

Reatividade potencial de agregados para concreto no Uruguai. Correlação entre a metodologia da barra de argamassa e o prisma de concreto (acelerado e tradicional)

P. E. Vila^{1*} , H. L. Bonjour¹ , L. J. Díaz¹ , M. N. Pereyra¹ 

* Autor de Contato: pvila@fing.edu.uy

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.608>

Recebido: 11/05/2022 | Correções recebidas: 21/12/2022 | Aceito: 21/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

RESUMO

Foi analisada a correlação entre os critérios internacionais para definir o grau de reatividade potencial nos ensaios de expansão em barras de argamassa e no prisma de concreto (metodologia acelerada e tradicional). Experimentalmente foram aplicadas as três metodologias de ensaio a 19 amostras de agregados empregados para concreto no Uruguai. Houve agregados de reatividade variada, mas não houve consenso na interpretação pelas diferentes técnicas. Os resultados são únicos para as litologias avaliadas e forneceram base para uma metodologia de ensaio relativamente nova. Não foi observada correlação entre a expansão da barra de argamassa e no prisma de concreto metodologia-tradicional, mas uma correlação adequada foi observada entre as duas metodologias de concreto (acelerado e tradicional).

Palavras-chave: expansão; durabilidade; reação álcali-agregado; ensaios.

Citar como: Vila, P. E., Bonjour, H. L., Díaz, L. J., Pereyra, M. N. (2023), “Reatividade potencial de agregados para concreto no Uruguai. Correlação entre a metodologia da barra de argamassa e o prisma de concreto (acelerado e tradicional)”, Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 45 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.608>

¹ Departamento de Construcción, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor P. E. Vila contribuiu com a ideia original (80%), a análise dos dados e a redação do trabalho (80%), o autor H. L. Bonjour com a análise petrográfica de todas as amostras de agregado que fazem parte do estudo, L. J. Díaz contribuiu com o trabalho experimental e processamento das amostras, M. N. Pereyra contribuiu com a ideia original (20%), na redação (20%) e revisou o trabalho.

Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Potential alkali reactivity of aggregates for concrete in Uruguay. Correlation between mortar bar test and concrete prism (accelerated and traditional test)

ABSTRACT

The correlation between the international criteria to define the reactivity degree in the mortar bar expansion tests and the expansion in concrete prism tests (accelerated and traditional methodology) was analyzed. The three test methodologies were applied experimentally to 19 aggregates samples used for concrete in Uruguay. There were aggregates of different reactivity degree, but no consensus was found in the interpretation by the different techniques. The results are only for the lithologies evaluated and provided background for a relatively new assay methodology. No correlation was observed between the expansion of the mortar bar and in the concrete prism-traditional methodology, but an adequate correlation was observed between both concrete methodologies (accelerated and traditional).

Keywords: expansion; durability; alkali-aggregate reaction; tests.

Potencialidad reactiva de agregados para hormigón en Uruguay. Correlación entre la metodología de la barra de mortero y el prisma de hormigón (acelerada y tradicional).

RESUMEN

Se analizó la correlación entre los criterios internacionales para definir el grado de reactividad en los ensayos de expansión de la barra de mortero y del prisma de hormigón (metodología acelerada y tradicional). Experimentalmente se aplicaron las tres metodologías de ensayo a 19 muestras de agregados empleados para hormigón en Uruguay. Se tuvieron agregados de variada reactividad, pero no se encontró consenso en la interpretación por las diferentes técnicas. Los resultados son únicos para las litologías evaluadas y aportaron antecedentes de una metodología de ensayo relativamente nueva. No se observó correlación entre la expansión de la barra de mortero y en prisma de hormigón-metodología tradicional, pero si se observó una adecuada correlación entre ambas metodologías en hormigón (acelerada y tradicional).

Palabras clave: expansión; durabilidad; reacción álcali-agregado; ensayos.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é constituído entre 60 e 75% de seu volume por agregados pétreos. Agregados contendo sílica amorfa ou de baixa cristalinidade (como quartzo com sílica reativa, ftanita, sílex, calcedônia, tridimita, cristobalita, opala e vidro vulcânico) juntamente com a presença de álcalis (óxidos de sódio e potássio), íons hidroxila (OH^-) e umidade, produzem uma reação química deletéria no concreto chamada reação álcali-sílica (RAS). Esta reação, uma vez desencadeada, pode causar sérios problemas em estruturas de concreto, principalmente em infraestruturas civis como pontes, pavimentos, fundações, barragens, entre outras (Fanijo et al., 2021; Godart et al., 2013; Sims e Poole, 2017).

O principal efeito deletério no concreto se deve à natureza expansiva dos produtos da reação, que podem gerar rupturas de arestas em juntas, movimentação diferencial entre as bordas dos muros, mapeamento da fissuração característica da RAS nas lajes dos pavimentos ou em maciços de fundação, mapeamento de fissuras longitudinais em pilares, pipocamentos (popouts), descoloração e lixiviação nas superfícies (Fournier et al., 2010; Méndez, 2019).

Para o dimensionamento de uma nova estrutura é importante conhecer o risco de ser acometido por esta manifestação patológica de forma a tomar as medidas preventivas necessárias e minimizar os danos. Estas medidas são de natureza prescritiva ou de desempenho, mas o primeiro passo é sempre conhecer o potencial reativo do agregado a ser utilizado, o que permitirá classificá-lo pelo seu grau ou nível de reatividade. Este grau de reatividade, juntamente com a vida útil do projeto, o risco associado à falha, o tipo de elemento e o ambiente que o envolve, permite determinar o nível de prevenção necessário para controle da RAS. Algumas das medidas prescritivas podem ser a limitação do teor de álcalis no concreto ou o uso de adições minerais ativas (IRAM, 2016; IRAM, 2012; ABNT, 2008; ASTM, 2020; Nixon e Sims, 2016).

O grau de reatividade é determinado empregando alguma das metodologias de ensaio de expansão de laboratório padronizadas existentes: expansão acelerada em barra de argamassa (abreviada como AMBT) (IRAM, 1997), expansão acelerada em prisma de concreto (abreviado CPT-60) (IRAM, 2013) ou metodologia tradicional de expansão em prisma de concreto (abreviado como CPT-38) (IRAM, 2013).

Por outro lado, o Uruguai possui uma grande variedade litológica, representada por rochas de diferentes naturezas, idade e história geológica (Veroslavsky Barbe et al., 2004a; Veroslavsky Barbe et al., 2004b). Estas rochas têm sido amplamente utilizadas como agregados na indústria da construção. Destacam-se pelo seu uso as rochas de Granito, granodiorito e rochas basálticas, bem como areia, brita e seixo rolado. Até o momento não existe regulamentação nacional que indique o procedimento para realizar a avaliação da reatividade potencial dos agregados. Tradicionalmente, a avaliação da reatividade potencial do agregado era realizada apenas com o método da barra de argamassa (AMBT).

