

# Britas graduadas tratadas com cimento de alto desempenho (BGTCAD): ensaio sobre (e entre) o “velho” e o “novo” com diálogo triádico reformulado

*High performance cement treated crushed stone (BGTCAD): essay on (and between) the “old” and the “new” with reformulated triadic dialogue*

José Tadeu Balbo<sup>1</sup>, Andréia Cargnin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil

Contato: jotbalbo@usp.br (JTB); andreiacargnin@usp.br,  (AC)

## Recebido:

4 de maio de 2023

## Aceito para publicação:

19 de junho de 2023

## Publicado:

12 de dezembro de 2023

## Editor de Área:

Francisco Thiago Sacramento  
Aragão, Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, Brasil

## Palavras-chave:

BGTCAD.  
Formulação da mistura.  
Diálogo triádico.

## Keywords:

HPCTCS.  
Mixture proportion.  
Triadic dialogue.

DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2911

## RESUMO

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) foi no país introduzida em meados da década de 1960 (SP-280). A tecnologia de mistura e parâmetros de dosagem pouco se alteraram desde então, à exceção de limitados trabalhos de pesquisa publicados que exerceram influência em inúmeros projetos de pavimentos semirrígidos elaborados a partir dos anos 1990. Nas últimas três décadas as tecnologias de cimentos e concretos evoluíram para o atendimento de novos desafios e principalmente para superação de limitações técnicas referentes à dosagem, fissuração, aos processos de usinagem e aos métodos construtivos, bem como durabilidade e sustentabilidade das estruturas. A BGTC, contudo, não absorveu novos conceitos para aplicações em pavimentação com materiais cimentícios, visando sanar desempenhos bastante questionáveis observados no material em serviço. Este artigo trata de uma sistematização de conhecimento, na forma de diálogo triádico escrito (conforme proposto pelo educador Gordon Wells da Universidade de Toronto) entre orientador e orientada, para exploração de tecnologia de concreto na busca de BGTC mais durável, aqui de maneira inaugural alcunhada por BGTC de Alto Desempenho - BGTCAD. São apresentados, comentados e discutidos os meios e princípios tecnológicos disponíveis para se obter misturas de elevada resistência e durabilidade. O artigo apresenta uma abordagem orientada por método de aprendizagem comum na área de Educação denominado IRF (*inquire-response-follow up*). São discutidas e exploradas as incorporações de tecnologias de concreto para as misturas de BGTC em face das melhorias de desempenho esperadas, bem como racionalmente enfrentada a questão da relação água/cimento na mistura e suas implicações, apresentando-se um modelo multiplicativo para análise da expectativa de ganho de resistência requerido para misturas de elevada qualidade preservada a essência de uma BGTC para o meio rodoviário.

## ABSTRACT

Cement treated crushed stone (CTCS) was introduced in the mid-1960s in the country. The mixing technology and its parameters changed little since then, except for academic research works that have influenced numerous semi-rigid pavement projects developed from the 90's.



---

In the last three decades, the technologies of cements and concretes have evolved drastically to meet new construction challenges and specially to overcome technical limitations regarding dosage, cracking, mixing processes and construction methods for concrete, as well as the durability and sustainability of structures. CTCS, however, did not absorb new concepts for applications in paving with cementitious materials, aiming to remedy the disheartening performances that even in recent years are observed in service pavements. This article deals with a systematization of knowledge, in the form of a written triadic dialogue (as proposed by the Gordon Wells from University of Toronto) between advisor and PhD student, for the exploration of concrete technology in the search for a much more durable CTCS, in an inaugural way nicknamed as High Performance CTCS, or simply HP-CTCS, in opposition to the original mixture. The technological means and fundamentals available to obtain mixtures of high strength and durability are presented, commented, and discussed. The article presents an original textual approach on the subject, following the inquire-response-follow up methodology used in the education area. The incorporations of concrete technologies for BGTC mixtures are discussed and explored in view of the expected performance improvements, as well as rationally facing the question of the water/cement ratio in the mixture and its implications, presenting a multiplicative model for analysis of the expectation of gain in resistance required for high quality mixtures preserved the essence of a BGTC for the road engineers.

---

## 1. PRESSUPOSTOS PARA UM DIÁLOGO TRIÁDICO NÃO TRADICIONAL

**CP:** O processo de ensino-aprendizagem altera-se em função do nível e estágio do desenvolvimento do estudante, chamado de aprendiz. Tradicionalmente, em todos os níveis, do fundamental ao superior, há certa prevalência e resquício do tradicional método de inquirir (docente), responder (aluno), comentário (reação) sobre resposta (docente). Essa técnica é bem amalgamada e empregada, como por exemplo, em uma primeira aula de Transportes: *Qual o modo de transporte de carga mais relevante no Brasil? Estradas de rodagem! Portanto, houve um descompasso entre o modo rodoviário e ferroviário em um país de extensões continentais.* Nota-se claramente a ocorrência no processo de diálogo uma indagação, uma resposta, e por fim uma ampliação da resposta causada pelo agente de ensino. Tal sistema é empregado também no ensino de ciências (Salloum e Boujaoude, 2019).

**CP:** Essa é uma forma onipresente, em todos os níveis de ensino (Lemke, 1990), onde prevalece a conhecimento primário como despertador do próprio conhecimento, sem que ele seja construído entre ambas as partes dentro do processo. Para alguns é essencial que o conhecimento possa ser construído por meio de um diálogo estabelecido por ambas as partes na qual o estudante tenha suas capacidades intelectuais discursivas e criativas colocadas em ação (Wells, 1993; Nassaji e Wells, 2000). O sistema de diálogo triádico convencional (IRF: *inquire-response-follow up*), se por um lado, é difícil de ser abandonado ou mesmo não possuindo substituto com vantagens significativas, pode ser modificado em esquema construtivista para que os aprendizes tomem parte da ação construtiva, enriquecendo e robustecendo o conhecimento a ser explorado (Nassaji e Wells, 2000).

**CP:** Tradicionalmente, o verbalismo do professor se perfaz de modo austero, onde pesa o conhecimento primário como algo muitas vezes imutável (quicá, equivocadamente, intransponível), como se conceitos não estivessem sujeitos a inversões e sobressaltos, sendo a avaliação final atribuição exclusiva do agente causador do tema discutido: o docente. Desta feita, o aluno não se torna, por meio do método ou processo, de imediato, alguém capaz de adquirir e dar novos sentidos aos conceitos que muitas vezes se revestem

de tradicionalismo depauperado. Também se considera que o IRF deve situar-se entre um ritual e a espontaneidade, levando aluno e docente a fazerem juntos o *homework* (Erickson, 1982), criando uma “estrutura de participação social” no processo ensino-aprendizagem. A contribuição entre interlocutores no processo é enfatizada por Nunn (2000) que propõe a transformação do IRF para um “ritual negociado”, e acrescentando, balanceado.

**CP:** O esquema tradicional é sujeito a muitas críticas na área educacional é aquele sistematizado por ações sucessivas de pergunta-resposta-réplica. Apenas alterando-se o modo de formulação das extremidades é possível que o modelo tenha a eficácia desejada: não mais uma pergunta, e sim uma *provocação*; não mais uma simples resposta tímida, mas uma *reflexão sobre a provocação*; não mais o dogma conclusivo do educador, mas o amálgama entre a provocação e a reflexão. Gourlay (2005) além de corroborar a possibilidade de extensão do esquema IRF com abertura ampla no *follow up* argumenta que “... o Diálogo Triádico pode ser visto como uma estrutura ritualística, com pontos de permeabilidade onde os professores podem iniciar extensões incorporadas e os alunos podem decretar suas próprias agendas pessoais.” (Gourlay, 2005, p. 415). Aqui o conhecedor primário (CP) expõe sua ação em provocar o robustecedor do conhecimento (RC) para tanto construir o diálogo quanto solidificar conjuntamente o conceito explorado.

**CP:** O presente ensaio sobre o aprendizado de uma tecnologia de material de construção rodoviária e aeroportuária (brita graduada tratada com cimento de alto desempenho - BGTCAD) se deu na forma de um *diálogo triádico, escrito*. Wells (Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática, 2016) argumenta que é necessário se erigir o conhecimento de forma colaborativa, de tal sorte a abandonar-se o tradicional monólogo (em salas de aula e em também em textos). Note-se bem que a proposição do referido educador é a expansão para o diálogo escrito, além aulas formais, o que não é algo trivial, pelo simples fato de a (boa) escrita ser o último patamar de uma reflexão profunda. Como não se trata de dom universal, há problemas nessa propositura.

**CP:** Essa forma de construção do conhecimento possui utilidade na *provocação* (pergunta) e *libertação* (resposta muito além do trivial) do aprendiz para o mergulho no conceito, que é posteriormente discutido e matizado (conjuntamente por ambos). Basicamente se pauta por uma discussão ocorrida em passos progressivos (Nassaji e Wells, 2000; Fazio, Heckler e Galiuzzi, 2022), contendo nas etapas, geralmente, fase inicial *provocativa*, seguida de *argumentação* construída pelo pesquisador e finalmente *amalgamada* entre ambos (mestre e aprendiz). Para se evitar o monólogo do velho na estrutura proposta, o novo tem total liberdade de pesquisa e reflexão sem o risco de temor de uma avaliação pós-resultado: somam-se os conhecimentos velho (ou primário) e novos (robustecedores) para a correta construção do conceito desejado. Esta foi a maneira adotada para a orientação da coautora deste artigo para uma rigorosa construção de conceito modificado ou novo, no caso, da BGTCAD, durante seu doutoramento.

**CP:** É a possibilidade de construção da linguagem escrita também atingida a partir do colóquio entre os agentes do processo. Wells (Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática, 2016) também faz apologia

a essa questão expondo sua concepção do que seria “*pensar juntos ao falar e escrever*” (Wells, 2016, citado por Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática, 2016, p. 27), ensejando em seus pensamentos a questão do “*potencial da escrita como um meio de construção colaborativa de conhecimento*” (Wells, 2016, citado por Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática, 2016, p. 27). Assim, a promoção do diálogo no processo ensino-aprendizagem, não se perfaz apenas em salas de aula expositivas ou práticas (laboratórios), mas também na construção de textos técnicos e científicos como contribuições de universalização do conhecimento construído.

**CP:** A forma selecionada para o ensaio sobre a BGTCAD no texto desafia os autores e forja meta importante, além de procurar encadear a questão técnica de forma mais lúdica e não doutrinal ou magistral, qual seja, de alunos “*atuarem como defensores do poder do diálogo como um dos principais meios de aprendizagem em todos os níveis de ensino*” (Wells, 2016, citado por Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática, 2016, p. 89). Fazio et al. (2022) afirmam, recentemente que, aplicação dos conceitos de ensino-aprendizagem propostos por Wells dão indicativos de que “*...os aspectos que se mostram em relação aos contextos em que a indagação dialógica de Gordon Wells é integrada fornecem pistas para que seja possível compreender o desenvolvimento profissional em um viés dialógico, social e colaborativo em ambientes com sujeitos diferentes*” (Fazio et al., 2022, p. 57).

**CP:** No diálogo deste ensaio as letras **CP** e **RC** na linguagem acadêmica da Educação, representam personagens, respectivamente, orientador e orientada, sendo colocadas antes de parágrafos ou mesmo no subtítulo individualizando o ensaio discursivo escrito. Tecnicamente, esta peça representa uma série de discussões pertinentes aos aspectos caliginosos sobre o tema que não foram colocados com a merecida evidência em textos técnicos anteriores (até finais de 2022). As instigantes colocações do orientador buscam criar o vínculo entre o objeto do estudo pela discípula e o conhecimento adquirido no estudo de doutrinas relacionadas a cimentos e compósitos cimentícios, procurando estabelecer o inexorável vínculo necessário entre a formação concedida por cursos de pós-graduação e o objeto do estudo, da pesquisa, da tese de doutorado.

## **2. ESCLARECIMENTOS SOBRE A EVOLUÇÃO DA BGTC E A PROPOSTA DE ABORDAGEM OFERECIDA**

### **2.1. Formulação tradicional da BGTC e seu desempenho**

**CP:** Em 2018 tive oportunidade de ouvir de um engenheiro que BGTC (britas graduadas tratadas com cimento) construídas por sua equipe não fissurava. Argui (atônito e simultaneamente incrédulo): “*Nem por retração de secagem?*” Resposta negativa. “*Fadiga?*” Nunca ocorrera em suas obras. Ora, o pote de moedas de ouro no fim do arco-íris poderia ter sido finalmente encontrado. Tal espectro descontínuo de iluminação consiste em segredo aparentemente bem selado. Embora meu argumento na discussão fosse buscar substanciais melhorias para a BGTC, de modo transgressor ao *status quo*, a

opinião obstinada oposta era contundente: nada deveria ser alterado. Não fora exatamente o que vinha observando desde a década de 1980 em diversas rodovias brasileiras, com BGTC denotando sofrível desempenho. O grande problema da predicação, na tradição oral portuguesa, é exatamente quem concebe não o colocar no papel, o que não gera utilidade para o aprendizado em país com tantas carências tecnológicas.

**CP:** A forma de concepção do artigo, como ensaio em três partes, teve sua justificativa exposta no item 1. O objetivo *técnico* desse artigo, fruto de pesquisa e de longas reflexões, foi gerar e expor o conhecimento atualmente necessário para a formulação e elaboração de BGTC de alto desempenho, solidificando parte do processo evolutivo na engenharia e no próprio ensino. O ensaio descortina o caminho técnico para as mudanças. Mesmo porque “*verbum volat, scriptum manet*” (em português: “A palavra é esquecida, a escrita é perene”). Ou, concluindo: “*Verbum non scriptum est verbum mortuis*” (em português: “Palavra não escrita é palavra morta”). Nossa contrariedade a posições tradicionalistas e conservadoras sobre a BGTC é que elas têm falhado no acolhimento de tecnologias contemporâneas, haja vista que a BGTC:

- Por ser compósito cimentício está sujeita, inexoravelmente, à fissuração de retração; o que tem sido feito nos últimos anos para mitigar tal fenômeno em BGTC; creio ser a (mistura) CCR (concreto compactado com rolo) importante para a BGTC, embora possa não parecer. CCR fissura. Opostamente ao que se ignora;
- Possui coeficiente de expansão térmica ( $10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{mm/mm}$ ) que, ao sofrer deformações durante e após secagem (o que é natural com as variações climáticas sazonais), faz a BGTC plenamente suscetível a níveis de deformações além de sua deformação de ruptura [0,05 ‰ em tração; Balbo (1993); Balbo e Badawy (1993)]; de tal sorte que a fissuração por variações térmicas é processo inaproveitável e indisputável;
- Trabalha como placa em flexão. Em fase inicial definidas pela largura da faixa e pela distância entre as sucessivas fissuras de retração. Posteriormente, diminuem de comprimento por rupturas transversais centralizadas, em processo paulatino de fadiga; caso a resistência estática à tração for baixa, menor do que já se afere com 4% de consumo de cimento (aproximadamente  $85 \text{ kg/m}^3$ ), ocorrem essas partições transversais sucessivas de forma célere (comum para BGTC com 2 a 3% de cimento em peso, chamadas de “BGM” (brita graduada melhorada com cimento) – melhoradas, de fato? Deixar-se-á cristalino no presente texto). Quando as partições possuem comprimento inferior à largura de compactação, o processo de fadiga se manifesta por meio de partições longitudinais nessas placas. A partir daí, rumo à fase final, desencadeando a formação de blocos por partições sucessivas. A moagem dos blocos vai ocorrendo de modo mais paulatino pois eles não trabalham mais em flexão, e sim em deflexão (como verdadeiros pavimentos em blocos!);
- A bem da verdade possuindo ligante hidráulico não melhora uma BGS (brita graduada simples); antes, a modifica, a transforma em outro material, onde resistência ao cisalhamento e atrito interno entre grãos torna-se aspecto menos relevante; inútil então pensar em “melhorar” com cimento, mesmo porque, o efeito poderia ser contrário;
- Sendo camada com extrato superior em concreto asfáltico, aderido, deverá esse revestimento suportar a todos esses quebradiços desaforos impostos pela BGTC.

