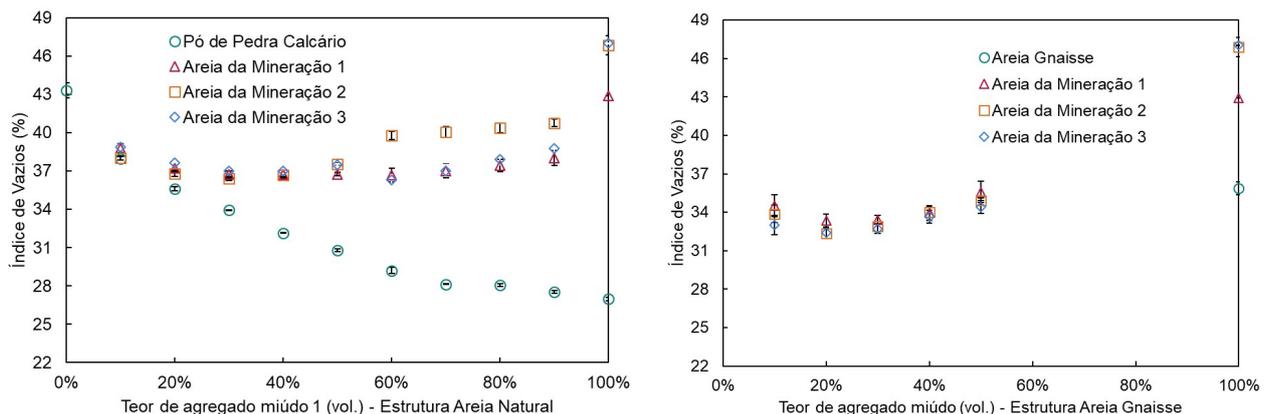


Figura 3 - Índice de vazios para diferentes misturas de agregados miúdos. À esquerda, os agregados são compostos com a Areia Natural e, à direita, com a Areia Gnaisse (Autores, 2020).

Ressalta-se que o empacotamento de partículas não é o único fator determinante para a demanda de pasta, e, no caso estudado, de água do concreto. A área superficial específica e a morfologia dos grãos têm um papel fundamental no fenômeno da mobilidade do concreto no estado fresco.

No tocante aos concretos da Estrutura de Agregados 1, as areias da mineração substituíram a Areia Média Gnaisse. A Figura 4 apresenta a quantidade água necessária para atingir o abatimento 100 ± 20 mm para cada concreto desta estrutura. Nota-se que os concretos com areias da mineração demandaram uma quantidade igual ou menor de água que os concretos com agregados convencionais (Concretos 1, 8 e 12). Deve-se destacar o concreto com 50% da Areia da Mineração 1 dentre as areias (Concreto 6), que atingiu uma redução relevante de 17l/m^3 de água. Ademais, ressalta-se o comportamento dos concretos com Areias da Mineração 1 e 2 sem aditivo (Concretos 13 e 14) atingindo reduções da ordem de 5l/m^3 . Estes concretos sem aditivo, apesar de não serem utilizados no cotidiano, trazem uma informação importante, retirando da análise a variável da interação do agregado miúdo com o aditivo.

As resistências à compressão em 7 e 28 dias, apresentadas na Figura 5, se mostraram coerentes com a demanda de água, ficando iguais ou maiores para os concretos com areias da mineração. O Concreto 6 apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias, 8% acima da referência, assim como a supracitada redução da demanda de água. Uma exceção foi o concreto com 70% da Areia da Mineração 3 (Concreto 5), que apresentou resistência em 7 dias inferior ao concreto convencional (Concreto 1). Isto pode ser explicado pela alta incorporação de ar do Concreto 5, que atingiu 3,6%.