Entre 2018 e 2021, foi realizada uma campanha experimental que permitiu avaliar a reatividade potencial de amostras de agregados pertencentes às principais fontes de exploração de agregados para concreto localizadas em diferentes regiões do país. O grau de reatividade foi avaliado aplicando as metodologias de ensaio de expansão mencionadas anteriormente.

O objetivo deste trabalho foi analisar a correlação entre os critérios internacionais para definir o grau de reatividade decorrente dos ensaios de expansão da barra de argamassa ou do prisma de concreto (metodologia acelerada ou tradicional) aplicados a 19 amostras de agregados pertencentes a diferentes procedências de exploração do Uruguai.

2. GRAUS DE REATIVIDADE DO AGREGADO

Normas internacionais definem o grau de reatividade do agregado aplicando uma das seguintes metodologias: expansão em barra de argamassa (AMBT), expansão em prisma de concreto metodologia-acelerada (CPT-60) ou expansão em prisma de concreto metodologia-tradicional (CPT-38). A partir do resultado, o agregado é classificado em uma escala de R0 a R3 conforme Tabela 1 (R0 corresponde ao agregado não reativo e R3 extremamente reativo) (ASTM, 2020; ABNT, 2008; IRAM, 2016; Giovambattista et.al., 2020).

Tabela 1. Grau de reatividade do agregado de acordo com a expansão (E, em %) nas metodologias da barra de argamassa e no concreto.

Grau	Grau de reatividade	AMBT a 14 dias ¹⁾	AMBT a 28 dias ²⁾	CPT-60 a 13 semanas ³⁾	CPT-38 a 52 semanas ⁴⁾
R0	Não reativo	$E < 0,10$	$E < 0,19$	$E < 0,04/0,08^5)$	$< 0,04$
R1	Moderado	$0,10 \leq E < 0,30$	$0,19 \leq E < 0,40$	$0,04/0,08^5) \leq E < 0,12$	$0,04 \leq E < 0,12$
R2	Alto	$0,30 \leq E < 0,45$	$0,40 \leq E < 0,60$	$0,12 \leq E < 0,24$	$0,12 \leq E < 0,24$
R3	Muito alto	$E \geq 0,45$	$E \geq 0,60$	$E \geq 0,24$	$\geq 0,24$

Notas ¹⁾: ASTM C1778 e Bases para um Código Modelo Argentino; 2) NBR 15577; 3) IRAM 1531, IRAM 1512 e Bases para um Código Modelo Argentino; 4) ASTM C1778, NBR 15577 e Bases para um Código Modelo Argentino; 5): para agregados cuja reatividade se deve exclusivamente a alguma variedade de quartzo (microcristalino ou tensionado), adota-se o limite de 0,08%.

O AMBT é adotado por todas as normas para definir o grau de reatividade. Nesta metodologia é usual adotar o limite em 14 e/ou 28 dias. As normativas americana e argentina adotam a expansão em 14 dias, enquanto a norma brasileira adota a expansão em 28 dias.

O CPT-60 é o ensaio de expansão acelerada em prismas de concreto e é adotado pela normativa argentina. O CPT-38 é o ensaio tradicional em prismas de concreto e é adotado por todos os regulamentos técnicos. Em caso de discrepância entre os diferentes métodos, este último tem prioridade sobre os demais, pois sendo o menos agressivo, o comportamento do agregado é o mais semelhante ao do serviço (na obra).

O AMBT envolve a preparação de barras de argamassa de 25 mm x 25 mm x 285 mm com o agregado nas frações passando de 4,75 mm e maior que 0,150 mm, nas proporções indicadas na Tabela 2. Os corpos de prova são curados por 24 h a 20 °C e 100% UR, em seguida, são imersos em água por 24 h. Após 48 h, a leitura inicial é registrada e são imersos em solução de NaOH 1 N a 80 °C por um período de 14 a 28 dias. Esta metodologia de ensaio também é empregada para avaliar o efeito péssimo e a capacidade de inibir a reação de uma adição de mineral reativo (ASTM International, 2020).

Tabela 2. Dosagem da argamassa (AMBT)

Agregado, % massa retida pela peneira					Total agregado (kg)	Cimento (kg)	Água (kg)
4,75-2,36, mm	2,36-1,18, mm	1,18-0,60, mm	0,60-0,30, mm	0,30-0,15, mm			
10	25	25	25	15	0,99	0,44	0,207

Com as metodologias de expansão de concreto (CPT-60 e CPT-38), são produzidos corpos de prova prismáticos de concreto de 75 mm x 75 mm x 285 mm nas proporções indicadas na Tabela 3. Na metodologia acelerada, os prismas são submetidos a 60 °C e 100% UR por 13 semanas e na metodologia tradicional a 38 °C e 100% UR por 1 ano.

Tabela 3. Dosagem do concreto (CPT-60 y CPT-38) (kg/m³)

Agregado graúdo, por fração			Agregado miúdo, por fração				Cimento (Kg)	Água (kg)	Aditivo	
19-12,5 mm	12,5-9,5 mm	9,5-4,75 mm	4,75-2,36 mm	2,36-1,18 mm	1,18-0,60 mm	0,60-0,15 mm			Sikament 290N (%)	NaOH (g)
354	354	354	71	142	142	354	420	198,4	0,20%	535,7

Antes dos ensaios de expansão, é realizada a avaliação petrografia do agregado para determinar os componentes reativos (ASTM, 2019).