**CP:** Cabe, destarte, aos engenheiros de pesquisa considerar sobre a necessidade de aumento de durabilidade da BGTC; opostamente, a solução não é sustentável ambientalmente, dadas suas necessidades e complexidades de manutenção. A BGTC tradicional, aqui cognominada por BGTC-retrô, não é sustentável, pois exige manutenção em curto prazo, e um pavimento sustentável é sobretudo aquele que, fosse qual fosse sua estrutura, exigisse muito baixo nível de manutenção. Assim, o posicionamento que se toma nesta discussão é da iminente utilidade de garantir melhor resistência à BGTC aos carregamentos externos, estáticos e dinâmicos, bem como considerar outros agentes de degradação plausíveis, para ensejar rodovias de alta durabilidade.

**CP:** Este artigo apresenta uma discussão tempestiva de como as tecnologias de ligantes hidráulicos e de concretos, uma vez encampadas à dosagem racional da BGTC, abrem caminhos na direção da formulação da BGTCAD, em contraposição à continuidade do emprego da “BGTC-retrô”. Uma de suas contribuições é sua articulação para suscitar a consideração da Tecnologia de Concretos no meio rodoviário, na busca de um material de elevada qualidade e durabilidade, descortinando e oferecendo caminhos a serem considerados por pesquisadores interessados no tema, que não são poucos. Porém, sua forma de apresentação, em que pese se tratar de artigo técnico, apoia-se em encaminhamento alternativo e não tradicional, conforme se elucidou na introdução.

## 2.2. Desafio: diminuir a relação rigidez/resistência da BGTCAD

**CP:** A resistência de concretos (não armados), plásticos ou secos, é sempre formulada com base em sua resistência à tração na flexão -  $f_{ct}$ ,  $f$  (ABNT, 2014), haja vista as placas trabalharem em flexão como camadas de base de pavimentos. A resistência à tração está intimamente relacionada à *zona de transição interfacial* (aqui chamada ITZ, em inglês) entre a argamassa/pasta e os agregados; essa zona é muito afetada pela porosidade quando se trabalha com umidades de compactação superiores a cerca de 1,5 a 2% pontos abaixo da umidade ótima de compactação (Balbo, 1993). Melhoria na resistência pode ser também adquirida com arranjos granulométricos mais empacotados e simultânea distribuição homogênea da escassa argamassa na BGTC: portanto, condicionada à melhor adesão e resistência da própria pasta/argamassa na ITZ, onde a relação água cimento local é elevada em relação àquela nominal ( $w_{ot}$ /consumo de ligante em peso).

**CP:** BGTC e CCR apresentam relação a/c elevada em comparação a concretos plásticos: em geral, 100% superiores. BGTC e CCR não se sujeitam à lei de Abrams dentro de certos limites. A chave de uma seleção conveniente do ponto de vista técnico-econômico para esses materiais é a conjugação do binômio resistência-espessura. No dimensionamento de uma camada de pavimento (não armada) que responde como placa não é lícito raciocinar de maneira diferente. Contudo, quando se fala de concretos plásticos, centenas de trabalhos indicam relação explícita entre módulo de elasticidade e resistência do concreto, crescente, como por exemplo em  $E_{ci} = \alpha \cdot 5600 \cdot (f_{ck})^{0,5}$  ( $E$  = módulo de elasticidade inicial;  $\alpha$ =fator de correção em função da natureza do agregado;  $f_{ck}$  = resistência característica à compressão). O aumento de módulo de elasticidade em decorrência do aumento da resistência do concreto não é algo

absolutamente favorável pois as tensões em flexão são dependentes linearmente das deformações específicas em função direta da rigidez, conforme lei de Hooke generalizada.

**CP:** Em BGTC-retrô é comum o consumo de cimento de 4%, sendo cabíveis (aos 90 dias) valores *em laboratório* de  $E = 22.000$  MPa e  $f_{ct}, f = 1,1$  MPa (Balbo, 1993; 2006). A relação módulo/resistência oferecida pelo material é 20.000. Em pista, para o mesmo material, obtém-se comumente  $E/f = 17.000$ . Levando-se em consideração tais parâmetros, a moderna tecnologia de concretos permite outros cenários. Por exemplo, chega-se fácil (em laboratório) para uma BGTC com 5% de cimento em peso e distribuições de grãos mais bem empacotadas a 30 GPa e 3 MPa, para os parâmetros mencionados, com relação  $E/f = 10.000$ , duas vezes inferior à BGTC-retrô. Uma alteração desse montante, em pavimentos de mesmas espessuras, estruturas e materiais, para o mesmo tráfego, levaria a durabilidade duas vezes superior, em tese. Essa é a BGTCAD procurada. Tais parâmetros sofrem alterações se adotado valor de tensão de tração na flexão (Balbo, 2013).

**CP:** A durabilidade contemplada exclusivamente à luz da microfissuração evolutiva do material é tratada por mecanismo de danificação por fadiga. Há outros mecanismos com importância diferenciada para consideração de durabilidade de misturas cimentadas em bases de pavimentos, todavia, que serão apresentados e discutidos nesse artigo. Métricas de durabilidade à fadiga podem ser expressas por uma função calibrável  $N = k \cdot (RT)^c$  onde  $RT$  é a relação entre resistência à tração e tensão de tração aplicada ( $f_{ct}, f / \sigma_t f$ ). Assim, em cascata, quanto mais reduzida  $f_{ct}, f$ , menos durável é o material (o parâmetro  $N$  diminui), se  $\sigma_t f$  é constante; quanto maior  $f_{ct}, f$ , mais durável o material se  $\sigma_t f$  é constante; quanto menor  $\sigma_t f$  mais durável o material; quanto maior  $\sigma_t f$  menos durável o material; se o módulo de elasticidade aumenta,  $\sigma_t f$  aumenta e nada colabora se  $f_{ct}, f$  não aumentar ao menos proporcionalmente.

**CP:** Assim, em decorrência do exposto nesse item, como  $\sigma_t f$  é proporcional à rigidez ( $D = E \cdot h^3 / (12 \cdot [1 - \nu^2])$ ), requer-se encontrar meios para que, mantido ou pouco alterado o módulo de elasticidade da BGTC, obter-se resistência significativamente maior, se possível dobrada. Isso mudaria o cenário de projeto de pavimentos semirrígidos com BGTC.

### 2.3. A BGTC-retrô é aterrorizante (por seu pífio desempenho)!

**CP:** Há décadas tenho me referido por várias vezes, publicamente, em aulas e palestras sobre a BGTC-retrô, como sendo o nome mais oportuno para o material aquele de “*brita gretada terror de camada*”. Em qual contexto a BGTC-retrô se torna uma BGTC-terror? O grande problema de qualquer camada cimentada é sua fissuração, degradação e maceração em fases sucessivas ao longo de sua vida de serviço, tenha-se presente, um material de base, *enterrado* sob o revestimento. A formação de blocos na fase intermediária do processo de fadiga do material implica na propagação célere dessas fissuras verticais entre faces de partes da BGTC (fraturada) para o revestimento asfáltico, imputando-lhes, *funestamente*, um desempenho de blocos, trabalhando como peças isoladas e não como meio elástico contínuo (ainda que um pensamento imperfeito!) ou placas em flexão (ainda que um pensamento condizente!); deflexões se exacerbam e água percola entre as fissuras, contaminando suas entranhas: um cenário perfeito de horror rodoviário para usuários e engenheiros.

**CP:** Ponderadas tais ideias, a BGTC pode ser entendida como um “terror de camada”, pois, sendo *irrestaurável* como contínuo elástico, exige ciclo ações de manutenção complexas e financeiramente impactantes. A relação  $E/f$  (à tração) de um concreto convencional para pavimentação tangencia 6.000; a BGTC-retrô oferece duas a três vezes tal valor. É evidente que para a mesma carga sua durabilidade é sofrível e não poderia se comparar a concretos tradicionais (plásticos ou secos). Isso é um “terror” em termos de durabilidade à fadiga! Mister reduzir  $E/f$  do material. Meta propositiva conforme Equação 1:

$$\left[ \frac{E}{f_{ct,f}} \right]_{BGTCAD} = \beta \times \left[ \frac{E}{f_{ct,f}} \right]_{BGTC-retrô}, \text{ sendo } \beta \leq \frac{1}{2} \quad (1)$$

**CP:** Quando se formam pontos de ligação entre os agregados, cristais sólidos, os ensaios em tração permitem estabelecer o parâmetro de ligação entre tensão e deformação. Os agregados minerais pétreos britados possuem  $E$  elevados, que são o dobro, ao menos, de  $E$  em tração da BGTC. A pasta de cimento ou argamassa, possui  $E$  inferior ao módulo do concreto. Ora, temos aqui uma articulação entre as fases: a ITZ, que comanda a deformação maior no material, é o foco de medida modular em tração. Assim, com menor consumo de ligante, ainda existindo pontes de ligações nodais, o módulo de elasticidade da BGTC não se altera demasiadamente. E aí encontra-se o perigoso engano na redução do consumo de cimento para 2%, 3%, na BGTC, aquém dos já duvidosos 4% tradicionais ultrapassados da BGTC-retrô.

## 2.4. Pressupostos para a formação do pesquisador para o tema BGTCAD

**CP:** Em nossa formação pessoal, para quem desejava submergir em pélagos da pavimentação com ligantes hidráulicos, não teria sido conveniente estudar com sagacidade materiais pouco ligados ao problema basilar. Isso revelou-se acertado pois permitira entender o que seria a misteriosa ITZ e seus segredos; e a recôndita questão do potencial eletrocinético; que agregados não eram inertes; que várias reações químicas degradariam a pasta; ter lucidez sobre a forma de hidratação de silicatos de cálcio e de ferro-aluminatos. Essa experiência levou a considerar que discípulos labutando em nossas linhas de pesquisa deveriam ter a acertada oportunidade de estudar com profundidade os ligantes hidráulicos e suas microestruturas. A orientada de doutorado (coautora deste artigo) cursou, em sua pós-graduação, disciplinas correlatas ao tema: *Técnicas de Caracterização Aplicadas a Materiais de Construção Civil, Ciência dos Materiais Aplicada aos Ligantes Inorgânicos e Compósitos de Matrizes Cimentícias para a Construção Civil*. Assim estaria apta ao diálogo sobre um tema ainda árido ou glacial.

## 3. O ENSAIO: DIÁLOGO ESCRITO SOBRE COMO FORMULAR UMA BGTCAD

### 3.1. A BGTC-retrô é uma construção humana em processo de melhorias

**CP:** Para enriquecer nosso diálogo escrito, gosto de pontuar uma reflexão minha que retenho importante para quem pesquisa. Temos a obrigação de manter mentes abertas e receptivas e evitarmos o obscurantismo e a negação inculta. Dogmatismos não ajudam e



levam à *kafkiana* autoconvicção, por exemplo, de que a BGTC não fissura. A BGTC passou e deve passar continuamente por tais processos, pois cimentos ecoeficientes em breve nos darão oportunidades de reconstruir, novamente, o conceito.

**RC:** Embora na década de 1990 cerca de 45% das principais rodovias francesas possuísem pavimentos com BGTC ou britas tratadas com escórias (Corté e Goux, 1996), problemas de reflexão de fissuras de retração e de intensa fissuração por fadiga haviam causado frustração, exigindo adoção de práticas que superassem as dificuldades (Bonnot et al., 1991; Balbo, 1993). Experiência semelhante foi vivenciada pelos espanhóis que começaram a utilizar a BGTC na década de 1960, abandonando a técnica por três décadas, até finais dos anos 2000, devido aos problemas persistentes de fissuração (Llamazares Gomez, 1971; Ferruelo, 2010).

**RC:** Contudo, diante da incapacidade de estruturas flexíveis suportarem certos níveis de tráfego, órgãos rodoviários retomaram a utilização da BGTC (Ferruelo, 2010). Para tanto, tal como os franceses, os espanhóis passaram a empregar técnicas de controle de fissuras de retração aliadas ao emprego de camadas de maior espessura e novos protocolos de dosagem. Mais recentemente foram desenvolvidos na Europa uma série de ligantes hidráulicos especiais para a estabilização de granulares, denominados *ligantes hidráulicos rodoviários* (LHR), conforme EN 13282-1 (CEN, 2013) e EN 13282-2 (CEN, 2015). Tais ligantes possuem percentuais elevados de adições substituintes do clínquer, adotando-se ligantes com desenvolvimento de resistência lento, menos retráteis.

**CP:** Fique claro que a tecnologia francesa atual emprega BGTC mais argamassada (= concreto!) que desenvolve baixo calor de hidratação, com retração de secagem mitigada. Para exemplificar de maneira contundente, uma empresa fornecedora de material usinado propõe alteração de BGTC para “*extérieur béton grave ciment*” (Garrouste Béton, 2022) definindo-o e comercializando-o como “*un béton maigre employé pour l’entretien et la réalisation des assises de chaussée*”! (Garrouste Béton, 2022). Expondo o histórico do uso da BGTC, Balbo (1993) trouxera uma diferenciação clara entre os conceitos no dito material (franceses) e do CCR (dos ingleses).

**CP:** O resgate histórico apresentado à época demonstrou cabalmente que nos anos 1980 os franceses admitiam inúmeros casos de comportamento medíocre das *graves-cement* (BGTC); de modo diametralmente oposto, os ingleses se gabavam do desempenho muito satisfatório dos *lean concretes* em bases de pavimentos. Em finais da década de 1990 ficava claro, por meio da leitura de artigos técnicos na revista *Rutas*, que os espanhóis haviam absorvido a tecnologia britânica. Hodiernamente, franceses empregam um CCR “peculiar” e de alta tecnologia comparado às técnicas inglesas tradicionais. *Graves-ciment* é apenas um nome mantido, para referenciar e referendá-lo ufanando-se de sua antiga “invenção” (gaulesa) que, obsoleta, absorveu a essência anglicana.

### 3.2. Acometimento da BGTC por íons: possível? Como e quando?

**CP:** Misturas cimentadas, quando empregadas em ambientes agressivos, ficam sujeitas a processos físico-químicos que podem afligir a durabilidade das estruturas. Pensa-se aqui nos casos de pilares em plataformas de atracação em portos e pilares e fundações de

pontes em determinados ambientes urbanos não saneados, bem como industriais. Situações desse tipo podem e devem ser pré-avaliadas em projetos de pavimentos que tenham BGTC em sua base ou sub-base. Teríamos de levar novas luzes às especificações técnicas, alertando, encampando as tecnologias de adições e aditivos para combate às agressões externas. Essas investidas do ambiente são dependentes da acessibilidade de fluidos à microestrutura do material, somando-se à fraturação como processos de desmantelamento da camada cimentada.

**RC:** O conceito de durabilidade de estruturas de concreto está relacionado à capacidade do material manter sua integridade e desempenho adequado em serviço durante longos períodos de exposição a um ambiente que apresenta certo grau de agressividade. As discussões sobre durabilidade estão relacionadas à exposição a ambientes aquosos (águas de rios, marinhas, tubulações de esgoto), exposição atmosférica em ambientes com diferentes graus de urbanização e estruturas enterradas, que são as condições preponderantes na definição das classes de agressividade ambiental preconizadas pela ABNT (2014). A água enquanto agente de deterioração de compósitos cimentícios, se destaca por dissolver substâncias, razão pela qual pode introduzir substâncias nocivas no compósito, sob a forma de íons e gases diluídos, tais como sulfatos (Neville, 2004), cloretos, gás carbônico, álcalis etc. Tais substâncias são capazes de desencadear reações que modificam a microestrutura da pasta de cimento, degradando-a. A BGTC poderá estar sujeita a diferentes processos de degradação em contato com fluidos que contém substâncias nocivas à matriz cimentícia.