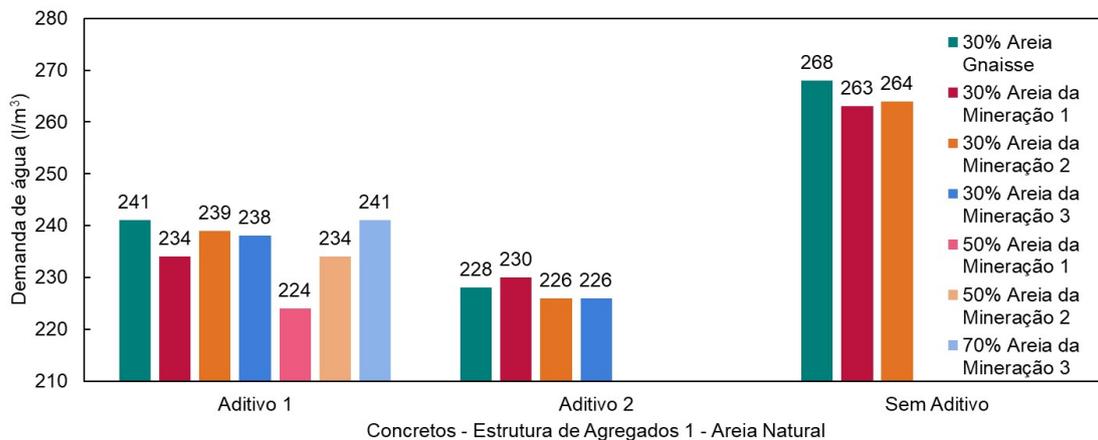


Figura 4 - Demanda de água dos concretos da Estrutura de Agregados 1. Os teores apresentados na legenda consistem na fração dentro os agregados miúdos, em composição com a Areia Natural (Autores, 2020).

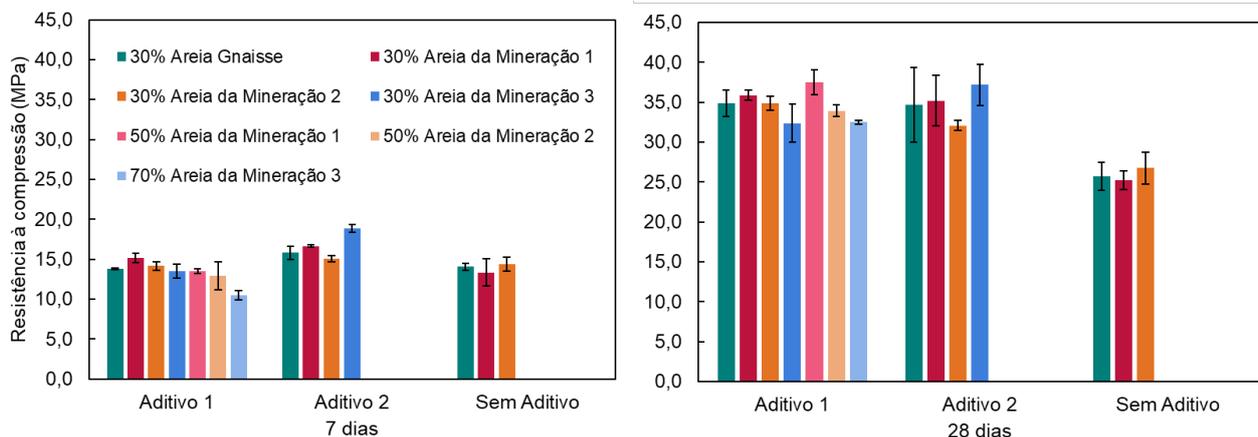


Figura 5 – Resistência à compressão em 7 e 28 dias dos concretos da Estrutura de Agregados 1. Os teores apresentados na legenda consistem na fração dentro os agregados miúdos, em composição com a Areia Natural (Autores, 2020).

Ao avaliar os concretos dosados com a Estrutura de Agregados 2, é possível notar que os concretos sem aditivo com as Areias da Mineração 1 e 2 (Concretos 16 e 17) demandaram a mesma quantidade de água que o concreto referência (Concreto 15), enquanto o com Areia da Mineração 3 (Concreto 18) apresentou uma redução de 14l/m³ (Figura 6). No caso do Aditivo 3, houve um aumento na quantidade de água de 7l/m³ ao

utilizar a Areia da Mineração 2 (Concretos 19 e 20), enquanto com o Aditivo 4, as Areias da Mineração 1 e 2 (Concretos 22 e 23) apresentaram redução de 13 e 7l/m³, respectivamente, em comparação com a referência (Concreto 21). Desta maneira, no estado fresco, destaca-se positivamente a utilização do Areia da Mineração 3, assim como o uso do Aditivo 4 em conjunto com as areias da mineração. Conforme apresentado na Figura 7, as resistências à compressão destes concretos corroboram os resultados no estado fresco, com resistências em 7 e 28 dias mais altas para a Areia da Mineração 3 dentre os concretos sem aditivo (da ordem de 10% acima da referência), bem como os concretos com Areia da Mineração 1 sem aditivo e em conjunto com o Aditivo 4, atingindo, respectivamente, 20 e 10% acima da referência em 28 dias.