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

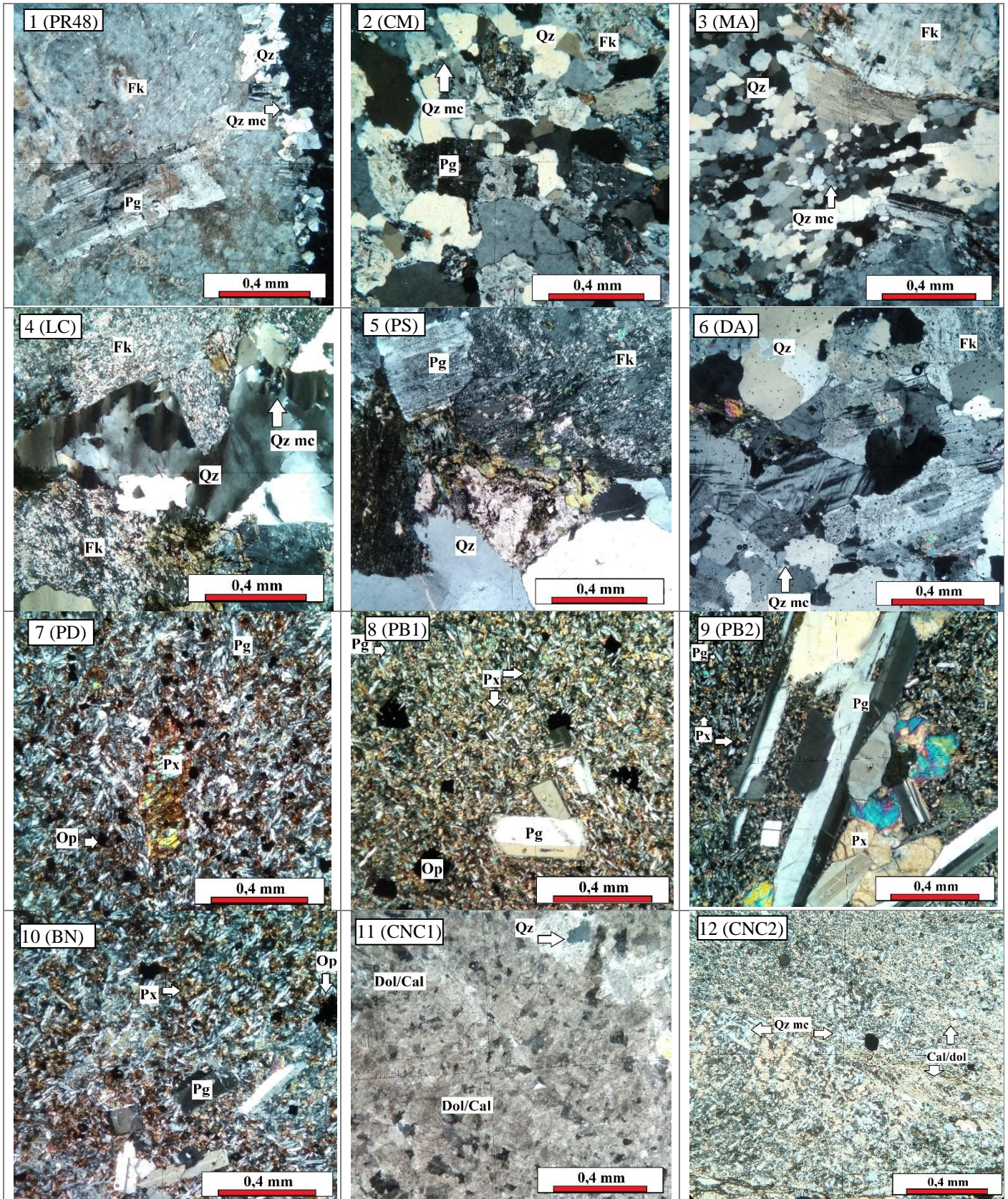
3.1 Materiais

Na avaliação foram empregadas 19 amostras de agregados (13 de agregado graúdo, 3 de areia grossa e 3 de areia fina) todas consideradas aptas para concreto (UNIT, 2005) provenientes de fontes de exploração localizadas em diferentes regiões do país (Tabela 4). Além disso, a composição mineralógica e os componentes reativos são indicados conforme IRAM 1531 (IRAM, 2016) e IRAM 1512 (IRAM, 2012). As amostras numeradas de 1 a 6 eram amostras de agregado graúdo "granitos", aqueles que apresentaram quartzo microcristalino e quartzo de estresse (Qz/mc e Qz/t) como componentes reativos. Da 7 à 10 eram amostras de basalto e apresentavam vidro vulcânico alterado (Vv) como componente reativo (além disso, a amostra 10 apresentava opala). As amostras 11 e 12 eram metadolomia, a amostra 12 apresentava quartzo microcristalino (Qz/mc). A amostra 13 foi um seixo rolado silicioso com a presença de quartzo microcristalino (Qz/mc) e calcedônia como componentes reativos (Ccd). As amostras 14 a 19 são areias de depósitos fluviais com quartzo microcristalino (Qz/mc) como componente reativo. Na Figura 1 mostram-se imagens das amostras.

Tabela 4. Amostras de agregados empregados na avaliação experimental.

número	Id. da amostra	Tipo	Localização	Origem geológico	Componentes reativos
1	PR48	Graúdo	Las Piedras, Canelones	Granito La Paz	Qz/mc
2	CM	Graúdo	Cno. Carrasco, Montevideo	Granodiorita Cañada de las Canteras	Qz/mc
3	MA	Graúdo	Mal Abrigo, San José	Granito Mal Abrigo	Qz/mc
4	LC	Graúdo	San Carlos, Maldonado	Granito Aiguá	Qz/mc y Qz/t
5	PS	Graúdo	Soca, Canelones	Granito Soca	Qz/mc y Qz/t
6	DA	Graúdo	Durazno, Durazno	Franja Granito-Gnéisica Terreno Piedra Alta	Qz/mc y Qz/t
7	PD	Graúdo	Ruta 5 Km 480, Tacuarembó	Basalto Arapey	Vv alterado
8	PB1	Graúdo	Centenario, Durazno	Basalto Arapey	Vv alterado
9	PB2	Graúdo	Centenario, Durazno	Basalto Arapey	Vv alterado
10	BN	Graúdo	Paso de los Toros, Tacuarembó	Basalto Arapey	Vv alterado y Op
11	CNC1	Graúdo	Pan de Azúcar, Maldonado	Metadolomía – Complejo Zanja del Tigre	Qz
12	CNC2	Graúdo	Pan de Azúcar, Maldonado	Metadolomía – Complejo Zanja del Tigre	Qz/mc
13	CRS	Graúdo	Salto, Salto	Arenas conglomeráticas – Canto Rorado Salto	Qz/mc y Ccd
14	AGP	Areia	Aguas Corrientes, Canelones.	Depósito atual – Sedimento Río Santa Lucía	Qz/mc
15	AGPP	Areia	Paso Pache, Canelones.	Depósito atual- Sedimento Río Santa Lucía	Qz/mc
16	AGRN	Areia	Centenario, Durazno	Depósito atual fluvial – Río Negro	Qz/mc y Ccd
17	AFT	Areia	Delta del Tigre, San José	Formación Chuy	Qz/mc
18	AFJ	Areia	Jaureguiberry, Canelones	Deposito atual- Dunas Costeras	Qz/mc
19	AFRN	Areia	Centenario, Durazno	Depósito atual fluvial – Río Negro	Qz/mc