**RC:** As possíveis fontes de fluidos nos pavimentos provêm de: (1) infiltração pelas aberturas (juntas, fissuras, porosidade) na superfície; (2) percolação por elevação de níveis freáticos; (3) capilaridade devido à tensão de sucção oriunda de gradiente de umidade; e (4) movimentos de vapor devido a variações térmicas nas camadas do pavimento (Suzuki, Azevedo e Kabbach, 2013). Sabe-se que a pasta de cimento sólida é composta principalmente por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), portlandita<sup>3</sup>, etringita e monossulfato de cálcio em equilíbrio estável, devido ao elevado pH da solução (entre 12,5 e 13,5 dependendo da concentração de álcalis na pasta). Por essa razão, Mehta e Monteiro (2008) apontam ambientes com pH < 12,5 agressivos ao material. Destarte, potenciais reações da pasta de cimento com fluidos são: (1) hidrólise dos componentes da pasta; (2) trocas catiônicas; e (3) formação de produtos expansivos (Mehta e Monteiro, 2008; Isaia, 2011), com destaque ao ataque por sulfatos e à reação álcalis-agregado.

**RC:** Águas consideradas puras e moles provenientes de condensação de neblina e pluviais possuem concentração muito baixa ou inexistente de íons de cálcio; elas hidrolisam os produtos de hidratação que contenham cálcio. Dessa forma, o equilíbrio químico é rompido e o hidróxido de cálcio é primeiramente atacado devido à sua elevada solubilidade (Mehta e Monteiro, 2008; Isaia, 2011; Wang, Yuan e Deng, 2019). Quando a solução atinge equilíbrio, a hidrólise cessa, exceto quando há fluxo corrente para diluição contínua. Como consequência há um aumento da porosidade e permeabilidade do material, diminuição da alcalinidade, perda de rigidez e resistência, e acelerando sua degradação (Cheng, Chao e Lin, 2013; Tang et al., 2018). Mehta e Monteiro (2008)

salientam que as trocas catiônicas entre a solução agressiva e a pasta de cimento formam sais de cálcio (ataque por ácido clorídrico, sulfúrico ou nítrico) ou de magnésio. Formação de sais de cálcio solúveis ocorre em meio a soluções ácidas em efluentes industriais, cujos ânions reagem com o hidróxido de cálcio. Íons cloro livres em águas salgadas complementam o cenário.

**RC:** Águas efluentes de lençóis freáticos que tenham tido contato com resíduos em decomposição podem apresentar elevadas concentrações de gás carbônico, formando ácido carbônico. Este, reagindo com  $\text{Ca(OH)}_2$  (da pasta), forma carbonato de cálcio insolúvel. Para que a reação prossiga, é necessária a presença de  $\text{CO}_2$  livre na água. Atendida tal condição haverá transformação do carbonato de cálcio em bicarbonato de cálcio solúvel. Também poderá ocorrer expansão pela formação de gipsita por trocas catiônicas. Nesse caso, o grau de severidade do ataque por sulfato dependerá da natureza do cátion associado à solução de sulfato, com o ataque ao hidróxido de cálcio e ao C-S-H, cristais responsáveis pela rigidez e resistência.

**CP:** Ainda nesse tema tem-se a questão da percolação de fluido, potencialmente agressivo, pelo material, em situação eventual, que pode se repetir com assiduidade ou esporadicamente. Combinada a agressão causada por cloretos e sulfatos, por exemplo, com a microestrutura (porosa) da BGTC, tem-se que reconhecer que há características resultantes de seleção de materiais e de grau de compactação empregado em pista que podem se associar, no bojo dessas potenciais reações químicas adversas, de maneira a favorecê-las ou, opostamente, agir como meio de inibi-las ou mitigá-las. Porém, poucas características microestruturais da BGTC são discutidas na literatura internacional atinente. Considera-se assim que a BGTC como camada de pavimento deve ser diferentemente pensada em situações de contato com águas sulfatadas e águas marítimas (íons cloretos).

### 3.3. Reatividade de matriz pétrea vilipendiada nas especificações

**CP:** Os episódios de reações expansivas em concretos, mesmo de pavimentação, são relatados inclusive na literatura nacional (Munhoz, 2007), em pátios de estacionamento de aeronaves no Aeroporto Governador Franco Montoro. A identificação do problema tem por base a formação de “casca de tartaruga” na superfície do concreto. Certas espécies de reações expansivas ocorrem sobejamente quando o fornecimento de água é abundante (como no caso dos pavimentos, constantemente expostos às intempéries). Resulta em pequena queda resistência à compressão, mas redução de módulos de elasticidade. Isso incorreria em tensões mais elevadas sobre camadas inferiores, potencialmente violando premissas do projeto. Essa preocupação é, quando desperto o engenheiro de projeto, minimizada, com emprego de adições ou aditivos na mistura.

**RC:** Álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) no cimento podem estar presentes tanto na forma insolúvel (nas fases sólidas do clínquer) como solúvel (nos sulfatos). Hasparyk (2005) e Mehta e Monteiro (2008) destacam que são os íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), presentes em elevada concentração devido à grande quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante a hidratação dos silicatos, responsáveis por reagir com agregados, causando quebra da estrutura de

silicosa (RAA). Subsequentemente, os álcalis de sódio e potássio são adsorvidos ao gel formado e, como seus hidróxidos são solúveis, permitem que íons hidroxila sigam entrando na solução nos poros, dando progresso à reação. É consenso que, para ocorrência de RAA, seja necessário o atendimento de três condições básicas: (1) ocorrência de fases reativas do agregado, condicionada pelo grau de desordem de sua estrutura cristalina; (2) presença de alcalinidade ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros; e (3) presença de umidade suficiente, o que ocorre em pavimentação [ao menos 30% da água superficial infiltra para dentro da estrutura; Suzuki, Azevedo e Kabbach (2013)]. Cabe salientar que a reação entre os álcalis e as fases reativas do agregado isoladamente não é imperativa para a ocorrência da expansão e degradação do material; concomitantemente ao progresso da reação, a presença de umidade é essencial para o estabelecimento do fenômeno expansivo (Hasparyk, 2005; Giaccio et al., 2008; Cunha e Cincotto, 2008; Johnson et al., 2017; Prado et al., 2019).

**RC:** Considerando a concepção da BGTC com consumos de cimento muito aquém daqueles empregados para a produção de concretos plásticos, entende-se que a fonte de álcalis fica limitada ao teor de álcalis no cimento (teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  inferior a 0,6%) ou provenientes de outras fontes (água de amassamento, águas superficiais ou subterrâneas, aditivos químicos, agregados contendo álcalis). É importante destacar que a RAA ocorre em estruturas com menor consumo de cimento, como em barragens construídas com CCR consumindo de 100 a 120 kg(cimento)/ $\text{m}^3$ . Restrição ao emprego de agregados reativos e limitação de teor de álcalis nos cimentos empregados (ABNT, 2018) são práticas bem assimiladas para o CCR. Adições pozolânicas como sílica-ativa e metacaulim combatem RAA quando há agregados reativos (Cunha e Cincotto, 2008; Celik et al., 2015).

### 3.4. Carbonatação da BGTC? Verossímil?

**CP:** Quando se pensa em materiais cimentícios na construção civil, em áreas urbanas poluídas, recorda-se o fato de que a penetração de água por fissuras e poros, no caso do pavimento, atingindo a camada de base cimentada, permite-se a consolidação de películas de umidade internas. Ora, água dissolve cálcio, o que gera a formação de dióxidos de cálcio. Por outro lado, ocorrendo oportunidade, o dióxido de carbono também entra por fissuras e poros, reagindo com água livre e formando ácido carbônico. Portanto, fica montado o cenário preocupante quando este ácido carbônico reagir com o hidróxido de cálcio, precipitando sais cristalizados de carbonato de cálcio. Esse episódio pode ser pensado como agente complementar de degradação.

**RC:** Cascudo e Carasek (2011) definem o fenômeno da (reação de) carbonatação como a transformação de íons alcalinos de sódio, potássio e cálcio em sais de carbonato pela interação com o dióxido de carbono. O  $\text{CO}_2$  ao penetrar nos poros da estrutura de concreto é dissolvido, reagindo com íons  $\text{Ca}^{2+}$  provenientes de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$ . A carbonatação (essencial) se dá com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por ser mais solúvel. Reação que é acompanhada por queda do pH ( $< 8,5$ ) na solução dos poros pela remoção dos álcalis por lixiviação, favorecendo a formação do ácido carbônico ( $\text{HCO}_3^-$ ). Cabe salientar que as reações de carbonatação tendem a ser lentas. O ácido carbônico também pode estar presente em

águas subterrâneas [águas alcalinas com  $\text{pH} < 7$  como indicativo temerário da concentração de  $\text{CO}_2$ ; Mehta e Monteiro (2008)] com matéria em decomposição, resultando em elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$ , favorecendo formação de carbonato de cálcio. Existindo  $\text{CO}_2$  livre na água a reação prossegue. A BGTC coberta por revestimento asfáltico apresentaria frente de carbonatação minimizada, mas suspeições quanto a águas alcalinas devem ser consideradas.

**CP:** Entende-se, portanto, que a carbonatação na camada de BGTC depende da movimentação ascensional de fluido por capilaridade, sendo que fluidos de maior acidez expõe o material a tal possibilidade, fato que deve ser considerado caso a caso, *vis a vis* da necessidade de garantia de durabilidade (estabilidade) química de sua microestrutura. Há regiões brasileiras que se caracterizam pela alcalinidade de águas subterrâneas (ex.: rochas basálticas).

### 3.5. Formulação da BGTC: a controversa questão da água de amassamento

**CP:** A BGTC-retrô não é especificada em normas nacionais em termos de dosagem da quantidade de água. Limitam-se a estabelecer o proporcionamento da BGTC na umidade ótima (tem-se em torno de 5% a 6% em peso de água na mistura). Quando se emprega 4% de cimento (BGTC-retrô) a relação  $a/c$  é 1,25. Naturalmente, recorre-se às questões advindas dessa elevadíssima relação  $a/c$  para um material que seria correspondente a um concreto seco (CCR). Ligantes hidráulicos convencionais (Portland) demandam  $a/c$  0,22 para sua completa hidratação; naturalmente, há mais água na mistura por razões de perdas, amassamento e adensamento, comprometendo a resistência.

**CP:** Na BGTC obtém-se maiores resistências à tração para dosagens com umidades na faixa de 1,5 a 2% abaixo da umidade ótima (Balbo, 1993), no ramo seco da curva de compactação. Ocorre faixa tênue onde resistência da BGTC é comandada quase que exclusivamente pela umidade de compactação, pouco importando a pequenina perda de peso específico, pois a *curvatura* nas proximidades do vértice (ápice, próxima ao ponto focal) da parábola que descreve a relação entre peso específico e umidade é pequena (suavemente inclinada) em comparação a um ponto qualquer mais afastado nos ramos seco ou úmido.

**CP:** O efeito positivo de uma menor relação  $a/c$  se atrela ao problema de afastamento entre os grãos e arranjo do esqueleto pétreo haja vista água livre, em menor volume, não impor maior afastamento entre os cristais C-S-H, reduzindo intertravamento de agregados por esses cristais. Nas proximidades do vértice da parábola, menor empacotamento em razão de menor lubrificação (molhagem) da BGTC não é páreo para superar o benefício do ganho de resistência obtida no descenso inicial do ramo seco. Tem-se a dicotomia: peso específico a favor ou contra a resistência? A formulação do problema segue uma dedução digna de calibração. Sabe-se também que entre a umidade ótima ( $w_{opt}$ ) e dois pontos percentuais abaixo dela, para agregados graduados, o peso específico pode apontar queda insignificante, de 2% (98% de  $\gamma_{as,max}$ ). Ao se prescindir de tal variação nesse montante, pode-se intuitivamente descrever, no trecho  $w_{opt}$ : ( $w_{opt} - 2\%$ ), a variação da resistência da BGTC, da seguinte maneira:

$$-\frac{df_c}{dw} = \frac{f_c}{F} \quad (2)$$

sendo  $f_c$  a resistência à compressão do material, a  $w$  umidade de compactação e  $F$  um parâmetro de calibração do modelo que supostamente embutiria efeitos da estrutura da mistura como, possivelmente, a variação do peso específico (desconsiderada aqui), o consumo de cimento, seu módulo de finura, seu teor de argamassa etc., a ser calibrado empiricamente. A Equação 2 permite escrever:

$$-\int \frac{df_c}{f_c} = \int \frac{dw}{F} \quad (3)$$

As integrais indefinidas de ambos os lados da Equação 3 fornecem:

$$-\ln f_c + C = \frac{w}{F} \quad (4)$$

Na faixa de variação de umidade de compactação estabelecida, quando  $w = w_{opt} - 2$ , sendo  $w$  a umidade para a qual a resistência é máxima; então a constante de integração na Equação 4 resulta:

$$C = \ln f_c^{max} + \frac{w_{opt} - 2}{F} \quad (5)$$

A substituição da Equação 5 na Equação 3 permite escrever a Equação 6:

$$\ln \frac{f_c^{max}}{f_c^{opt}} = \frac{2 + w - w_{opt}}{F} \quad (6)$$

**CP:** Na Tabela 1 são apresentadas calibrações para  $F$  a partir de dois testes cujos parâmetros básicos foram extraídos de Balbo (1993). Em ambos os casos os agregados se encaixavam de modo semelhante na faixa B da ABNT (1992), empregando-se CPII-E-32 (4% em peso) e compactação na energia modificada. Verifica-se assim ganho expressivo entre 30 e 40% para a resistência à compressão do material com cerca de 30% na redução da umidade de compactação, levando a relações  $a/c$  inferiores à unidade para o caso do agregado menos poroso (granítico, para o qual na umidade ótima atingiria 1,35). O fator de calibração (para ajuste dos demais efeitos) beira unitário, indicativo de que os parâmetros por si mesmo se ajustam bem, ou seja, naquela faixa de análise, a relação  $a/c$  é a bala de prata para ganho de resistência.

**Tabela 1:** Calibração de  $F$  para dois tipos de agregados [valores numéricos extraídos de Balbo (1993)]

| Agregado             | $w_{opt}$<br>% | $w$<br>% | $\Delta w$<br>% | $f_c^{opt}$<br>MPa | $f_c^{max}$<br>MPa | $\Delta f_c$<br>% | $F$  |
|----------------------|----------------|----------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|------|
| Granítico paulistano | 5,4            | 3,75     | -30,6           | 8,8                | 12,7               | 44,3              | 0,95 |
| Calcário alpino      | 6,5            | 4,8      | -26,2           | 7,5                | 10                 | 33,3              | 1,04 |

### 3.6. O material e a estrutura em evolução

**CP:** Quando analisamos um material como o concreto compactado com rolo, mesmo com semelhantes consumos de cimento orientativos da BGTC-retrô, os resultados visivelmente são diferentes, supostamente com ganhos e redução de imperfeições. Aqui tem-se campo aberto de alterações importantes de pensamento tanto no aspecto de dosagem quanto construtivo, o que evoluiu largamente na Europa e não seguimos exemplo: retivemos até hoje como regra a BGTC-retrô das décadas 1960-1970 empregada nas *autoroutes* francesas de então. Hoje, o conceito de BGTC na França, evitando-se a fazer referências à Escola Britânica, é um mero concreto compactado com rolo com tecnologia de cimentos alterada para, mesmo tendo consumos elevados de ligante, controlar a retração de secagem, fenômeno degradante primário do material.

**RC:** Mais recentemente, as estruturas semirrígidas utilizadas na Europa são compostas por base cimentada cuja espessura varia de 150 a 300 mm e revestimento asfáltico de 80 a 200 mm. A exceção é justamente na França, cujas espessuras de base podem atingir até impressionantes 480 mm, sendo executadas em duas camadas, devendo ser ambas dimensionadas à fadiga. A camada de revestimento asfáltico por sua vez é limitada em torno de 60 mm (FEHRL, 2008). Exemplos de estruturas projetadas na França (para 30 anos;  $N$  de projeto entre  $1,4 \times 10^7$  e  $3,8 \times 10^7$  e módulo de resiliência do subleito de 120 MPa) são: (a) semirrígidas com 85 mm de CAUQ e 190 mm de BGTC sobre sub-base de 180 mm de BGTC; (b) híbridas com 85 mm de CAUQ e 140 mm de base tratada com betume sobre sub-base de 220 mm de BGTC.