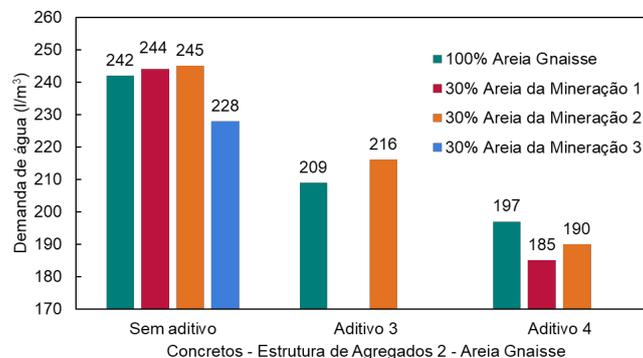


Figura 6 - Demanda de água dos concretos da Estrutura de Agregados 2. Os teores apresentados na legenda consistem na fração dentre os agregados miúdos, em composição com a Areia Gnaiss (Autores, 2020).

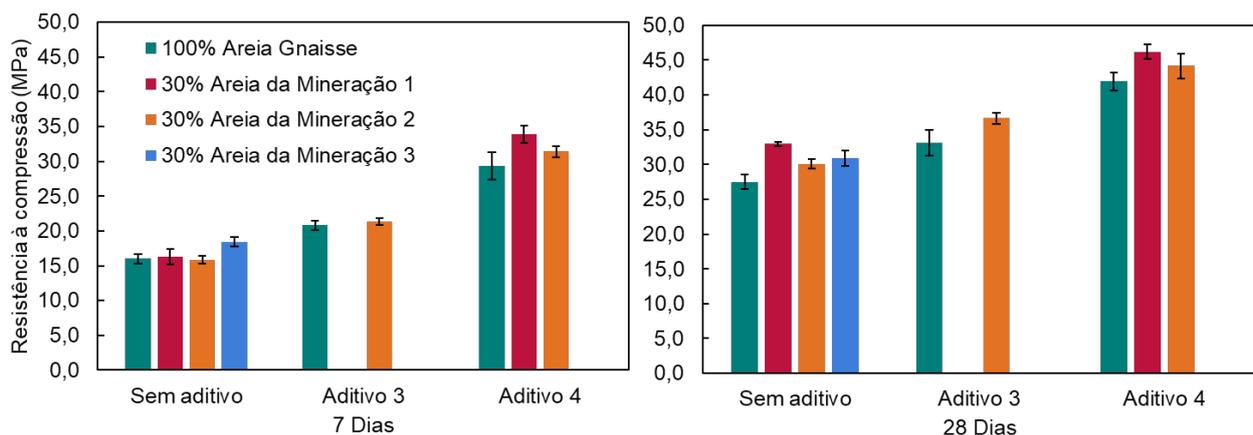


Figura 7 - Resistência à compressão em 7 e 28 dias dos concretos da Estrutura de Agregados 2. Os teores apresentados na legenda consistem na fração dentre os agregados miúdos, em composição com a Areia Gnaiss (Autores, 2020).

Por último, apresenta-se os resultados da Estrutura de Agregados 3 por meio das Figuras de 9 a 11. No estado fresco, a menor demanda de água (200l/m³) foi obtida pelo Concreto 39, cujo teor de Areia da Mineração 3 dentre os agregados miúdos foi o máximo testado: 80%. Além disso, todos os concretos com Areia da Mineração 3 apresentaram demanda

de água menor que os concretos de referência com Pó de Pedra Calcário. Os concretos com Areia da Mineração 1 atingiram demanda de água igual ou menor que a referência até teores de 80%, enquanto os concretos com Areia da Mineração 2 apresentaram demanda de água igual ou ligeiramente superior que a referência, indicando uma proporção ótima dentre os agregados miúdos de 60%.