Qz/mc: quartzo microcristalino. Qz/t: quartzo tensionado. Vv: vidro vulcânico. Ccd: calcedônia.
Op: opala



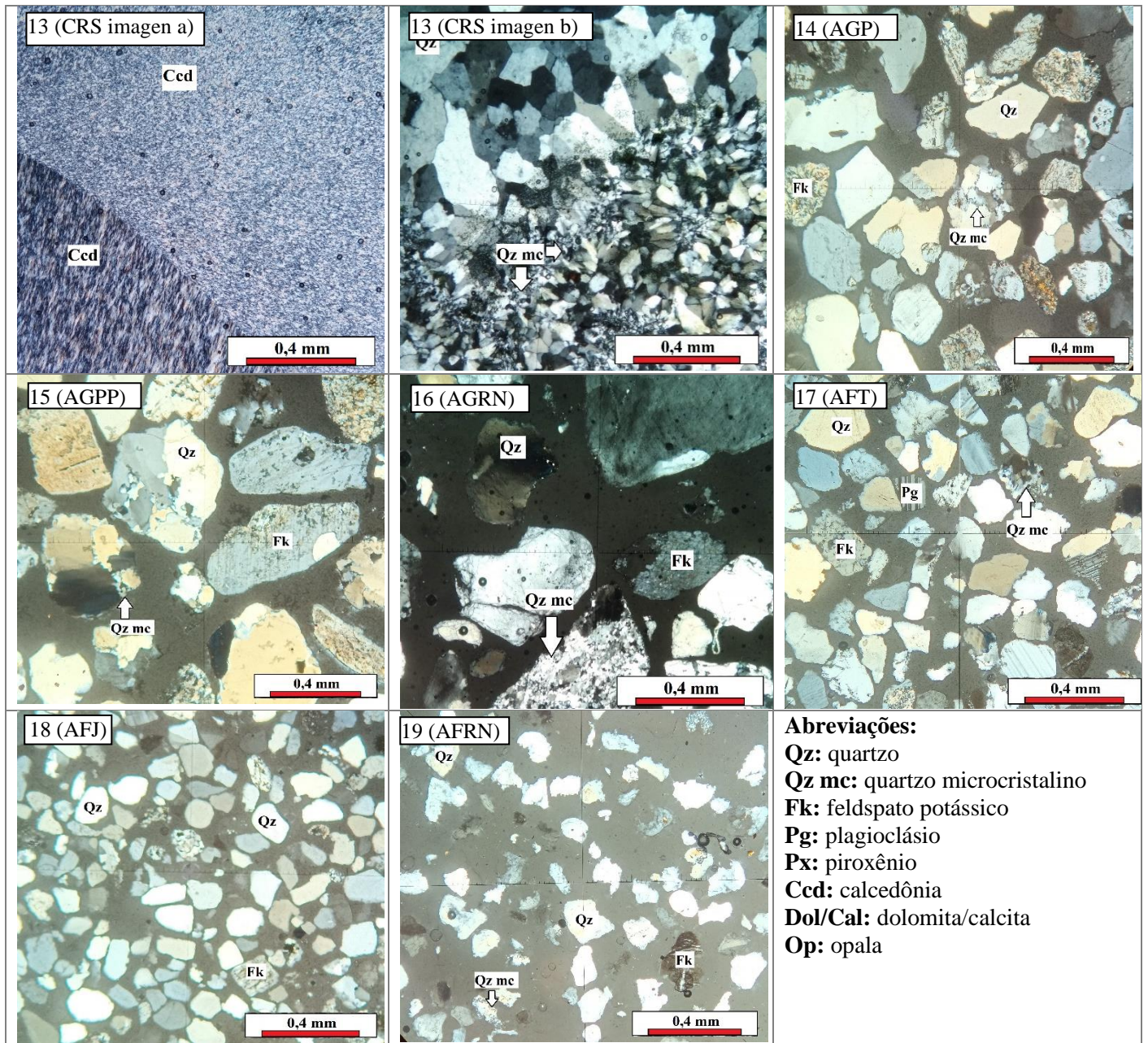


Figura 1. Fotomicrografia com nicoles cruzados de las muestras.

O cimento empregado para a fabricação de argamassas e concretos é um cimento Portland que contém apenas clínquer como componente principal, sem adições e de uso geral em concreto (Tabela 5), identificado como CPN 40 conforme UNIT 20 (UNIT, 2017).

Tabela 5. Caracterização do cimento Portland CPN 40.

CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Sódio Equivalente Na ₂ O+0,658K ₂ O (%)	C ₃ A (%)
62,99	19,93	4,42	2,76	3,06	0,34	1,23	1,15	6,5
Resíduo insolúvel (%)	Perda por calcinação (%)	Peneira retida 75 µm (%)	Blaine (m ² /kg)	Expansão em autoclave (%)	Densidade (kg/dm ³)	Tempo de pega inicial (h:min)	Tempo de pega final (h:min)	Resistencia 28 dias (MPa)
0,11	2,46	3,1	356	Si registro	3,15	1:56	2:56	46,6

As argamassas e os concretos foram fabricados segundo os procedimentos normalizados IRAM 1674 (IRAM, 1997) e IRAM 1700 (IRAM, 2013), respectivamente. As proporções são indicadas nas Tabelas 2 e 3.

3.2 Metodologia

Foram aplicadas três metodologias de ensaios de expansão (AMBT, CPT-60 e CPT-38). No ensaio AMBT, o registro do comprimento das barras de argamassa foi obtido aos 0 dias (comprimento inicial, antes da imersão na solução de NaOH 1N), 14 e 28 dias após a imersão. No ensaio de prisma de concreto, metodologia acelerada (CPT-60), o comprimento inicial foi registrado em 0 dias (antes do condicionamento em uma câmara de 60 °C e 100% UR) e em 13 semanas. Por fim, no ensaio de prisma de concreto, metodologia tradicional (CPT-38), o comprimento inicial foi registrado em 0 dias (antes do condicionamento em câmara de 38°C e 100% UR) e em 52 semanas. Para cada metodologia de ensaio, a expansão $E(t_i)$ de cada uma das barras foi determinada de acordo com (1):

$$E(t_i) = 100 * (L_{t_i} - L_{t_0}) / L_n \quad (1)$$

Onde:

$E(t_i)$: expansão na idade do ensaio t_i

t_i : idade do ensaio, expressa em dias para o AMBT e em semanas nas metodologias CPT-60 e CPT-38.