**RC:** No que se refere aos ligantes utilizados, a partir de 2013, a norma europeia EN 13282 passou a abranger um tipo de cimento designado como ligante hidráulico rodoviário – LHR –, que contempla uma série de produtos desenvolvidos para aplicação rodoviária, com aspectos diferenciados dos cimentos Portland. Tais cimentos são produzidos com percentuais expressivos de adições minerais como pozolanas, escórias, fíler calcário, argila calcinada, xisto queimado, entre outros materiais adicionados como substituição parcial do clínquer, a fim de reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$  ao longo da cadeia de produção do cimento, bem como alterar características de interesse, como por exemplo, resistência mecânica e durabilidade (Melese et al., 2019).

**RC:** Resistências da BGTC devem ser avaliadas aos 56 dias para seu emprego, sendo que na França as BGTC são também avaliadas após um ano de sua mistura, sendo aplicados fatores de correção conforme expostos na Tabela 1. Recentemente, a produção de BGTC com cimentos convencionais ou utilizando cinza volante e escórias ativadas com cal tem diminuído exponencialmente, dada a escalada dos cimentos rodoviários LHR. Atualizações dos fatores de correção de resistência em função da idade (Tabela 2) atualmente indicam que a resistência à tração indireta avaliada aos 60 dias deve atingir 78% daquela exigida para 360 dias, ao passo que o módulo de elasticidade para o mesmo período deve ser de 80% (Abdo, Serfass e Pellevoisin, 2013; IDRRIM, 2016). Em termos de dosagem os franceses têm empregado teores de cimento que atingem até 8% *em peso total*, o que corresponde a um consumo de aproximadamente  $170 \text{ kg/m}^3$  (CIMBÉTON, 2008; T-MIX, 2019), *em um claro movimento de adoção de misturas de CCR*.

**Tabela 2:** Coeficientes de correspondência utilizados pelos franceses para avaliação das propriedades mecânicas da BGTC para idade de 365 dias

| Tipo de ligante hidráulico | Consumo de cimento +<br>ativador (%) | Fatores de ajuste para propriedades mecânicas<br>aos 365 dias |                             |               |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|
|                            |                                      | Idade (j)                                                     | $f_{ct,sp-j}/f_{ct,sp-365}$ | $E_j/E_{365}$ |
| CP convencional            | 3 a 4                                | 28                                                            | 0,60                        | 0,65          |
| LHR                        | 3 a 5                                | 60                                                            | 0,65                        | 0,70          |
| Cinza volante              | 3 a 5                                | 60                                                            | 0,60                        | 0,65          |
| Cinza volante e cal        | 15 a 25                              | 90                                                            | 0,50                        | 0,50          |
| Escória                    | 8 a 15                               | 90                                                            | 0,70                        | 0,70          |

Fonte: Adaptado de SETRA (1998).

**CP:** Analisando-se as seções comumente empregadas (acima mencionadas) para pavimentos semirrígidos fica evidente que o material foco é a BGTC, do ponto de vista estrutural, em especial para o primeiro caso. No segundo caso (base betumada) tem-se uma estrutura híbrida, onde a BGTC atua como sub-base, ainda com espessura importante. São viscerais as alterações sobre conceitos de estruturas com BGTC em relação à literatura técnica francesa dos anos 1980. O primeiro caso denota um pavimento de elevadíssima rigidez (que depende do cubo da espessura) como se fosse um concreto; e que execução da BGTC em duas camadas somente possível com espessuras elevadas.

**RC:** Nos projetos desenvolvidos sob a premissa da convivência com as inexoráveis fissuras, mais corriqueira na França do que nos demais países europeus, a camada de revestimento asfáltico destina-se a exercer um papel funcional, com pouca contribuição estrutural às demais camadas, com espessuras esbeltas, admitindo-se que o revestimento asfáltico poderá eventualmente fissurar. Todavia, a estrutura como um todo deverá ser projetada de modo que seja pouco sensível ao ingresso de água e perda de capacidade estrutural pelo fenômeno de bombeamento de finos. Para isso, as camadas cimentadas possuem espessuras robustas e as camadas de fundação tais como reforço do subleito também deverão receber tratamento a fim de torná-las menos suscetíveis à água. Ademais, sob tal premissa, o risco de deterioração da estrutura deverá ser controlado através da aplicação de estratégias de avaliação e manutenção regulares, como por exemplo selagem de trincas.

### 3.7. Negar ou conviver com as fissuras de retração?

**CP:** Ademais, a questão da fissuração de retração vem sendo tratada na França de maneira bem diferenciada e não importada e adaptada por outros países até o momento. Inclusive assume-se a possibilidade de ocorrência de juntas de contração induzidas, à maneira mecânica de pavimentos de concreto simples, porém com processo de indução diferenciado. Sobretudo, fissuras de retração hidráulica impõem descontinuidades não definindo “plausíveis” camadas elásticas horizontalmente infinitas, e sim placas em flexão.

**RC:** A postura dos projetistas e agências viárias europeias tem sido muito consciente e longe de ser considerada negacionista ao reconhecer que a BGTC, ainda que produzida com consumos de cimento muito menores do que concretos convencionais ou alguns CCRs, apresentará fissuras devido à retração hidráulica e variações térmicas. Sendo assim,



foram estabelecidas duas estratégias de projeto, que afetam a espessura da camada de revestimento: convivência com trincas ou prevenção delas. Se a escolha for conviver com a trincas que fatalmente ocorrerão, a camada asfáltica, nesse caso, poderá ser relativamente esbelta, sendo projetada para exercer um papel funcional, com pouca contribuição estrutural às demais camadas da estrutura. Todavia, exige-se um projeto de drenagem eficiente, de tal sorte que a estrutura seja pouco sensível à penetração de água, através de camadas de base cimentada com espessuras maiores, bem como tratamento de eventuais camadas de reforço de subleito, a fim de torná-las poucos suscetíveis à umidade. Evidentemente, que sob tais condições as estruturas podem demandar operações de avaliação e manutenção mais regulares.

**RC:** Caso o projetista opte pela prevenção de fissuras, a camada de revestimento asfáltico terá um aporte estrutural importante, além de seu caráter funcional, tendo espessura mais espessa, uma vez que contribuirá para reduzir a tensões devido ao tráfego e movimentos térmicos nas camadas inferiores, inibindo ou retardando a reflexão de fissuras da base para a superfície. Ademais, técnicas de pré-fissuração têm sido amplamente utilizadas para controle de fissuras de retração por secagem e térmicas, com juntas regularmente espaçadas em aproximadamente 3 metros, uma vez que os engenheiros observaram que para tais intervalos a propagação de fissuras para a superfície do revestimento asfáltico podem ser retardada em até dez anos! Dentre as técnicas empregadas destacam-se: CRAFT, OLIVIA e juntas-ativas (FEHRL, 2008; Ferruelo, 2010).

**RC:** A técnica CRAFT (*Création Automatique de Fissures Transversales*) desenvolvida e patenteada pelo LCPC em parceria com a empresa EUROVIA está atualmente em domínio público; consiste na criação de uma descontinuidade no material antes de sua compactação. Após a criação do sulco com lâmina metálica, é realizada a aplicação de emulsão asfáltica para evitar aderência entre as bordas e posterior compactação da BGTC. Essa técnica já era conhecida na década de 1980 (Balbo, 1993). O processo denominado como OLIVIA (*Outil que Larribe Invente pour VIAFrance*) é similar ao CRAFT, com exceção no material aplicado no sulco criado, que consiste na introdução vertical de um filme plástico flexível até a profundidade média da camada de BGTC, evitando-se a aderência das bordas durante a hidratação do cimento. Por fim, a criação de junta-ativa (*joint-active*) consiste na criação de descontinuidades a cada dois metros, utilizando uma lâmina de vibro-compressão, com a posterior inserção de um perfil de PVC rígido corrugado. Após a aplicação do PVC o entalhe é fechado e o material é, então, compactado.

**RC:** Outro aspecto que chama atenção a respeito da BGTC, agora associado ao seu processo executivo, e que destoa dos procedimentos aplicados em países que, após reverem seus protocolos de projeto, execução e controle, passaram a ter sucesso com o uso do material está relacionado ao controle das inevitáveis fissuras de retração. O *Forum of European National Highway Research Laboratories*, composto por mais de trinta institutos técnicos e de pesquisa de toda a Europa, estabeleceu ao final da década de 1990 um grupo de estudos (*The European Long-Life Pavement Group*) para revisar e aprimorar os manuais de projeto e construção de pavimentos nos países membros. Segundo o relatório emitido na fase 2 do estudo (FEHRL, 2008) que contempla um guia para o uso

de pavimentos semirrígidos de elevada durabilidade, os projetos são desenvolvidos levando em consideração duas estratégias que consistem basicamente em conviver com as fissuras ou preveni-las.

**RC:** A estratégia de prevenção das fissuras, amplamente disseminada na Europa, exige que a estrutura seja projetada para evitar o início de sua reflexão. A camada revestimento asfáltico, consequentemente, terá um papel relevante não apenas sob o viés da funcionalidade, como também do ponto de vista estrutural. Nesse caso, as espessuras serão maiores, contribuindo para limitar as tensões de tração na principal camada estrutural (cimentada) responsável por suportar os esforços de tração oriundos do tráfego e variações térmicas, ritardando a propagação de fissuras da base para a superfície.

**RC:** Outrossim, sob essa estratégia, são empregadas técnicas de controle das fissuras de retração que têm contribuído de maneira eficaz no combate à sua propagação. Ellis e Dudgeon (2004) realizaram investigações forênsicas, durante seis anos, sob estruturas semirrígidas construídas empregando diferentes técnicas de indução de fissuras e observaram que todos os métodos empregados contribuíram para redução em mais de 50% comparadas à seções sem controle. Levantamentos com FWD também corroboraram que a execução de juntas ou indução de fissuras em posições estratégicas não reduziu a rigidez inicial do material.

### 3.8. Água, porosidade e ITZ na BGTC

**CP:** A variação ínfima no peso específico em função da redução de umidade na faixa especificada nos conduz a pensar seriamente na relação  $a/c$  como indutora primária do desempenho desejado. A relação água/cimento é um parâmetro nominal relacionando as porcentagens em peso (massa) de água e de cimento. O fato é que a água da pasta de cimento (ou da argamassa) tende a migrar para a superfície porosa do agregado onde é adsorvida. Assim, origina um gradiente, uma variação da relação  $a/c$  entre o interior da argamassa e a superfície dos agregados pétreos, aumentando o teor de umidade nessa superfície. Essa variação da relação  $a/c$  concorre para exacerbação da porosidade da pasta, afastando os cristais C-S-H, penalizando contatos cristais/agregados, reduzindo resistência. Quando a resistência à tração é basilar, na ITZ reside o essencial e explica a zona de ganho de resistência no ramo seco da curva de compactação. A tecnologia deve ser favorável ao comportamento da ITZ pois a BGTC é pouco argamassada. Justifica-se assim assentar que reduzir ainda mais a relação cimento/agregados é operar contra a natureza: resulta  $E$  elevado e  $f_{ct}, f$  pequena, o que afronta uma concepção mais mecanicista de pavimentos semirrígidos. Garantir resistência sem aumento de módulo de elasticidade é bastante saudável, como já se discorreu.

**RC:** Mehta e Monteiro (2008) explicam que o volume de vazios na pasta de cimento hidratada depende da quantidade de água inicialmente adicionada e do grau de hidratação da pasta. Quando ocorre a pega, a pasta de cimento adquire um volume estável aproximadamente igual ao volume de cimento mais a quantidade de água adicionada. Destarte, para um dado volume de cimento, a elevação na relação  $a/c$  se dá em decorrência da adição de uma maior quantidade de água que resultará em um volume

total (cimento + água) igualmente maior. Uma vez que a quantidade de cimento é fixa, ao final do período de hidratação, todas as pastas deverão apresentar o mesmo volume de produtos hidratados, fato que explica o aumento da porosidade do material e a consequente redução na resistência de misturas produzidas com maior relação  $a/c$  (Powers, 1958). No caso da BGTC, apesar de máxima massa específica aparente seca ser obtida para a umidade ótima, seria mais adequado que os protocolos de dosagem fossem ajustados de modo a contemplar a produção de misturas que privilegiem o desenvolvimento da resistência do material para um dado consumo de cimento.

**RC:** A ITZ é caracterizada por diversos autores (Ollivier, Maso e Bourdette, 1995; Scrivener, Crumbie e Laugesen, 2004; Leemann et al., 2006; Mehta e Monteiro, 2008) como o “elo fraco da corrente” no que se refere às propriedades mecânicas de compósitos cimentícios, marcando comportamentos tais como: (1) expressiva diferença entre a resistência à tração e compressão; (2) isoladamente, agregados e pasta apresentam comportamento elástico até a ruptura ( $f_c$ ); opostamente, compostos cimentícios possuem comportamento inelástico; (3) a 70% da resistência a fissuração se inicia por concentração de tensão nos grandes vazios; (4) comportamento frágil à tração (as fissuras se propagam mais celeremente haja vista zonas de vazios e microfissuras não permitem a transferência de tensão para os demais pontos da matriz).

**RC:** A formação da ITZ ocorre a partir da perturbação do empacotamento dos grãos de cimento quando este é misturado com o agregado graúdo, designada “*wall effect*”. Os agregados de dimensão maiores alteram o arranjo espacial das partículas de cimento anidro, cujas dimensões variam de 1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ , fazendo com que as partículas de cimento predominantemente menores fiquem concentradas nas cercanias do agregado, aumentando a porosidade na região (Scrivener, Crumbie e Laugesen, 2004). Na mistura e compactação forma-se filme d’água circundando partículas do agregado graúdo, que combinado ao efeito parede que diminuiu a concentração de partículas de cimento na região, aumentando  $a/c$  na ITZ a mais de 15 ou 20  $\mu\text{m}$  (extensão da ITZ) do agregado.

**RC:** O mecanismo de *Le Châtelier* explica a predominância de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e etringita na ITZ; o desejado C-S-H precipita de uma forma mais lenta diretamente sobre os grãos de cimento e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  precipita nos poros abertos deixados pelas partículas de cimento (Ollivier, Maso e Bourdette, 1995; Scrivener, Crumbie e Laugesen, 2004), o que tem um efeito significativo nas características mecânicas. Sob esse enfoque, Mehta e Monteiro (2008) destacam que a resistência na ITZ (importante para tração da BGTC) é governada pelo efeito combinado do volume e tamanho de vazios, bem como pelas forças de *van der Waals*, responsáveis pela aderência entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado. Buscando mitigar tais problemas há efetivo potencial de contribuição de adições minerais com destaque para a sílica ativa em percentuais de 5% a 10% do peso de cimento, promovendo: (1) densificação da matriz cimentícia; (2) refinamento da estrutura de poros, atuando como pontos de nucleação de C-S-H, i.e., o C-S-H precipita não apenas sobre os grãos de cimento, mas também sobre as partículas de adição mineral; (3) redução da espessura do filme d’água que tende a se formar no entorno do agregado graúdo (ITZ); e (4) o efeito químico promovido pela fixação do hidróxido de cálcio por

meio da reação pozolânica formando C-S-H adicional (Ollivier, Maso e Bourdette, 1995; Scrivener, Crumbie e Laugesen, 2004; Leemann et al., 2006; Mehta e Monteiro, 2008; Dal Molin, 2011; Neville e Brooks, 2013).

### 3.9. Compactação, alteração de viscosidade e água. O que rola para a BGTC?

**CP:** Importante indicativo de esforço de compactação (adensamento) é a necessidade de redução da porosidade bem como da umidade de compactação (aquém da ótima), para maior avizinhamento possível entre os grãos. Evidente que há um limite para compactação, em termos de rolagem. Há quem use energia dita suplementar (acima da modificada) já para a BGS há décadas; contudo, energia intermediária é algo surreal que deve ser alterado, se é que existe: é aquele “*more or less* (sic)”, que não é bom, evidentemente. A energia a ser empregada para BGTC-retrô, BCTG-CAD e CCR com semelhantes consumos de cimento (está-se referindo a faixa de 90 a 180 kg/m<sup>3</sup>) será sempre a energia modificada. Ela é capaz de aproximar a melhoria desejada pelas razões expostas, dando substancial ganho de resistência. Mas apenas isso não é suficiente para a busca da ideal homogeneidade da mistura.