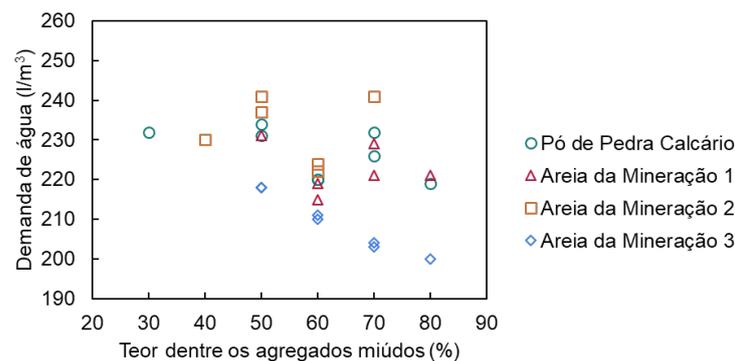


Figura 8 - Demanda de água dos concretos da Estrutura de Agregados 3 com diferentes teores de areias da mineração e Pó de Pedra dentro os agregados miúdos (Autores, 2020)

A Figura 9 apresenta o aspecto dos quatro concretos com o mesmo teor de argamassa (52%) e teor de 60% dentre os agregados miúdos seja do Pó de Pedra Calcário ou das areias da Mineração. É possível notar o aspecto menos empedrado, mais argamassado, dos concretos ao utilizar as areias da mineração, demonstrando a oportunidade de formulação de concretos com teores de argamassa mais baixo, e, conseqüentemente, com menor consumo de cimento para uma mesma resistência à compressão. Esta observação mostra o potencial de redução de intensidade de ligantes e aumento de eficiência dos concretos ao utilizar as areias da mineração.



Figura 9 – Aspecto dos concretos com 52% de teor de argamassa. Da esquerda para a direita: Pó de pedra (Concreto 47), Areia da Mineração 1 (Concreto 48), Areia da Mineração 2 (Concreto 49), Areia da Mineração 3 (Concreto 50) (Autores, 2020).

No estado endurecido (Figura 10), nota-se que os concretos com a Areia da Mineração 3 atingiram resistência à compressão em 7 e 28 dias superiores ao concreto com Pó de Pedra Calcário, alcançando 20% de ganho em 28 dias com 80% de Areia da Mineração 3 dentre os agregados miúdos comparado ao concreto com Pó de Pedra na mesma proporção (Concretos 41 e 45). Os concretos com Areia da Mineração 1 apresentaram resistência à compressão igual ou maior à referência e os concretos com Areia da Mineração 2 apresentaram resistências iguais aos concretos com Pó de Pedra. Estes

resultados superiores dos concretos com areias da mineração podem ser atribuídos a uma menor área superficial específica das areias da mineração comparadas ao Pó de Pedra Calcário, assim como um maior arredondamento das partículas.