L_{t_i} : comprimento da barra entre os parafusos de leitura na idade t_i , em mm

L_{t_0} : comprimento da barra entre os pinos de leitura no tempo 0, em mm

L_n : comprimento efetivo da expansão da barra, em mm

A expansão na idade t_i por amostra de agregado foi obtida como a expansão média de três barras da mesma argamassa ensaiadas simultaneamente, calculando-se previamente o coeficiente de variação por amostra para verificar a precisão entre barras conforme ASTM C1260 (ASTM, 2014). AMBT e conforme IRAM 1700 (IRAM, 2013) para os prismas de concreto.

Calculada a expansão e adotando os limites da Tabela 1, foi determinado o grau de reatividade de cada amostra e analisada a correlação entre os resultados aplicando as três metodologias de ensaio. Para avaliação da expansão pelas diferentes metodologias, o agregado foi extraído de uma mesma amostra, por quarteamento e fracionamento.

4. RESULTADOS Y DISCUSSÃO

4.1 Grau de reatividade de acordo com a metodologia aplicada

A Tabela 5 mostra o grau de reatividade dos agregados decorrente da expansão nas barras de argamassa (AMBT) aos 14 e 28 dias, da expansão em prismas de concreto, metodologia acelerada (CPT-60) às 13 semanas de ensaio e expansão em prismas de concreto, metodologia tradicional (CPT-38) em 52 semanas de ensaio (1 ano).

Nas amostras de agregado graúdo "granito" (numeradas de 1 a 6) no AMBT, as argamassas 1, 2, 3 e 6 apresentaram expansão aos 14 dias menor que 0,10% e aos 28 dias menor que 0,19%. Portanto, nesta metodologia de ensaio, essas amostras são classificadas com um grau de reatividade R0 (não reativo). Os granitos 4 e 5 ultrapassaram o limite de 0,10 % aos 14 dias, sendo ambos classificados com grau de reatividade R1 para esta idade. Porém, adotando a expansão aos 28 dias, a amostra 4 seria classificada como R0 (não reativa) e a amostra 5 como R1. Nas metodologias de concreto CPT-60 e CPT-38, a amostra 1 apresentou expansão inferior a 0,08% e 0,04% (limites de ambas as metodologias, respectivamente) e foi classificada como R0 (não reativa). O concreto feito com a amostra 2 e o feito com a amostra 6 apresentaram expansão acima do limite em ambos, sendo classificados como R1. O concreto com amostra 3 apresentou a maior expansão de todas e foi classificado com grau de reatividade R2 no CPT-60 e com grau R1 no CPT-38.

Nas amostras de basalto (numeradas de 7 a 10), de acordo com a metodologia AMBT, a expansão aos 14 e 28 dias classificou a amostra 7 como R1, a amostra 8 como R3 e R2 (14 e 28 respectivamente) e as amostras 9 e 10 como R3. Nestes últimos foram obtidas duas expansões que ultrapassaram 1% aos 14 dias. Porém, na avaliação do concreto, as amostras de basalto 7, 8 e 9 foram classificadas como não reativas (R0) e a amostra 10 como R1.

Nas amostras de metadolomia (11 e 12), todos os métodos de avaliação classificam a amostra 11 como não reativa (R0) e a amostra 12 com grau de reatividade R1. O seixo rolado (amostra 13) foi classificada com grau de reatividade R1 por todos os métodos.

Nas areias, as amostras 14 e 15 apresentaram o mesmo comportamento, no AMBT e no CPT-38, ambos foram classificados com grau de reatividade R1 e pelo CPT-60 como não reativos (R0). Ambas as amostras provêm de sedimentos do rio Santa Lucía, embora tenham sido extraídas de áreas diferentes.

As amostras das areias 16 e 19 apresentaram um comportamento muito semelhante na expansão, sendo classificadas com grau de reatividade R1, exceto na expansão aos 28 dias no AMBT da amostra 16, que foi um pouco menor que 0,19%, que classificou como não reativo. Ambas as amostras eram da mesma origem (sedimentos do Rio Negro).

As amostras 17 e 18 foram classificadas como não reativas (R0), exceto a CPT-38 da amostra 17, que ultrapassou a expansão de 0,04% ao ano e foi classificada como R1.

Adotando a metodologia CPT-38 como a de maior confiabilidade e considerando os resultados não coincidentes obtidos de acordo com as demais metodologias (células "não" da Tabela 5), observa-se que interpretações errôneas conhecidas como falsos positivos e falsos negativos são alcançadas. Os falsos positivos são agregados identificados como reativos pela metodologia utilizada, enquanto a expansão no CPT-38 é inferior a 0,04% (o que está associado a um comportamento não deletério em serviço). Os falsos negativos, ao contrário, são agregados com expansão desprezível pela metodologia utilizada, mas que apresentam expansão superior a 0,04% no CPT-38 (associado a comportamento deletério em serviço).

Tabela 6. Expansão e grau de reatividade de acordo com metodologias de teste.

Amostra		Grau de reatividade de acordo com a metodologia:				¿Coincide com CPT-38?		
Numeração	Id.	AMBT -14d	AMBT -28d	CPT-60	CPT-38	AMBT -14d	AMBT -28d	CPT-60
1	PR48	R0	R0	R0	R0	sim	sim	sim
2	CM	R0	R0	R1	R1	não	não	sim
3	MA	R0	R0	R2	R1	não	não	não
4	LC	R1	R0	R0	R1	sim	não	não
5	PS	R1	R1	R0	R1	sim	sim	não
6	DA	R0	R0	R1	R1	não	não	sim
7	PD	R1	R1	R0	R0	não	não	sim
8	PB1	R3	R2	R0	R0	não	não	sim
9	PB2	R3	R3	R0	R0	não	não	sim
10	BN	R3	R3	R1	R1	não	não	sim
11	CNC1	R0	R0	R0	R0	sim	sim	sim
12	CNC2	R1	R1	R1	R1	sim	sim	sim
13	CRS	R1	R1	R1	R1	sim	sim	sim
14	AGP	R1	R1	R0	R1	sim	sim	não
15	AGPP	R1	R1	R0	R1	sim	sim	não
16	AGRN	R1	R0	R1	R1	sim	não	sim
17	AFT	R0	R0	R0	R1	não	não	não
18	AFJ	R0	R0	R0	R0	sim	sim	sim
19	AFRN	R1	R1	R1	R1	sim	sim	sim
R0: cor verde. R1: cor alaranjado.					contar "sim":	11	9	13
R2 e R3: cor rosa. "sim": cor verde. "não": cor rosa.					contar "não":	8	10	6

Analisando os resultados que não coincidem com os obtidos no CPT-38, na metodologia AMBT aos 14 dias, oito amostras deram resultados errados (42% das amostras) e considerando a expansão aos 28 dias, dez resultados foram errados (53 % das amostras). Nos agregados graúdos, os falsos negativos desta metodologia pertenceram às amostras de granito (CM, MA, LC, DA) que apresentaram quartzo microcristalino (Qz/mc) como componente reativo. Nas amostras de areia, foi no AGRN que se observou um falso negativo (com Qz/m como componente reativo). Quanto aos falsos positivos da metodologia AMBT, eles estavam em quatro amostras de basalto das cinco amostras ensaiadas. Tanto os falsos positivos quanto os falsos negativos dessa metodologia foram relatados na literatura (Madsen et al., 2018; Torres, 2014; Garber et al., 2005).