**CP:** A BGTC-retrô é notoriamente um material heterogêneo (concretos não são cristalinos; são amorfos, sem simetria e com arranjos atômicos aleatórios. Compósitos de camadas de pavimentos, menos ainda). É mister a melhoria da homogeneidade dessa mistura para diminuição de porosidade (melhor distribuição) e ganho de resistência à fratura. Não apenas por possuir vazios entre os agregados minerais e o parco volume de argamassa/pasta, o que faz com que os agregados sejam apenas imperfeitamente envolvidos, ocorrendo na realidade muitos pontos de ligações nodais e pontos sem contato, o que decerto reduz mais ainda com a diminuição do consumo de cimento na mistura (ela emprega 4% mas...fortuitamente é especificada com consumo de 3% ou mesmo 2%, quando alguns a denominam por brita “melhorada” com cimento, embora não exista regras e estudos forênsicos consolidados para isso).

**CP:** É importante apontar para o fato de que nossos mentores europeus da BGTC-retrô não a empregam mais: hoje, a BGTC é material que emprega, minimamente, ligantes hidráulicos de baixo calor de hidratação (controle de fissuras associadas à retração hidráulica), às vezes com grande fração de material como calcário finamente moído (não reage, mas preenche vazios parcialmente nas misturas), grande consumo de ligante hidráulico (de 6% a 9% em peso). Pontuou-se há décadas (Balbo, 1993) que os britânicos tinham ojeriza à BGTC e optaram pelos concretos compactados com rolo para pavimentação, obtendo desfechos muito mais positivos para o desempenho dos pavimentos semirrígidos (ou híbridos) em suas rodovias.

**CP:** Tem-se por certo que essa heterogeneidade se dá evidentemente restando-se alguns pressupostos básicos: (1) tacanho consumo de cimento resultando em volume de argamassa bastante reduzido e porosidade errática na microestrutura do material (Balbo, 1993); (2) misturação tradicional em usinas tipo *pug-mill* (misturadora horizontal com braço simples ou duplo com palhetas com injetor de fluido) que não é capaz de produzir um efeito 100% homogeneizador, não se comparando com uma misturadora rotativa de

concreto; (3) mau entendimento e mau uso dos processos de compactação, perdurando hesitação sobre qual energia empregar: modificada, além da modificada (dita na Europa como suplementar para materiais granulares) ou aquém da modificada (por exemplo, intermediária ou proto-intermediária ou subintermediária, soluções mais “jabuticabas” ocorrentes na literatura nacional).

**CP:** Lubrificação da mistura e sua compactação – existe possível solução de facilitação da compactação e do entrosamento entre agregados, por maior lubrificação da mistura, sem alterar o conceito do material? Note-se que é evidente que o ramo seco da curva de compactação é ideal, embora não o ápice do encaixe entre os grãos ao considerar-se peso específico como meta. Há como aumentar o peso específico no ramo seco?

**RC:** Na BGTC a água, além de atuar na hidratação do cimento anidro, atua como lubrificante no processo de compactação do material, que visa atingir o máximo peso específico aparente seco, o que impactará em outros fatores associados à microestrutura da pasta de cimento. Devido ao baixo consumo de cimento, o material é caracterizado por apresentar uma insuficiência de argamassa para a cobertura completa dos grãos de agregados, cuja cimentação fica condicionada a ligações pontuais entre as partículas onde a argamassa conseguir se acomodar durante a compactação, resultando em um material de elevada heterogeneidade. Cabem aqui então a tecnologia de aditivos modificadores de viscosidade. AMV são cadeias de polímeros solúveis em água capazes de modificar as propriedades reológicas de compostos cimentícios, sendo produzidos normalmente a base de óxidos de polietileno, éteres de celulose e poliacrilamidas (EFNARC, 2006; Leemann e Winnefeld, 2007; Hartman et al., 2011; Valcuende et al., 2012).

**RC:** O guia para AMV desenvolvido pela EFNARC (2006) salienta que os AMV atuam no balanço entre o ponto para início da movimentação (força necessária para início do escoamento do concreto, avaliado pelo abatimento) e a viscosidade plástica (resistência ao escoamento oferecida pelo atrito interno das partículas); eles agem aumentando a viscosidade plástica, mas normalmente tem um impacto menor no que se refere ao limite de escoamento. Por essa razão esses aditivos têm capacidade de diminuir a segregação da mistura, compensar a falta de finos (principalmente fração areia) assim como melhorar a coesão de concretos secos e semissecos. Como são aditivos hidrofílicos (têm afinidade com água), a interação com a água e a superfície dos finos estabelece uma estrutura tridimensional na fase líquida da mistura, aumentando a viscosidade e/ou o limite de escoamento, razão pela qual melhora a coesão da mistura e evita a segregação.

**RC:** Considerado o processo de compactação da BGTC, observa-se em laboratório, por exemplo, que devido ao efeito vibratório, a pasta de cimento tendendo a se deslocar para a lateral do corpo de prova, com a superfície semelhante à de um concreto, o que pode induzir, equivocadamente, alguém menos atento a crer que isso também se reflete internamente. Contudo, Balbo (1993) demonstrou por meio de avaliação microscópica que a concentração de pasta de cimento no interior do material acaba sendo menor devido ao deslizamento desta para as laterais pela vibração. Sendo assim, os efeitos acima elucidados sobre a utilização de AMV, entende-se que esse tipo de aditivo pode trazer importantes contribuições na mitigação de problemas associados à heterogeneidade da

BGTC pela escassez de argamassa, favorecendo a coesão da mistura e distribuição mais uniforme da pasta de cimento, evitando sua migração para as laterais.

**RC:** Os aditivos plastificantes são aditivos tensoativos com capacidade de reduzir o consumo de água necessária para a produção de um concreto com uma dada consistência. São aditivos compostos por longas cadeias hidrofílicas de hidrocarbonetos, i.e., com diversos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) ligados à cadeia (Mehta e Monteiro, 2008; Neville e Brooks, 2013). Mehta e Monteiro (2008) explicam que quando água é adicionada ao cimento as partículas do aglomerante hidráulico não são bem dispersas devido ao efeito da tensão superficial exercida pelas ligações de hidrogênio na água e a tendência de floculação das partículas de cimento que exercem forças de atração entre suas arestas.

**RC:** Quando o aditivo é adicionado à mistura, a dispersão é melhorada substancialmente por conta da cadeia hidrofílica do surfactante que carrega negativamente as partículas de cimento que se aglomeraram pelas forças de atração de van der Waals, causando uma repulsão eletrostática entre elas, estabilizando, portanto, sua dispersão (Mehta e Monteiro, 2008; Castro e Pandolfelli, 2009; Neville e Brooks, 2013). Essa melhoria na dispersão das partículas de cimento proporciona refinamento na fluidez do compósito para uma mesma relação  $a/c$ ; permite também reduções no consumo de água de até 15%. Como a BGTC é material que apresenta relação  $a/c$  elevada por conta do baixo consumo de cimento, reduzir a quantidade de água na mistura, por mais que possa afetar em eventuais decréscimos em relação ao peso específico seco do material, trará contribuições mais significativas com relação à resistência do material, bem como redução da porosidade da pasta de cimento e refinamento da microestrutura, principalmente na ITZ. Já o AMV surge como um potencial mitigador do problema de heterogeneidade do material por conta da distribuição não uniforme da pasta de cimento na mistura.

**CP:** São, assim, duas aplicações diferentes: alterar viscosidade para facilidade de adensamento em pista e ganho de peso específico (inovação contemporânea); redução de água em especial para garantia de melhor resistência à tração na ITZ pasta-agregado (questão clássica).

### 3.10. Fibras produziram efeitos compensadores?

**CP:** Pouco se consolidou até o presente, embora as tentativas sejam recorrentes à década de 1970, o uso de fibras em placas de concreto para pavimentação aeroportuária, rodoviária e urbana. As fibras, metálicas, de polipropileno, ou macrofibras de polietileno, pouco acrescentam à resistência à tração nos concretos; é necessário um consumo de fibras relativamente elevado para melhoria significativa desse parâmetro (em se tratando de aço).

**CP:** Evidentemente, no que tange à resistência à fadiga, pouco se pode afirmar categoricamente, sendo que compartilho opinião que favorece reter que fadiga é um fenômeno exclusivamente do concreto e que as fibras apenas mantém pontes de ligação pós-fissuração, não devendo ser concebidas como elementos que alteram o comportamento à fadiga do compósito; assim, talvez em dada quantidade, pudessem favorecer um ganho não desprezível de resistência ao compósito que resultaria em relações entre tensão aplicada e tensão de ruptura tenuamente aumentada, causando

algum favorecimento no desempenho. Contudo, há restrições nessas opiniões na medida em que o consumo de cimento é reduzido de 350 kg/m<sup>3</sup> (em concretos para pavimentação) para 85 kg/m<sup>3</sup> (em BGTC ou CCR, inclusive para barragens).

**RC:** Materiais cimentados possuem um comportamento vítreo, frágil. Quando ocorre fissura interna, nessa região haverá uma zona de concentração de tensões. No caso de solicitações cíclicas, a cada nova solicitação, haverá propagação de dano até que ocorra a coalescência de fissuras que, ao atingirem seu comprimento crítico, culminam na ruptura catastrófica do material. A adição de fibras com características mecânicas em proporções adequadas suaviza o comportamento frágil do compósito, conferindo-lhe uma maior ductilidade e resistência à propagação de fissuras pós fissuração. Isso ocorre devido ao fato delas atuarem como pontos de transferência de carga entre faces fraturadas, atenuando concentrações de tensões. Para desempenho adequado do compósito é necessária ancoragem adequada da fibra que dentre outros fatores depende da quantidade de argamassa disponível. Figueiredo (2011) salienta que quanto maior o comprimento da fibra, oferecerá maior dificuldade ao arrancamento; contudo fibras longas dificultam a dispersão no material, afetando seu desempenho. No caso de concretos secos a adição de fibras apresenta uma mínima e inofensiva tendência de redução na resistência (Grilli, Bocci e Tarantino, 2013; LaHucik et al., 2016; Cargnin, Balbo e Bernucci, 2022) não havendo um completo envolvimento delas pela reduzida argamassa presente.

**CP:** Importante observar que fibras metálicas sujeitas à oxidação não são convenientes em materiais porosos sujeitos a umidade ascensional ou condicionada pelo clima. Há que se notar também que fibras têm suas funcionalidades positivadas para concretos com quantidade de argamassa que os caracterizem como mais plásticos ou em zona intermediária, o que não é o caso nem da BGTC, nem do CCR.

**CP:** Outro aspecto a ser considerado quando da adoção de fibras é sua misturação à BGTC (concreto seco pouco argamassado). A eficiência de fibras devido à própria porosidade e falta de envolvimento completo da fibra pela pasta/argamassa tende a ser reduzida se ocorrer heterogeneidade na mistura, com concentrações de volumes de fibras localizadas. Nesse contexto há inclusive, possibilidade de perda de resistência do material.

### 3.11. Efeitos térmicos (ambientais) em consideração

**CP:** Empenamento térmico não é presságio. É fato sólido (como o pouso da Eagle em 1969 em *Mare Tranquillitatis*). Caracteriza-se, em concretos plásticos ou secos, com maiores ou menores consumos de cimento, pela austera baixa difusibilidade térmica desses materiais. Por conseguinte, observam-se gradientes de temperatura entre faces paralelas de estruturas planas de concreto que são aquecidas (ou resfriadas), por radiação direta ou contato com calor, com sua superfície (externa ou interna), como exemplos verificados em regime climático tropical e asseverados pela ABNT (2021) em sua PR 1011. Essa realidade física ocorre em muitas situações em com outros materiais, de maneira mais ou menos implícita (madeira, metais, plásticos etc.).

**CP:** O empenamento do concreto e misturas cimentadas (essas quando são más condutoras de calor) causa alterações de forma de tal sorte que uma placa, ao ter sua face

superior aquecida, tem essa mesma face abaulada ou boleada, tornando-a convexa (curvatura positiva); caso ocorresse o resfriamento dessa superfície, a face sofreria reentrância, tornando-se côncava (curvatura negativa). Interessante notar que este gradiente (variação de temperatura em relação à altura ou profundidade) compele à ocorrência de deformações horizontais diferentes ao longo da profundidade (inclusive com o coeficiente de expansão térmica do material tido em situação de isotropia), independente de cargas de veículos; é também por isso identificado com “carga ambiental”. Ora, planos com deformações horizontais que decrescem de cima para baixo (por exemplo), em um meio supostamente homogêneo e monolítico, exigem uma reação de equilíbrio ao qual damos o nome de empenamento em função da transformação geométrica sentida – curvatura – alteração de forma por perda de planicidade, nesse caso.

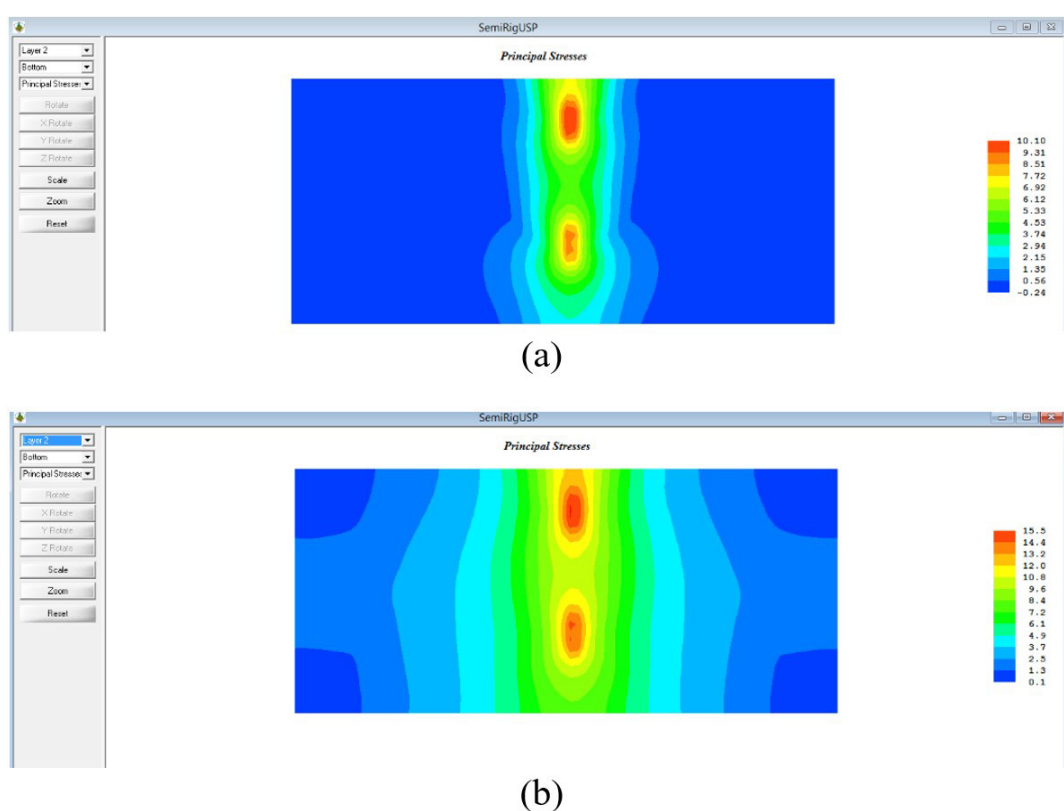
**CP:** Em placas de concreto expostas à temperatura e umidade ambientes e à concomitante radiação solar, observam-se diferenças de temperatura entre o topo da camada e seu fundo ultrapassarem 25 °C em regimes climáticos tropicais e áridos (Balbo, 2009). Pensando no pavimento semirrígido, temos uma situação recorrente em todo o território nacional: as camadas asfálticas são esbeltas. Materiais asfálticos possuem características de difusibilidade térmica muito diferentes de concretos; estudos de Motta (1991) com base em medidas objetivas de campo que valores comuns em picos de temperatura diárias permitem esclarecer que são cerca de 10 °C acima nas superfícies asfálticas em relação a superfícies em concreto; também, temperaturas de fundo de camadas asfálticas seriam 10 °C inferiores àquelas de superfície (depende da espessura).