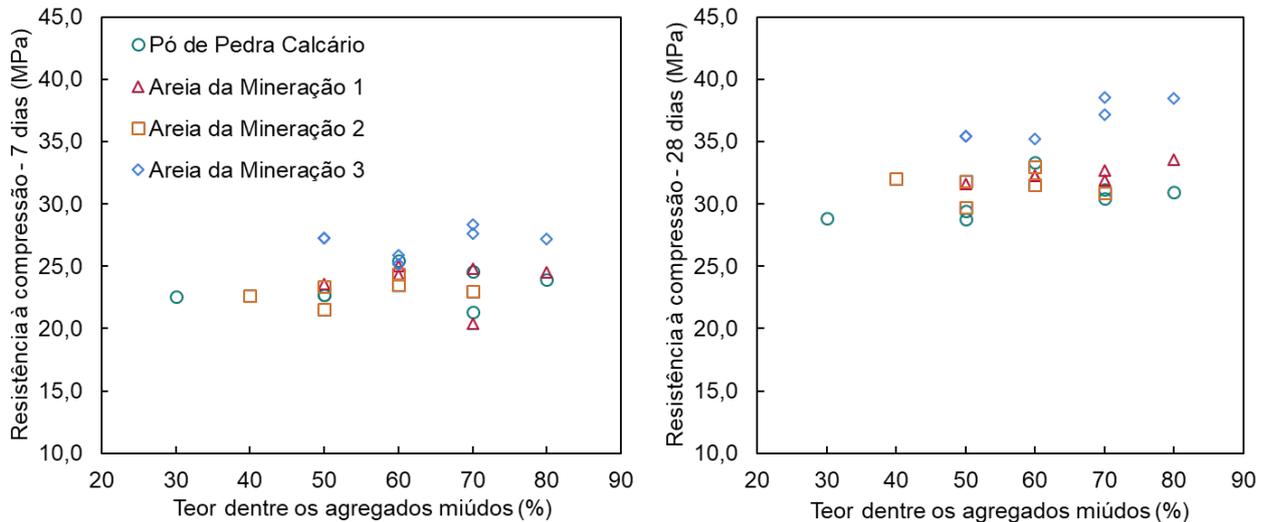


Figura 10 – Resistência à compressão dos concretos da Estrutura de Agregados 3 com diferentes teores de areias da mineração e Pó de Pedra dentro os agregados miúdos. Os teores apresentados na legenda consistem na fração dentro os agregados miúdos, em composição com a Areia Natural (Autores, 2020).

4 Conclusão

Para avaliação do uso das três areias da mineração, foi feita uma caracterização ampla e não foi observada nenhuma característica impeditiva ou prejudicial ao uso em concreto. Fundamentado nestes resultados, foram executados 50 concretos, com diferentes estruturas de agregados, proporções das areias da mineração, tipos de aditivos, teores de argamassa e verificado seu desempenho quanto à fluidez no estado fresco e resistência à compressão no estado endurecido.

Notou-se que, nas três estruturas de agregados empregadas em Belo Horizonte, é possível utilizar as três areias da mineração com ganho ou manutenção da eficiência dos concretos comparados aos concretos com agregados convencionais.

Destaca-se, na estrutura de agregados calcáreos, o uso de até 80% das Areias da Mineração 1 e 3 e até 60% da Areia da Mineração 2 dentre os agregados miúdos. Em especial, os concretos com a Areia da Mineração 3 apresentaram ganho significativo na eficiência, da ordem de 20% de aumento de resistência à compressão e, conseqüente, redução de intensidade de ligantes. Observou-se também a oportunidade de uso de teores de argamassa mais baixos nos concretos com areia da mineração devido ao seu aspecto favorável em comparação ao concreto convencional.

Nas estruturas de agregados com Gnaisse e Areia Natural empregando distintos aditivos, foi possível utilizar até 50% da areia da mineração dentre os agregados miúdos sem perda de eficiência. Ressalta-se o fato de que este mesmo resultado foi obtido para concretos com as três areias da mineração sem aditivos, mostrando que independentemente da interação aditivo-agregado miúdo, os concretos com areias da mineração apresentaram comportamento igual aos concretos com agregados convencionais.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Esses resultados validam o uso das areias provenientes da exploração de minério de ferro como agregado em concreto, viabilizando ganhos em eficiência. O estudo mostra os benefícios das areias da mineração, traz indicativos de proporções dentre os agregados miúdos a serem utilizadas, assim como mostra a interação do material com diferentes tipos de aditivos.

5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 13503-2: Indústrias do petróleo e gás natural — Fluidos e materiais de completação. Parte 2: Medição das propriedades de propantes usados em operações de fraturamento hidráulico e gravel-packing.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 45: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 47: Concreto — Determinação do teor de ar em concreto fresco — Método pressométrico.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 49: Agregado miúdo — Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 67: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 248: Agregados — Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7218: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7389-1: Agregados — Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15577-3: Agregados — Reatividade álcali-agregado — Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Tendências para o mercado de agregados no Brasil.** São Paulo, 2020.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de resíduos sólidos da mineração, ano base 2017.** Belo Horizonte, 2018.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, **Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras.** Notícias 16/02/2016. Disponível em: http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043, acesso em setembro/2020

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** São Paulo, Universidade de São Paulo, 2013.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning a scientific approach.** 1. ed., London, E & FN Spon, 1999.

MENEZES, M. F. L. **Modelo de fluidez do concreto baseado em distância entre partículas para centrais dosadoras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – USP, São Paulo, 2020.

PILEGGI, Rafael G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) — UFSCar, São Carlos, 2001.

POWERS, T. C. **The properties of fresh concrete.** 1. ed., Michigan, Wiley, 1968.

ROMANO, Antônio G. **Geologia e recursos minerais da folha Contagem SE.23-Z-C-V, estado de Minas Gerais, escala 1:100.000;** organizador Luiz Carlos da Silva. - Brasília: CPRM, 2014.