Na expansão em prisma de concreto, metodologia acelerada CPT-60, seis amostras apresentaram resultados que não coincidiram com a metodologia tradicional (32% das amostras). Cinco correspondem a falsos negativos, dois em agregado graúdo de granito (LC e LS) e dois em areias (AGP, AGPP e AFT). Todas essas amostras apresentaram quartzo microcristalino (Qz/mc) e quartzo de tensão (Qz/t) como constituintes reativos, para estes deve-se adotar o limite de 0,08 % ao invés de 0,04 % (Tabela 1). Se o limite de 0,04% fosse considerado em vez de 0,08%, haveria três resultados não correspondentes, amostras PR48, MA e AFJ (PR48 e AFJ excederam o limite de 0,04% no CPT-60, mas não no CPT-38).

4.2 Correlación entre los resultados de expansión

A Figura 2 plotou a expansão na metodologia AMBT aos 14 e 28 dias do ensaio vs. a expansão no CPT-38, o que nos permitiu observar a baixa correlação entre ambas as metodologias. Tanto os pontos próximos ao eixo das abcissas quanto os pontos próximos ao eixo das ordenadas apresentam resultados que se desviam da correlação. As primeiras são devidas a amostras de granito (com Qz/mc e Qz/t como componente reativo) e as últimas a amostras de basalto (com presença de Vv). Foram incluídos os resultados em basaltos relatados por Madsen e colaboradores (Madsen et al. 2018), observando-se que duas das três amostras apresentaram baixa correlação (pontos próximos ao eixo das ordenadas).

A norma ASTM C 1778 (ASTM, 2020) define uma área no gráfico de agregado reativo onde há uma boa correlação entre as duas metodologias de ensaio. Dentre os agregados reativos, apenas três se enquadraram na área de boa correlação (AGRN, AFRN, CNC) e apenas três agregados foram classificados como não reativos por ambas as metodologias (AFJ, PR48 e CNC1).

Portanto, a metodologia da barra de argamassa (AMBT) resultou de baixa confiabilidade para avaliar a potencialidade reativa do agregado, embora seja considerada adequada para avaliar a uniformidade de uma fonte de agregado ou para avaliar a capacidade de inibir a reação de uma medida preventiva adotada (ASTM, 2020).

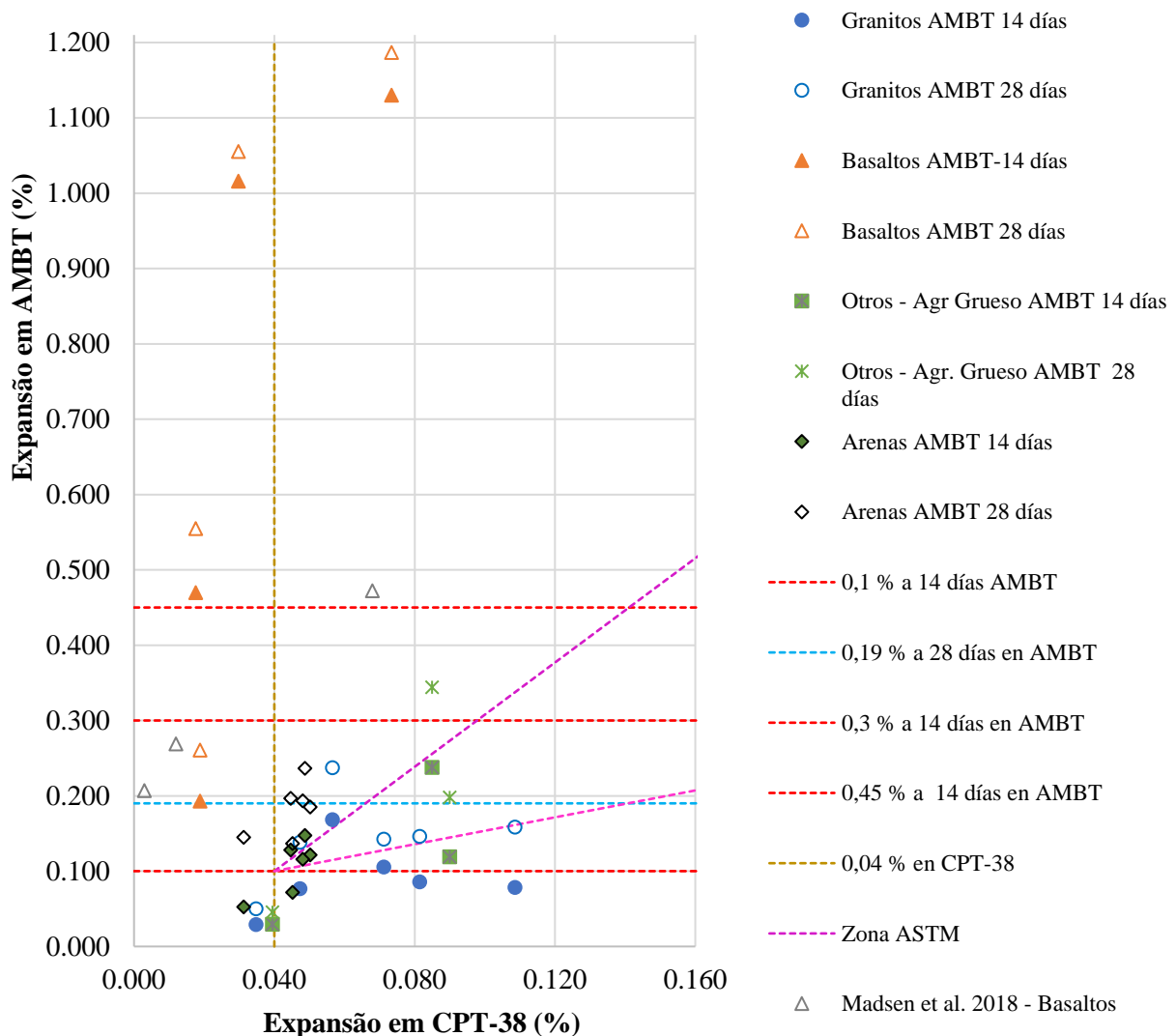


Figura 2. Expansão em AMBT em 14 e 28 dias vs. expansão em CPT-38 em 52 semanas.