**CP:** Assim, é possível reter, sem inquietação para com uma conjectura tangível, que não estamos dimensionando os pavimentos semirrígidos com a abordagem mecanicista ideal, o que nos encaminha para uma relatividade de deslocamentos incompleta (apenas cargas de veículos e não as cargas ambientais), passível de aprimoramento adequado. Há empenamento não por radiação solar direta na camada de base, mas por condução, por contato da superfície superior da base cimentada com o fundo do revestimento asfáltico (cuja temperatura em períodos quentes encontra-se acima da temperatura atmosférica). A combinação dos fatos apresentados, com a baixa difusibilidade térmica da base cimentada, causam seu empenamento.

**RC + CP:** Os efeitos de diferenciais térmicos nas tensões que ocorrem na base em BGTC são determináveis se empregados modelos numéricos adequados, que simulem concomitantemente resposta de placas em flexão, ação de cargas e temperatura. Empregando-se o software ISLAB2005 (ARA, 2005) e simulando-se carga de ESRD de 100 kN (central), com e sem diferencial térmico apenas na camada de base (linear, positivo com módulo 10 °C), para geometria de 3,60 m (largura) x 8,0 m (espaçamento médio entre fissuras de retração) podem ser evidenciados os efeitos combinados das cargas de roda e ambiental. A estrutura simulada se refere a 50 mm de CAUQ ( $E = 5.000 \text{ MPa}$  e  $\nu = 0,35$ ) sobre base em BGTC ( $E = 150.000 \text{ MPa}$  e  $\nu = 0,22$ ) apoiada em fundação com módulo de reação  $k = 40 \text{ MPa/m}$ . Observe-se que no exemplo a camada asfáltica é aderida à BGTC, resultando responder totalmente em compressão posto que na interface a linha elástica é idêntica.



**RC + CP:** Motta (1979) apontou para máximas temperaturas na superfície do CAUQ ocorrendo entre 12 h e 14 h, com equiparação de temperaturas de topo e de fundo do CAUQ entre 16 h e 17 h (distribuição linear), com topo a 55 °C. Com base no conhecimento para camadas em concreto anteriores (Balbo, 2009) foi considerado um diferencial térmico ( $\Delta T$ ) de 10 °C aplicado na BGTC, com o objetivo de avaliar o impacto nas respostas estruturais dessa camada. Na Figura 1 são ilustradas as tensões principais no fundo da BGTC para valores  $\Delta T = 0$  °C e  $\Delta T = 10$  °C. Quando  $\Delta T$  é nulo a tensão de tração na flexão máxima resulta 1 MPa, ao passo que quando  $\Delta T = 10$  °C ela é acrescida mais de 50% (1,55 MPa). Do ponto de vista de durabilidade da estrutura, fica evidente a provável degradação bem mais acelerada, por fadiga, do material, em razão dos efeitos combinados da carga ambiental e do tráfego.



**Figura 1.** Tensões de tração na flexão na fibra inferior da BGTC: (a)  $\Delta T = 0$  °C; (b)  $\Delta T = 10$  °C (unidades em kgf/cm<sup>2</sup>).

### 3.12. Tenacidade à fratura sofrível e fadiga célere

**CP:** A tenacidade à fratura da BGTC-retrô (e tipicamente nacional) é muito reduzida frente a um CCR (Balbo, 2006; Albuquerque et al., 2011; Balbo e Albuquerque, 2013). A energia total dissipada durante o teste é memoravelmente pequena. Como relacionar essas características com o comportamento à fadiga desse material?

**RC:** No caso da BGTC três fases são destacadas acerca da rigidez do material mediante o acumulado do tráfego a saber: (I) a primeira fase, chamada de pré-fissuração, é caracterizada pela presença de microfissuras estáveis, com redução linear de  $E$  até valores

da ordem de 12.000 MPa; (II) a segunda fase é conhecida como vida efetiva de fadiga, i.e., as microfissuras estáveis começam a aumentar gradualmente até ocorrer a sua coalescência e a formação de fissuras maiores, com redistribuição constante de tensões (valores típicos de  $E$  entre 10.000 MPa a 2.000 MPa); (III) a terceira fase corresponde àquela em que o material encontra-se desintegrado, com  $E$  inferior a 2.000 MPa, sem capacidade de resistir à esforços de tração, caracterizado por um comportamento típico de materiais granulares em grandes blocos, oferecendo resistência apenas a esforços verticais de compressão (Theyse, De Beer e Rust, 1996; Yeo, 2011).

**RC:** Em ensaios laboratoriais em fadiga da BGTC-retrô, realizados à frequência de 10 Hz, esse comportamento é observado com um aumento quase linear nas deformações conforme os ciclos de carregamento aumentam, até um limite tal que as deformações amplificam abruptamente, ocorrendo uma plastificação ainda que a baixos ciclos, como  $10^3$  e  $10^4$ , conforme relata Balbo (2006). A justificativa para tal comportamento está relacionada ao caráter heterogêneo do material, dado o baixo consumo de cimento (entre 80 e 100 kg/m<sup>3</sup>) e à reduzida quantidade de argamassa para recobrimento das partículas de agregados. Por essa razão, a resistência da BGTC, seja ela estática, à fadiga ou à fratura é muito dependente da eficácia de adesão entre os agregados nos pontos onde há pasta de cimento ligando as partículas.

**RC:** A grande quantidade de poros presentes no material impede a transferência de tensões internas de forma igualitária, criando zonas de concentração de tensão que favorecem a propagação de fissuras ainda que a baixos ciclos de carga. Além disso, deve-se ter em mente que nos pontos onde há presença de argamassa ligando os agregados, há também uma ITZ porosa que também favorece a perda progressiva da coesão entre a matriz cimentícia e os agregados. Ainda sob o enfoque da fadiga, é necessário destacar que os modelos de fadiga desenvolvidos para materiais cimentados normalmente são pautados por teorias de dano contínuo linear. Todavia, tais modelos são incapazes de representar de fato o comportamento microestrutural da BGTC em termos de propagação de dano, dada a propagação não linear da abertura das fissuras a cada ciclo de carga, ensejando espaço ao emprego dos conceitos de mecânica da fratura para um ampliar o entendimento acerca da resposta mecânica do material (Balbo, 2009).

**RC:** Sob esse viés, ensaios de fratura realizados por Balbo (2006) em misturas de BGTC-retrô produzidas com diferentes umidades de compactação (abaixo da ótima, ótima e acima da ótima), demonstram o impacto da quantidade de água disponível na resistência à fratura do material. As amostras compactadas no ramo seco, além de apresentarem uma maior energia de fratura em relação às amostras compactadas na umidade ótima e no ramo úmido, suportaram um nível de deformação maior, evidenciado pela medida da abertura da fissura no entalhe realizado no corpo de prova (CMOD – *crack mouth opening displacement*). A amostra compactada no ramo seco (2% abaixo da umidade ótima) suportou um nível de deformação cerca de 33% maior do que a amostra compactada na umidade ótima; em relação à amostra compactada no ramo úmido (1% acima da umidade ótimo) as diferenças no nível de deformação foram ainda mais expressivas, da ordem de aproximadamente 60%.

**CP:** Os valores modulares indicados para a segunda fase de fissuração da BGTC, entre 10 e 2 GPA, são difusos, pois o menor valor pressupõe já blocos, que apresentam comportamento em deflexão quando comprimidos verticalmente, sendo, portanto, difícil estabelecer limites, especialmente inferior, como pretendido pelos autores. É algo a ser buscado com a experiência de monitoração de deflexões em pista (com retroanálises), não se tomando como universais valores empiricamente obtidos. A melhoria geral do comportamento do material passa obrigatoriamente por algum acréscimo do consumo de cimento, redução da umidade de compactação, e especialmente, tratamento da ITZ. Fibras poderão, possivelmente, auxiliar no controle de abertura de fissuras e propagação delas para revestimentos; pouco afetam vida de fadiga pois essa característica se atém às respostas a deformações de tração na ITZ. É necessário estudar fibras nas bases cimentadas no que diz respeito à transferência de cargas entre blocos após fase intermediária de fadiga efetiva.

### 3.13. Misturação e homogeneização da BGTC

**CP:** Misturadoras de agregados, conjuntamente com caminhões basculantes ou *clam-shell*, são empregadas na produção e aplicação da BGTC. As misturadoras possuem grande capacidade de produção, de 60 a 300 m<sup>3</sup>/h para exemplificar; entende-se o emprego de tais equipamentos como típicos de obras rodoviárias de grande porte, maleáveis e se prestando para outras variedades de misturas. Se considerarmos os tempos de carregamento e transporte (simultaneamente) de caminhões betoneiras de 8 m<sup>3</sup>/h, seriam necessárias 7 a 8 caminhões para equiparar a produção. Contudo um caminhão betoneira lança o concreto em velocidade bem mais baixa, o que penaliza a ponta com vibroacabadeiras e rolos compactadores. Entende-se, contudo, que o processo de misturação em betoneiras permite muito melhor homogeneização da BGTC, o que de *per se* pode impactar de 5 a 10% na resistência final do produto, devido exclusivamente à equalização da distribuição por volume dos insumos no produto. A questão é controversa.

**CP:** Obras urbanas podem comportar melhor o emprego de betoneiras. Idem para obras aeroportuárias, portuárias, pois elas se ocupam, devido a diversos tipos de restrição, de produções diárias limitadas. A controvérsia apenas pode ser resolvida com análise benefício/custo, pois a grande produção das misturadoras rodoviárias reduz os preços unitários do material. Assunto a ser investigado. Apenas considerar que com usinas dosadoras misturadoras de concretos eficientes, por exemplo, produzindo 8 m<sup>3</sup> a cada 3 minutos, uma usina mediana apenas (há mais eficientes), a produção horária empataria com aquela de uma *pug-mill* comumente empregada.

### 3.14. Dimensionamento estrutural: tensões de centro ou de bordas?

**CP:** Fica cristalino das discussões anteriores que após sua construção a BGTC apresenta formato de uma placa, com largura da faixa de rolamento e comprimento médio entre as fissuras de retração. Primeira dúvida: calcular com comprimento médio é temerário; quase como assumir que estar-se-ia subdimensionando para metade dos casos, da extensão. Diante disso, melhor não fazer. Mas o que fazer? Dependerá da

experiência local, regional, nacional, empírica e cumulativa, de qual espaçamento se dá uma fissura de retração de outra.

**CP:** Em acostamentos de trechos da BR-101/PE (Agreste) na década de 2010 testemunhou-se espaçamentos entre 5 e 8 m para bases em BGTC-retrô com 2% (!) em peso de cimento. Na BR-116/SP (Serra do Cafezal, em 2015) de 8 a 12 m, para 4% de cimento. Mesmos valores apreciados na BR-376/PR (Califórnia, em 2017) em bases de pistas de rolamento com 3% de cimento. Com CCR, no IPR-DNER (DNIT), valores de 7 a 13 m foram identificados. Muito a aprender ainda. Se consolidar-se por escrito o conhecimento. Apenas. Segunda dúvida: a tensão crítica encontra-se no meio dessa placa de BGTC ou junto à borda? No topo ou no fundo da placa? É preciso aqui fazer a analogia com pavimentos de concreto simples sem barras de transferência de carga. Muito semelhante. Onde então: Carga próxima à junta transversal e tensão de tração no topo. Sem maiores ânsias. Terceira dúvida: devo empregar um modelo de cálculo pautado pela Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas ou me esquivar disso?

**RC:** Em pavimentos semirrígidos, na fase de análise de tensões e deformações, corriqueiramente são empregadas ferramentas de análise baseadas na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE). Entretanto, o material apresenta fissuras de retração ainda na fase de cura. Como há descontinuidade física (fissuras) no elemento estrutural, a TSCE torna-se rigorosamente inadequada uma vez que suas hipóteses fundamentais são: (1) comportamento elástico-linear dos materiais; (2) camadas infinitas na direção horizontal; (3) inexistência de descontinuidades físicas e geométricas nas camadas.

**CP:** Bom conselho: use o Método dos Elementos Finitos (MEF) para considerar devidamente as fissuras de retração e as cargas de borda (camada não infinita horizontalmente). Há muito o que modificar na forma de enxergar as estruturas semirrígidas que continuam por muitos incompreendidas à luz da Mecânica Estrutural.

### 3.15. Qual resistência especificar?

**CP:** Do ponto de vista normativo, já que a chave para respostas em flexão de estruturas não armadas é sua resistência à tração, onde falham, nossas especificações?

**RC:** As especificações normativas a respeito da BGTC no Brasil requerem que o material seja dosado e controlado em pista pela sua resistência à compressão. A NBR 11803 (ABNT, 2013), por exemplo, requer que o material apresente uma resistência à compressão entre 3,5 e 8 MPa aos sete dias, sem mencionar controle da resistência à tração. O mesmo ocorre nas especificações dos DERs como no caso do DER-PR, exceto naquela do DER-SP, que recomenda o controle tanto da resistência à compressão como à tração diametral especificadas para a idade de 28 dias. Balbo (2009) exemplifica a falta de correlação direta existente entre as resistências à compressão e tração na flexão de concretos plásticos para pavimentos, demonstrando o quão temerário seria realizar o controle tecnológico do material pautado nas medidas em compressão quando o parâmetro de interesse que governa seu desempenho em campo é a resistência à tração. Isto posto, dosar a BGTC tomando como parâmetro de controle sua resistência à compressão revela-se um contrassenso. A permissividade normativa acaba por equivocadamente suscitar o controle tecnológico por meios não servíveis para se conhecer sua resistência à tração.

**CP:** A abordagem de resistência e idade deverá ser simultaneamente definida, em especial em função das expectativas da administração viária, governamental ou privada. A data de liberação ao tráfego, seja de obra ou operacional, tem como restrição as resistências e demais parâmetros a serem atendidos para tal permissividade. Impostas as condições de emprego, *caberá ao projetista definir resistência*; ao gestor da obra definir suas estratégias de liberação de camada após execução, implicando em prazos, datas; ao tecnologista de concreto caberá a seleção dos parâmetros da mistura e tipos de insumos que garantam simultaneamente a resistência estabelecida para a data estabelecida.

#### 4. DISCUSSÃO E ANÁLISE SISTEMATIZANTE SOBRE A BGTCAD

**CP:** Agregados, cimento, água. BGTC, CCR, BGTCAD. Concretos menos ou mais argamassados. Não apenas isso. A tecnologia de concretos surge cerca de um século em precedência ao emprego de ligantes hidráulicos para a estabilização de solos e agregados em pavimentação. Empacotamento de agregados, granulometria contínua (Talbot, Fuller, Thompson), já eram preocupações clássicas anteriores; prova disso é que na Alemanha, em finais da década de 1920, os concretos para pavimentação empregavam uma faixa granulométrica típica de BGS (Balbo, 2009) em sua formulação, pois garantia melhores resistências mesmo com consumos de ligante hidráulico (de clínqueres ou escórias, na época) reduzidos. Essa redução auxiliava no controle de fenômenos de retração. Tudo simbiótico.

**CP:** ITZ. Independentemente do volume de pasta, os fenômenos de hidratação de soluções supersaturadas de cimento são os mesmos. Os problemas de controle de relação água/cimento para melhoria de ITZ já eram antigos conhecidos. Na BGTC, no CCR, isso tudo é verossímil igualmente. O que muda é apenas a compactação enérgica para aproximar e encaixar grãos de agregados que não possuem envolvimento completo por argamassa como os concretos plásticos. Os fenômenos físico-químicos relacionados à hidratação e energia liberada (calor), que condicionam tanto a resistência quanto a retração (contração química desde a mistura de água e ligante), permanecem presentes: a lei de Powers não é revogada para a BGTC e o CCR.

**CP:** Primordialmente, a busca por uma BGTC de alto desempenho (BGTCAD) requer uma matriz decisória que circunstancie sua aplicação em termos de explícitas condições locais específicas. Nesse artigo dialogou-se inicialmente com os parâmetros mecânicos do material ( $E$  e  $f_{ct}$ ), mas houve a capilaridade em se enfrentar o tema de durabilidade – melhoria de desempenho, sob outras matizes. Nessa BGTCAD primordial desejam-se alguns ajustes evidentes: melhor empacotamento dos agregados; garantia de energia de compactação modificada; umidade selecionada no ramo seco e não aquela tida como ótima; moderado aumento (25%) de consumo de cimento (de 4% para 5%); melhorador de resistência na ITZ; emprego de redutores de viscosidade; alto padrão de homogeneização da mistura; fibras como elemento eventual de redistribuição de tensões em uma matriz, ainda que melhorada, heterogênea. O incremento esperado de resistência à tração na flexão (somente) com a incorporação de princípios de dosagem de tecnologia

de cimentos e concretos, rudimentares ou não, pode ser mentalizado por meio da expressão multiplicativa:

$$f_{ct,f}^{BGTCAD} = f_{ct,f}^{BGTC-retr\hat{o}} \times (1 + \%G) \times (1 + \%W) \times (1 + \%C) \times (1 + \%ITZ) \times (1 + \%F) \times (1 + \%M) \quad (7)$$

sendo possíveis os incrementos mínimos relativos de resistência esperados conforme se seguem: %G devida à melhoria do empacotamento, 10%; %W devida à redução da relação  $a/c$ , 10%; %C devida ao aumento do consumo de cimento, 25%; %ITZ devido à melhoria de resistência na interface pasta-agregado com emprego de aditivos reativos emulsionados, 15%; %F devido à presença de fibras metálicas, 2,5%; %M devido ao processo de misturação e uso de AMV, 10%.

**CP:** Na realidade o emprego de fibras metálicas ou macrofibras poliméricas poderá ser apenas desejável para controle das aberturas de fissuras por fadiga, para retardamento da propagação de fissuras para a camada asfáltica em pavimentos semirrígidos, coisa menos eloquente quando de seu emprego em pavimentação em blocos intertravados ou em pavimentos de concreto de vários tipos. Nesse modelo mental acima tem-se uma expectativa de ganho de resistência de 80 a 100% com mínimo incremento de módulo de elasticidade. A discussão sobre formulação de uma BGTCAD deverá abranger as possibilidades (ao menos) apresentadas na Tabela 3 que se segue. Discussões sobre emprego de 1% em peso a mais no consumo de cimento podem se pautar no confronto entre a duplicação da durabilidade e a variação porcentual no custo unitário da BGTC que, segundo a Tabela de Preços do pelo DER-SP (2022), é no máximo de 12%.

**CP:** Nesse compasso é possível de se considerar eventual incremento de resistência resultante de maior homogeneidade a ser conseguida por meio de dois processos a serem considerados ainda: emprego de AMV e processo de misturação em usina dosadora-misturadora. Observe-se aqui que os fatores multiplicativos potencialmente incrementadores da resistência não são em si obrigatórios, sendo a expressão acima uma conjectura racional, embora com forte empirismo. Quem formula o material poderá, se assim o julgar ajuizadamente, eliminar todos os multiplicadores e formular a BGTC-retrô. É o que ela será. *Vintage*. Porém restrita a baixos volumes de tráfego (Balbo, 2006).

**CP:** Algumas palavras finais sobre durabilidade da BGTCAD. Primeiramente, norma ou especificação aberta é necessária, que permita ao engenheiro tomar decisões pautadas por sua experiência local com tecnologias de dosagem, produção e aplicação de concretos, não obrigando o uso de quaisquer das soluções tecnológicas aqui indicadas. Cabe ao projetista e ao tecnologista discutirem a viabilidade e os meios disponíveis e oportunos para formular a BGTCAD. Em face da decisão sobre o emprego das tecnologias, o engenheiro, para estimativa de acréscimo de resistência de sua BGTCAD em relação à BGTC-retrô, usará ou não os multiplicativos na Equação 7, de maneira coerente. Especificação com faixa granulométrica mais estreita e empacotada e muito bem graduada necessária em todas as normativas nacionais; exigência básica para o futuro imediato.

**Tabela 3:** Matriz de abrangência para a formulação mínima de uma BGTCAD

| Enfrentamento da questão               | Meta Tecnológica                                                                                                                                                        | Justificativas                                                                                      | Consequências na BGTCAD                                                                                         |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Relação modular ( $E/fct,f$ )          | < 10.000                                                                                                                                                                | Alto desempenho à fadiga                                                                            | Redução de níveis de deformação específica                                                                      |
| Granulometria                          | Coefficiente de Talbot 0,5                                                                                                                                              | empacotamento                                                                                       | Redução a/c; melhoria de ITZ; redução de porosidade                                                             |
| Consumo de cimento (convencional = 4%) | $\geq 5\%$                                                                                                                                                              | Maior teor de argamassa                                                                             | Maior cristalização de C-S-H sobre agregados                                                                    |
| Relação água/cimento                   | Máximo 70% de a/c para $w_{ot}$                                                                                                                                         | Maior proximidade entre cristais C-S-H; menor filme de água na ITZ; menor porosidade na ITZ e geral | Ganho de resistência                                                                                            |
| Emprego de finos reativos              | Mínimo de 5% em peso de cimento                                                                                                                                         | Melhorar adesão e formar mais C-S-H                                                                 | Melhoria de ITZ                                                                                                 |
| Heterogeneidade                        | Criar lubrificação no estado fresco com AMV + usinas dosadoras-misturadoras                                                                                             | Facilitar o processo de adensamento e encaixar melhor os agregados da mistura                       | Melhor arranjo granulométrico pós-compactação, maior densidade                                                  |
| Obras em áreas alagáveis               | Determinar condições de uso e ação de fluidos possíveis para emprego de cimentos tipo RS*                                                                               | Evitar degradação dos compostos hidratados                                                          | Maior durabilidade dos compostos de hidratação                                                                  |
| Caracterização química de agregados    | Determinar fases reativas de sílica                                                                                                                                     | Compatibilizar tipo de cimento com agregado disponível                                              | Evitar reações expansivas (reação álcalis-agregado/sílica)                                                      |
| Obras em áreas litorâneas              | Instigar reações desses compostos para se ligarem a íons cloreto livres (águas salinas e maresias) empregando cimentos com maiores teores de compostos $C_3A$ e $C_4AF$ | Evitar fissuração não mecânico-induzida                                                             | Maior durabilidade dos compostos de hidratação                                                                  |
| Retração hidráulica                    | Redução de contração da massa em cura usando cimentos siderúrgicos ou compensadores de retração ou pós expansores                                                       | Mitigar fissuras de secagem, reduzindo suas quantidades                                             | Maior afastamento entre fissuras; mitigação de fissuras de propagação no revestimento                           |
| Diferenciais térmicos                  | Avaliação de acréscimos em tensões em flexão (abordagem coerente)                                                                                                       | Determinar esforços condizentes com a natureza estrutural                                           | Correta verificação à fadiga                                                                                    |
| Fissuras de retração de secagem        | Considerar que o meio não é contínuo e possui bordas                                                                                                                    | Determinar esforços condizentes com a natureza estrutural do problema                               | Não mais empregar TSCE e sim modelos baseados em placas, analíticos ou numéricos                                |
| Posicionamento de cargas em bordas     | Avaliar tensão crítica de topo e de fundo nas bordas sem transferência de esforços                                                                                      | Determinar esforços condizentes com a natureza estrutural do problema                               | Avaliação de tensões em descontinuidades (fissuras). Analisar possíveis ocorrências de fissuras <i>top-down</i> |
| Mistura versus Heterogeneidade         | Avaliar processo mais homogeneizante                                                                                                                                    | Melhor distribuição da escassa argamassa                                                            | Ganho de resistência                                                                                            |

\*Cimento resistente a sulfatos.

**CP:** A BGTCAD no pavimento semirrígido não será uma panaceia; tal qual o pavimento de concreto simples não o é. Porém, longe de se pensar em durabilidade da BGTCAD idêntica ao concreto; como concreto de alto desempenho (CAD) é também muito diferente de um concreto convencional. Uma coisa é uma coisa; outra coisa é outra coisa. Destarte, como concretos, BGTC e CCR levam cimentos e água e necessitam de algum processo protetor de cura (e não ser deixados ao ar livre), o que é obscuramente omitido nas especificações nacionais e estigmatizado como desnecessário por engenheiros envolvidos. O melhor epílogo é que a durabilidade da BGTCAD, dependendo dos fatores multiplicativos aplicados na Equação 7 (modelo mental; digressão; abstração a partir da qual se monta um modelo empírico e o ajusta), poderá passar de 6 a 8 anos (o que se consegue normalmente hoje para finalização do estágio de fadiga) para até o dobro desse período, gerando grande economia em manutenção pesada (restauração de revestimentos asfálticos com intensa fissuração por reflexão e deslocamentos verticais relativos entre os blocos da base cimentada degradada). Na Tabela 3 também são indicados os caminhos para dimensionamento de pavimentos semirrígidos que propiciem uma franca análise estrutural; material excelente com abordagem estrutural equivocada não leva a alto desempenho em pista.

**CP + RC:** Não se pode perder de vista, entretanto, que os tratamentos de melhoria de ITZ com ligante emulsionado complementar, associado a maior consumo de cimento, levam à fragilização do material (resultando mais vítreo). Conforme identificado por Balbo et al. (2021) o emprego de concretos de alto desempenho (CAD) alternativamente aos convencionais para pavimentação possuem a idiosincrasia de encaminhar para pequena alteração na tenacidade do material, mas o aumento do índice de fragilidade claramente encaminhou o CAD para um comportamento à fadiga inferior, o que implica em rediscussão da questão de espessura de camadas de materiais cimentados (concretos), não sendo consequência imediata de uma BGTCAD a redução de espessuras de bases por analogia aos concretos. A complexidade do material exige uma abordagem sistemática que leve em consideração todos os aspectos mencionados: relação rigidez/resistência e relação água/cimento, tensões térmicas e comportamento à fadiga diferenciado. A procura por solução de melhor desempenho não significa “otimização de custo” (argumento vago e *démodé*) e sim por encaminhar reduzidas questões de manutenção (ao menos em tamanho de janela temporal) e maior sustentabilidade na construção rodoviária. Neste sentido é bom ter presente que na França, embora o material tenha evoluído muito em termos de desempenho, espessuras de camadas continuam elevadas, o que requer critérios de especificação para compactação bastante rigorosos.

## 5. ABORDAGEM PELO MÉTODO IRF NO ENSINO-APRENDIZAGEM

**CP:** A escola racionalista (alemã) tinha por fundamento a hipótese que todo o conhecimento é disponível e está de certa maneira hermeticamente embalado no cérebro de todo ser humano, deixando a entender que não se descobre nada: apenas é necessário o despertar da consciência para os fenômenos naturais. Mesmo com tão controversa e combatida ideia, há necessidade de acordar, motivando de alguma forma, a explicitação



individual do conhecimento, que posteriormente se faz coletiva. Dentro desse esquema, ainda assim é importante o papel do conhecedor primário como espoleta e catalizador do desabrochar da reflexão acadêmica. A técnica apresentada nesse artigo, de uso do diálogo triádico colaborativo entre o conhecedor primário e a aprendiz robustecedora, na forma escrita, não se trata de uma ideia nova, mas inovadora simplesmente ao se tentar.

**CP:** O que se apresentou no texto proposto não constitui em algum momento específico no tempo do diálogo ocorrido, mas a forma de estabelecer as pontes de comunicação com o discípulo que necessita ser despertado para o aprofundamento do conhecimento, o que se perfaz inicialmente focando-se e entendendo-se com profundidade os conceitos físico-químicos que compõem o conjunto de seu objeto de estudo. Não bastava, para se avançar, se reter na BGTC-retrô como vista até dias atuais em inúmeros artigos. Assim, o conhecedor primário tivera de provocar sua pupila (não estabelecendo seus próprios dogmas, nem quiçá suas quimeras) para que entendesse de todos os detalhes que permeiam o objeto de pesquisa, fixando solidamente o porquê de as coisas funcionarem de determinada maneira e suas implicações para outras coisas que apresentam graus de semelhança consideráveis.

**CP:** Por conseguinte, texto e diálogo apresentados relatam não um momento, mas diversas provocações, retornos e discussões amalgamadoras, instigando a reflexão sobre questão de fundo, essencial após se cercar dos conhecimentos, pois a bolha precisa ser furada. A tarefa aqui representada é uma técnica a ser empregada ao longo de toda a discussão acadêmica, porém de enorme serventia nos primeiros tempos, incursões preliminares dos estudantes. As técnicas de ensino-aprendizagem são desconhecidas pela maioria dos acadêmicos e orientadores nas áreas de engenharia; estão, por outro lado, muito bem sedimentadas nas áreas de humanidades.

**CP:** O diálogo triádico *reformado* ou *reformulado* é uma delas tendo-se procurado apresentar um exemplo real nas discussões aqui contidas. Recomenda-se como positivo aos pesquisadores em Transportes, que labutam na área de ensino, a aproximar-se dos conhecimentos pedagógicos para ampliar os horizontes de seus próprios orientados. Reconhece-se, todavia, que é deveras difícil generalizar esse método de aprendizado como eficiente para todos os estudantes, pois a resposta positiva, com efeito, é observada apenas para os casos de abundante focalização no problema, formação reflexiva e afincado à leitura técnica com graus de discernimento e compreensão elevados, posto que, busca-se assim que deixe de existir o monólogo e a construção do conhecimento seja compartilhada entre o conhecedor primário e seu discípulo, biunivocamente. O conhecimento elaborado pelos aprendizes teria a meta de superar aquele do mestre, pois isso seria dignificante para o educador e para a sociedade que os sustenta. Essa honraria não é cotidiana nem generalizada, e o diálogo construído, especialmente aquele escrito, não é, certamente, dom coletivo.

**CP:** Apenas para registro, a candidata ao doutorado e coautora apenas teve um programa claro de pesquisa laboratorial e de campo sobre como formular e conhecer as respostas térmicas e mecânicas de uma possível BGTCAD (entre outras a serem futuramente desenvolvidas), após a tempestade cerebral a que foi submetida. Não focou

em todas as possibilidades, pois desenvolve-se apenas *uma* pesquisa de doutorado, e não *n* pesquisas. As discussões aqui apresentadas, sobre o material, poderão emitir faíscas de percepção sobre como saltar do “pré-histórico” para o contemporâneo, para formulação de uma inovadora e engenhosa camada de base em BGTCAD que de fato apresente o mínimo de respeitável sustentabilidade.

**RC:** O processo de desenvolvimento proposto para esse artigo foi desafiador; porém, prazeroso, pois se percebeu ao longo dos meses de desenvolvimento do texto que, de fato, estava ocorrendo uma consolidação de conceitos estudados nas disciplinas cursadas no doutorado e na pesquisa durante inúmeros colóquios com o orientador. Conversávamos, muitas vezes remotamente, em meio à pandemia, sobre alguma situação-problema e ao final do diálogo era solicitada uma resposta textual para as questões apresentadas, como por exemplo, uma reflexão técnica sobre o porquê da BGTC-retrô ser um material “aterrorizante” em termos de durabilidade, nas palavras do conhecedor primário. O desafio emerge quando necessário estabelecer um fluxograma sobre conceitos estudados em diferentes áreas e organizá-los de forma clara e concisa. O que primitivamente foi assustador, logo revelou-se potencializador, pois, debruçada e curiosa sobre tecnologia de concreto (atuando na área rodoviária) sabia onde encontrar as respostas para as provocações, mesmo que num primeiro momento algumas delas não fossem claras, propositadamente. Até que se entendesse o cerne da provocação.

## 6. CONCLUSÕES

Exploraram-se, ao longo dos três artigos que compõem o ensaio, possibilidades de substanciais melhorias de formulação para BGTC em pavimentos semirrígidos, na indagação e investigação de uma nova mistura designada por BGTCAD. A maior parte da análise exploratória do tema foi realizada em diversos momentos do desenvolvimento de pesquisa de doutorado pela coautora. Foram apresentadas e discutidas as evidências conceituais das certezas de aprimoramentos que o emprego de modernas (e às vezes antigas, fora do meio rodoviário) tecnologias para a formulação de concretos possibilitou. Apresentou-se também uma formulação matemática para o ganho de resistência no ramo seco da curva de compactação, calibrando-a por meio de dados obtidos em estudo anterior.