A Figura 3 apresenta a expansão do prisma de concreto, a metodologia acelerada CPT-60 vs. a expansão usando a metodologia tradicional CPT-38, incluindo todas as amostras avaliadas. Uma correlação adequada foi obtida entre ambos ($R^2 = 0,78$). O número de amostras por tipo de agregado foi limitado, portanto não foi possível fazer uma linha de correlação para cada tipo. No mesmo gráfico, foram adicionados os dados relatados na bibliografia (Madsen et al. 2018 e Falcone et al. 2012) agrupados por constituintes reativos (Qz/mc, Qz/t, Vv e outros). Os agregados com presença de vidro vulcânico (Vv) (identificados como basaltos) apresentaram uma correlação adequada tanto nos seus próprios dados como nos dados da bibliografia (Madsen et al. 2018 e Falcone et al. 2012). Falcone e colaboradores (Falcone et al. 2012) mostraram que os agregados com a presença de Qz/mc e Qz/t se agrupam mais perto do eixo das ordenadas (pontos em linha preta, sem preenchimento) e a partir daqui recomendaram o limite de 0,08 % para agregados com esses constituintes reativos na metodologia CPT-60 (Tabela 1). No entanto, nossos próprios resultados não mostraram uma tendência semelhante para esse tipo de agregado.

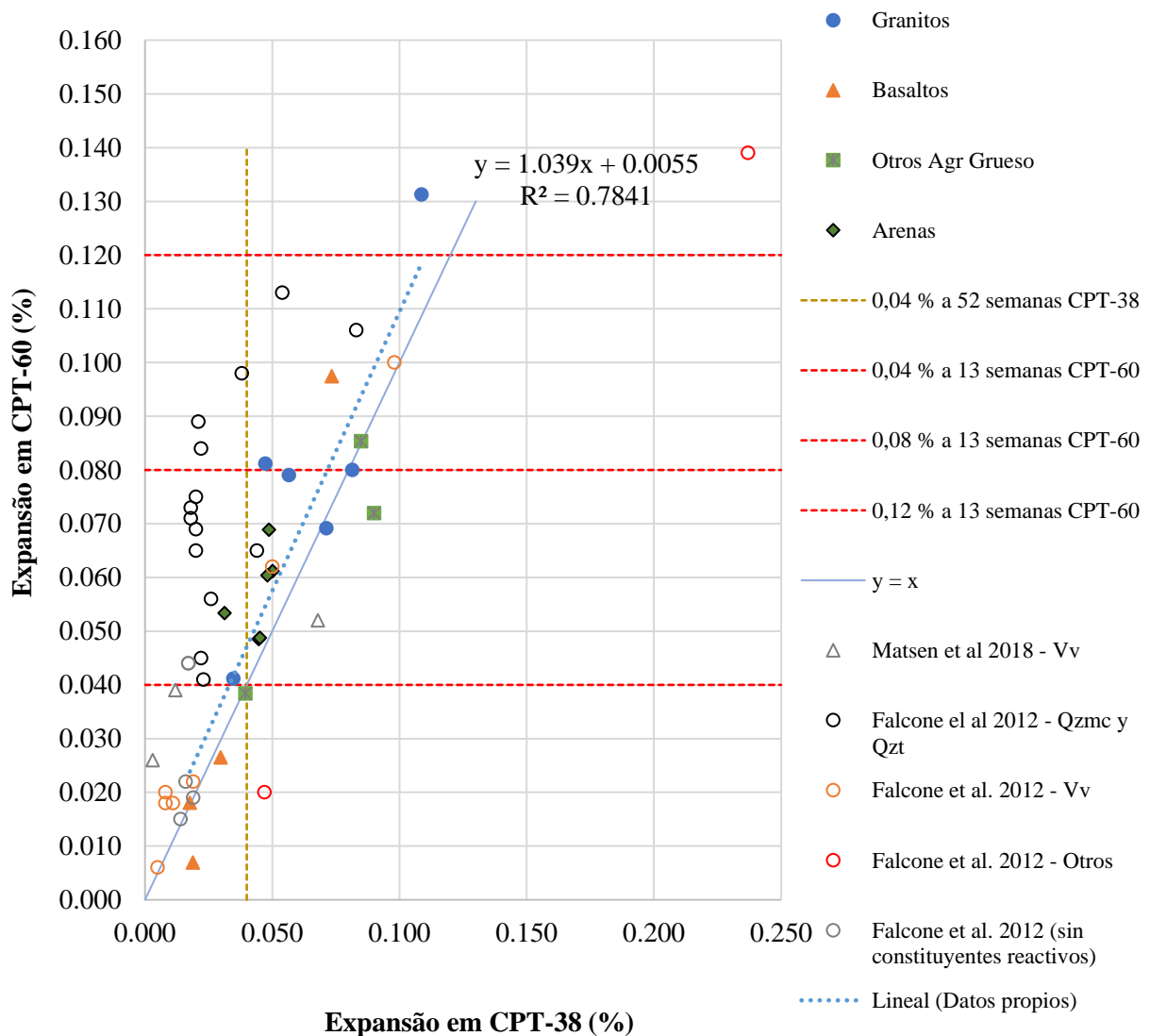


Figura 3. Expansão no CPT-60 a 13 semanas vs expansão no CPT-38 a 52 semanas.

A metodologia de ensaio CPT-60 é relativamente nova, havendo poucas evidências de correlação com as demais metodologias e de correlação com o comportamento do agregado em serviço. Um número maior de registros deve estar disponível para analisar se o limite de 0,08% no CPT-60 em 13 semanas para agregados com presença de quartzo microcristalino ou quartzo tensionado se correlaciona com o limite de 0,04% no CPT-38 a 52 semanas. Nesse sentido, existe outro método de análise proposto pelo RILEM (Nixon e Sims, 2016). Nesta análise, aplicando o modelo matemático conhecido como modelo de Kolmogorov-Avrami-Mehl-Johnson (abreviado modelo KAMJ) são obtidos os parâmetros cinéticos da reação ($\ln(k)$ e M) específicos para o material em estudo e para a metodologia de expansão utilizada. Esses parâmetros estão ligados aos limites de expansão da Tabela 1 e a reatividade da amostra é obtida ((Gowripalan and Sirivivatnanon, 2017; Mangialardi, 2002; Vila et al., 2020; Johnston and Fournier, 2000).

5. CONCLUSÕES

Aplicando as metodologias de ensaio de expansão em barras de argamassa (AMBT) e em prisma de concreto (CPT-60 e CPT-38) em 19 amostras de agregados de diferentes rochas utilizadas para produzir concreto no Uruguai e adotando os limites para definir o grau de reatividade existente em normativas internacionais, pode-se concluir:

- considerando a expansão para 14 dias no AMBT, oito amostras (42%) não resultaram no mesmo grau de reatividade da metodologia tradicional do prisma de concreto CPT-38 (52 semanas de ensaio). Adotando a expansão para 28 dias, dez resultados não coincidiram (53% das amostras). Entre estas encontram-se amostras de granito (com a presença de Qz/mc e Qz/t) e amostras de basalto (com a presença de Vv). Portanto, embora a metodologia da barra de argamassa seja a mais reconhecida para avaliar a potencialidade reativa do agregado, foram observadas importantes limitações de seu uso para esta finalidade.
- Considerando a expansão no CPT-60, seis amostras retornaram resultados que não coincidiram com a metodologia tradicional (32% das amostras). Todas essas amostras apresentaram quartzo microcristalino (Qz/m) e quartzo tensionado (Qz/t). Observou-se uma boa correlação entre a expansão obtida por ambas as metodologias no concreto. No entanto, mais dados devem estar disponíveis para analisar se o limite de 0,08% no CPT-60 em 13 semanas para agregados com a presença de quartzo microcristalino ou quartzo tensionado se correlaciona com o limite de 0,04% no CPT -38 a 52 semanas.
- Dada a correlação entre a expansão de ambas as metodologias de prisma de concreto e o tempo de avaliação necessário para cada uma (13 semanas vs. 52 semanas), sugere-se o uso da metodologia acelerada no concreto para definir o grau de reatividade do agregado. No entanto, devido ao exposto, o limite de expansão dos agregados com a presença de quartzo reativo deve ser estudado em profundidade para reduzir os resultados errôneos desta metodologia.

As conclusões se aplicam aos materiais uruguaios utilizados neste trabalho. Portanto, sua extrapolação para outras condições deve ser analisada com cautela.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto de Estructuras y Transporte (IET) da Faculdade de Engenharia (Universidad de la Republica) pelo equipamento de laboratório necessário e espaço para realizar os ensaios, bem como à Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) e à empresa privada Concrexur S.A. pelo apoio financeiro no âmbito do projeto CSIC: “Estudo da reação álcali-sílica em agregados para concreto no Uruguai”.

7. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). *ABNT NBR 15577-1. Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.*
- ASTM International. (2014). *ASTM C 1260: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).* <http://doi.org/10.1520/C1260-07>
- ASTM International. (2019). *ASTM C 295: Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.* <http://doi.org/10.1520/C0295-08>
- ASTM International. (2020). *ASTM C 1778: Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction.* <http://doi.org/10.1520/C1778-22>
- Falcone, D y Milanese, C. (2012). *Método acelerado del prisma de hormigón. evaluación de la ras con agregados de diversas regiones de la Argentina.* V Congreso Internacional - 19º Reunión técnica de la AATH.
- Fanijo, E., Kolawole, J., y Almakrab, A. (2021). *Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States.* Case Studies in Construction Materials. n° 15. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563>
- Fournier, B., Bérubé, M.-A., Folliard, K., y Thomas, M. (2010). *Report on the diagnosis, prognosis and mitigation of ASR in transportation structures.* Federal Highway Administration.
- Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B., and Thomas, M. (2005). *Preventing ASR/DEF in New Concrete: Final Report.*
- Giovambattista, A., Zerbino, R., Giaccio, G., Fava, C., Milanese, C., Traversa, L., Iloro, F. (2020). *Bases de un código modelo para la tecnología de las obras de hormigón: Anales LEMIT, Serie IV, año 6, n° 13.* (L. Tecnológica, Ed.) La Plata, Argentina. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/11068>
- Godart, B., De Rooij, M., y Wood, J. (2013). *RILEM State-of-the-Art Reports Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures.* <http://www.springer.com/series/8780>
- Gowripalan, N., y Sirivivatnanon, V. (2017). *Kinetic based approach for Alkali Silica Reaction- Comparison of laboratory and field tests Fibre Optic sensors for bridge monitoring View project Applications of FRP mesh as reinforcement View project.* <https://www.researchgate.net/publication/320620011>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1674: Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.* Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 1512. Agregado fino para hormigón de cemento.* Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). *IRAM 1700: Métodos para la determinación del cambio de largo en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado.* Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2016). *IRAM 1531: Agregado grueso para hormigón de cemento Pórtland.* Buenos Aires.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2005). *UNIT 1050:2005. Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado.* Montevideo, Uruguay.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2017). *UNIT 20: Cementos pórtland para uso general - Definiciones y requisitos.* Montevideo, Uruguay.
- Johnston, D., y Fournier, B. (2000). *A kinetic-based method for interpreting accelerated mortar bar test (ASTM C1260) data.* 11th ICAAR:355-364.
- Madsen, L., Falcone, D., Locati, F., Marfil, S., y Rocco, C. (2018). *Estudio de barras de mortero y prismas de hormigón elaborados con basaltos de la provincia de corrientes.* VIII Congreso Internacional - 22a Reunión técnica de la AATH, págs. 211-218.

- Mangialardi, T. (2002). *Reconsideration of ASTM C1260 test results in the light of a recent kinetic model*. *Advances in Cement Research*. 14(2):51-60.
- Marfil, P., Falcone, D., Locati, F., y Marfil, S. (2018). *Evaluación de la potencialidad reactiva de agregados pétreos de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires*. VIII Congreso Internacional - 22a Reunión técnica de la AATH:211-218.
- Méndez, E. (2019). *Estrategia integral de prevención de la reacción árido-álcali*. (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ed.) Gobierno de España. <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/13219/978-84-00-10516-7/estrategia-integral-de-prevencion-de-la-reaccion-a.html>
- Nixon, P., y Sims, I. (2016). *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures* (Vol. 17). <http://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5>
- Sims, I., y Poole, A. (2017). *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World review*.
- Torres, A. (2014). *Estudio Experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Veroslavsky Barbe, G., Ubilla Gutierrez, M., y Martinez Chiappara, S. (2004a). *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales: Mesozoico*. Montevideo, Uruguay.
- Veroslavsky Barbe, G., Ubilla Gutierrez, M., y Martinez Chiappara, S. (2004b). *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales: Cenozoico*. Montevideo, Uruguay.
- Vila, P., Bonjour, H., y Pereyra, M. (2020). *Análisis cinético para la interpretación de los resultados de expansión por reacción álcali-sílice en barras de mortero y de hormigón*. IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica, págs. 221-228.