As evidências foram oferecidas na forma de provocações que necessitariam de uma transposição de conhecimento para o material estudado, haja vista não ser difundida no meio técnico tal possibilidade ou necessidade. Sugeriu-se uma abordagem de formulação da resistência da BGTCAD por meio de modelo multiplicativo simples a partir da conhecida resistência da BGTC tradicional, ainda sujeito a inúmeras calibrações locais consideradas por engenheiros envolvidos em obras. É oferecida uma matriz decisória para dosagem e projeto da BGTCAD em vistas de considerações contemporâneas sobre comportamentos de compósitos com matrizes cimentícias e para aspectos de comportamento estrutural da camada. O trabalho, em seu âmago, persegue um tema abordado e extraído de tese de doutoramento (Balbo, 1993) que foi proposta de ser

radicalmente reformulada à candidata coautora, que se tratou da formulação de uma pergunta, e não de uma resposta:

A combinação das três ocorrências deve ser tal que forneça ao material uma efetiva melhoria em suas propriedades mecânicas e físicas. Diante das técnicas empregadas em cada processo, não se pode afirmar que a tecnologia de solos seja autossuficiente para a especificação do material; torna-se necessário nesse caso o interfaceamento do problema com a tecnologia de cimentos e de concreto, para até mesmo poder dispor de meios de aferição da resistência da mistura, o que não poderia ser definido com precisão apenas com estudos de compactação. (Balbo, 1993, p. 9).

Da argumentação textual conclui-se que além do controle de água na mistura, para além do que dizem as especificações nacionais, serão necessárias cautelas no tocante a tipos de cimentos a serem empregados, como aqueles resistentes a ataques de sulfato, bem como serem estabelecidos mecanismos de proteção dessas camadas estruturais de pavimentos ao ataque de íons (como íons  $\text{Cl}^-$ ) em áreas contíguas de praias, litorâneas, quando águas marinhas possam eventualmente avançar sobre os pavimentos, iniciando a degradação dos compostos hidratados do cimento e da própria ITZ, causando aceleração da deterioração da BGTC por degradação química microestrutural. Esses aspectos deverão ser passíveis de consideração em futuras normalizações nacionais para o material.

Textualmente explorou-se a realidade atual na França em relação à BGTC. Pode-se concluir claramente que a tecnologia evoluiu para o CCR, muito embora a documentação ainda insista em relatar como *graves-ciment* o material, mas há anos já mencionando-o também como *betón-maigre*, numa aproximação, em doses homeopáticas, para *betón-rouleau-compacté*. A questão de fundo não é apenas a designação do material.

Tipos de cimento, incluindo pós calcários em consumo elevado como material de enchimento, ganho lento de resistência para auxílio em controle de fissuração por retração hidráulica, aumento de espessuras de camadas e sua compactação em duas camadas (base e sub-base em BGTC), resistências do material mais elevadas que aquela tipicamente empregada nos anos 1980 no país (1 MPa em flexão), são evidentes sinais de mudança. A preservação da designação original, desde que não prejudicial à aceitação de um novo material (que é de fato diferente), não geraria complexidades. Foi sugerida a denominação BGTCAD por analogia à designação rodoviária prevalecente no Brasil.

À questão da relação água cimento foi adicionada uma pista a ser percorrida. O emprego de modificadores de viscosidade permitiria uma eficiência de compactação superior, melhor intertravando os grãos da BGTCAD, sem alteração na dosagem de água de amassamento. Ou seja, os AMV ensinam maior densificação do material, o que leva a ganho de resistência, sem acréscimos de água (que opostamente levaria a perdas de resistência). É bastante palpável que, uma vez que o módulo de elasticidade da BGTC em flexão é condicionado pela ITZ, para um mesmo consumo de cimento e maior eficiência na compactação, se devidamente acompanhados também de uma mistura mais eficiente, a ITZ melhora proporcionando maior resistência sem ganho significativo de rigidez, atendendo à perspectiva inicial apontada no início desse ensaio.

Por fim, não menos importante, há que se passar por uma sobreposição de dois conceitos diferentes: avaliar simultaneamente efeito de temperaturas que causam gradientes térmicos na camada de BGTC, como esclarecido, com a ação de cargas rodoviárias, por exemplo. Cinquenta por cento de acréscimo nas tensões, se não considerados em projeto, representam a *pena capital* para o material; se o material for a BGTC-retrô, a degradação por fadiga será célere, o que poderia eventualmente, por meio de investigações forênsicas, esclarecer diversos insucessos de pavimentos semirrígidos ocorridos em solo nacional desde a década de 1980.

O ensaio oferecido encaminha para as conclusões principais abaixo enumeradas:

- i. A BGTC é um material muito afetado pelas deficiências de sua ITZ, considerado seu baixo consumo de cimento e a água de amassamento em consumo elevado, requerida para sua compactação. Modificar a viscosidade da mistura, reduzindo a relação  $a/c$ , encaminhará para um aumento significativo de resistência sem aumento proporcional de rigidez. O efeito da relação  $a/c$  ficou claramente explicitado por uma relação matematicamente calibrada com ensaios anteriores sobre o material;
- ii. O emprego de diversos tipos de tecnologias, na forma de aditivos à mistura, é necessário na busca de uma BGTC que vá além de uma visão limitada de que sua durabilidade é comandada apenas pelo comportamento à fadiga do material; há outros fatores de contorno à rodovia que provocam sua degradação que presentemente ainda não são considerados em projetos de misturas;
- iii. A França emprega atualmente BGTC de formulação muito modificada em relação às suas experiências nas décadas de 1970 e de 1980. A bem da verdade o que se produz em obras rodoviárias são concretos secos compactados, de elevada resistência, com esmero no controle de fissuras de retração em se considerar tipos de cimento com menor calor de hidratação;
- iv. Para o dimensionamento estrutural sob o viés tensão-fadiga deve-se obrigatoriamente considerar efeitos térmicos e cargas de borda na BGTC, abandonando-se sistemas multicamadas e empregando-se conceitos de placas em flexão; esse seria o salto de qualidade mais imediato e simples de se estabelecer por projetistas;
- v. O ensaio apresenta um possível modelo preditivo empírico para calibração da resistência possível de ser alcançada, devendo o engenheiro considerar, em cada obra, qual padrão de BGTCAD poderá formular mais facilmente em função de custos e materiais disponíveis; complementarmente, uma matriz especulativa auxiliar dos aspectos a serem possivelmente considerados em dosagem, projeto e obra, é apresentada.

A pesquisa da coautora avança nos preceitos estabelecidos anteriormente, não abordando agora somente a relação  $a/c$  como tendão de Aquiles da formulação do material. Deseja, além disso, elevado desempenho, melhoria afora 100%. Exigiu enfrentar melhorias no envelopamento granulométrico, no consumo de ligante hidráulico fora de padrões tradicionais, na abordagem da ITZ com microssílica emulsionada e na avaliação do efeito de fibras em “concreto” pouco argamassado. Avança na compreensão de uma BGTCAD como um CCR moderno e tecnológico.

Essa reflexão acadêmica, em seu cerne central, foi representada na forma de um diálogo triádico *reformulado* entre o conhecedor primário e sua orientada em formação, seguindo a possibilidade de comunicação escrita, conforme proposto pelo educador Gordon Wells como indagação dialógica para processos de formação de docentes. O método considerado permitiu avanços conceituais seguros da pesquisadora em seu tema de doutoramento, inclusive fomentando a reflexão de como os conhecimentos podem ser expandidos em processos de causa-efeito quando se empregam materiais que possuem componentes similares em quantidades diferenciadas. O artigo consistiu em uma reflexão síncrona sobre Ensino e Pesquisa (em Transportes).

## AGRADECIMENTOS

**RC:** Encerrando esse diálogo textual, não posso deixar de agradecer *in memoriam* à Profa. Dra. Maria Alba Cincotto, que atuou até seus últimos suspiros como brilhante docente da EPUSP, cujas aulas sobre química de cimento me vieram à memória inúmeras vezes e contribuíram muito para consolidar minhas pesquisas; com ela, a oportunidade de discutir e aprender sobre o assunto, com a mais reconhecida referência sobre química de ligantes inorgânicos no país, foi um grande privilégio.

**CP:** À CAPES-MEC pelas bolsas de doutoramento (no Brasil e para a Universidade da Califórnia – Berkeley) concedida à pesquisadora e à Fundação de Apoio à USP pela bolsa complementar em consequência da pandemia COVID-19.

## REFERÊNCIAS

- Abdo, J.; J. Serfass e P. Pellevoisin (2013) Pavement cold in-place recycling with hydraulic binders: the state of the art in France. *Road Materials and Pavement Design*, v. 14, n. 3, p. 638-665. DOI: 10.1080/14680629.2013.817350.
- ABNT (1992) *Brita Graduada Tratada com Cimento. Projeto de Norma*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2013) NBR 11803: Materiais para Base ou Sub-Base de Brita Graduada Tratada com Cimento – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2014) NBR-6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2018) NBR-16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2021) PR-1011: Projeto de Pavimentos Urbanos de Concreto. Rio de Janeiro: ABNT.
- Albuquerque, M.C.F.; J.T. Balbo; E.C. Sansone et al. (2011) Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 4, p. 244-251.
- ARA (2005) *ISLAB Software*. Champaign: Applied Research Associates.
- Balbo, J.T. (1993) *Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirregidos*. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/000738919>> (acesso em 19/06/2023).
- Balbo, J.T. (2006) Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. *Transportes*, v. 14, n. 1, p. 45-53. DOI: 10.14295/transportes.v14i1.59.
- Balbo, J.T. (2009) *Pavimentos de Concreto*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Balbo, J.T. (2013) Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes. *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 6, n. 6, p. 854-874. DOI: 10.1590/S1983-41952013000600003.
- Balbo, J.T. e M. Badawy (1993) Britas graduadas tratadas com cimento: elasticidade linear ou não linear? In *Anais do VII ANPET: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. São Paulo: ANPET, v. 2, p. 915-922.
- Balbo, J.T. e M.C.F. Albuquerque (2013) Análise preliminar de parâmetros de fratura de concretos compactados com agregados de construção e de demolição para bases de pavimentos. *Transportes*, v. 21, n. 1, p. 44-50. DOI: 10.4237/transportes.v21i1.674.
- Balbo, J.T.; A.A. Saverio; T.C. Cervo et al. (2021) Parâmetros do modelo bilinear de fratura e fragilidade de concretos de alto desempenho para pavimentação: por que estudos de fadiga interessam e não podem ser dispensados. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 1, p. e14101. DOI: 10.1590/s1983-41952021000100001.

- Bonnot, J.; L. Domenichini; A. Lacleta et al. (1991) Semi-rigid pavements. In *Permanent International Association of Road Congress*. Paris: PIARC Technical Committees on Concrete Roads and Flexible Roads, p. 2-271.
- Cargnin, A.P.; J.T. Balbo e L.B. Bernucci (2022) Efeito da adição de macrofibras poliméricas e sílica emulsionada na resistência à tração indireta em brita graduada tratada com cimento (BGTC). In *Anais do 63º Congresso Brasileiro do Concreto*. Brasília: IBRACON, p. 1-19.
- Cascudo, O. e H. Carasek (2011) Ação da carbonatação no concreto. In Isaia, G.C. (ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, p. 849-885.
- Castro, A.L. e V.C. Pandolfelli (2009) Revisão - conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, v. 55, n. 333, p. 18-32. DOI: 10.1590/S0366-69132009000100003.
- Celik, K.; C. Meral; A.P. Gursel et al. (2015) Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 59-72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003.
- CEN (2013) EN-13282-1: Hydraulic Road Binders – Part 1: Rapid Hardening Hydraulic Road Binders – Composition, Specification and Conformity Criteria. Bruxelas: Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2015) EN-13282-2: Hydraulic Road Binders – Part 2: Normal Hardening Hydraulic Road Binders – Composition, Specifications and Conformity Criteria. Bruxelas: Comité Européen de Normalisation.
- Cheng, A.; S. Chao e W. Lin (2013) Effects of leaching behavior of calcium ions on compression and durability of cement-based materials with mineral admixtures. *Materials*, v. 6, n. 5, p. 1851-1872. DOI: 10.3390/ma6051851. PMID:28809247.
- CIMBÉTON (2008) *Aménagements Décoratifs en Matériaux Naturels Stabilisés aux Liants Hydrauliques: Caractéristiques Techniques et Règles de Bonne Pratique*. Clichy: Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi/CIMBÉTON. Disponível em: <<https://www.infociments.fr/route/t67-amenagements-decoratifs-en-materiaux-naturels-stabilises-aux-liants-hydrauliques>> (acesso em 19/06/2023).
- Corté, J.-F. e M.-T. Goux (1996) Design of pavement structures: the French technical guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1539, n. 1, p. 116-124. DOI: 10.1177/0361198196153900116.
- Cunha, F.A. e M.A. Cincotto (2008) *Efeito de Adições Ativas na Mitigação das Reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato*. São Paulo: Escola Politécnica/Universidade de São Paulo. Boletim técnico BT/PCC/498.
- Dal Molin, D.C.C. (2011) Adições minerais. In Isaia, G.C. (ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, p. 261-309.
- DER-SP (2022) Tabela de preços unitários. Disponível em <<http://200.144.30.103/tpu-internet/>> (acesso em 19/06/2023).
- EFNARC. EFCAA (2006) ENC 180 VMA R13: Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete. Surrey: European Federation of National Associations Representing for Concrete/European Federation of Concrete Admixture Associations.
- Ellis, S. e R. Dudgeon (2004) Pre-cracking as a technique to minimize reflection cracking in semi-rigid pavement structures-long term performance monitoring. In Petit, C.; I.L. Al-Qadi e A. Millien (eds.) *Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements*. Champs-sur-Marne: RILEM Publications SARL, p. 325-332.
- Erickson, F. (1982) Classroom discourse as improvisation: relationships between academic task structure and social participation structure in lessons. In Wilkinson, L. (ed.) *Communication in the Classroom*. Londres: Academic Press, p. 153-181.
- Fazio, A.A.; V. Heckler e M.C. Galiuzzi (2022) Indagação dialógica de Gordon Wells em processos formativos com professores: interlocuções com a comunidade científica internacional. *Revista Contexto e Educação*, v. 37, n. 116, p. 57-75. DOI: 10.21527/2179-1309.2022.116.12687.
- FEHRL (2008) *Making Best Use of Long-Life Pavement in Europe Phase 2: a Guide to the Use of Long-Life Semi-Rigid Pavements*. Bruxelas: European Long Life Pavements Group. FEHRL report 2008/x.
- Ferruelo, C.C. (2010) Técnicas de prefisuración. *Rutas: Revista de la Asociación de Carreteras*, n. 136, p. 23-35.
- Figueiredo, A.D. (2011) *Concreto Reforçado com Fibras*. Tese (livre-docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/3/tde-18052012-112833/pt-br.php>> (acesso em 19/06/2023).
- Garrouste Béton (2022) Extérieureur béton grave ciment. Disponível em: <[www.garrouste-beton.fr](http://www.garrouste-beton.fr)> (acesso em: 19/06/2023).

- Giaccio, G.; R. Zerbino; J.M. Ponce et al. (2008) Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 7, p. 993-1004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.02.009.
- Gourlay, L. (2005) OK, who's got number one? Permeable Triadic Dialogue, covert participation and the co-construction of checking episodes. *Language Teaching Research*, v. 9, n. 4, p. 403-422. DOI: 10.1191/1362168805lr175oa.
- Grilli, A.; M. Bocci e A.M. Tarantino (2013) Experimental investigation on fiber-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt. *Construction & Building Materials*, v. 38, p. 491-496. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.040.
- Grupo de Pesquisa Comunidades Aprendentes em Educação Ambiental, Ciências e Matemática (2016) *Indagações Dialógicas com Gordon Wells*. Rio Grande: Editora da Universidade Federal do Rio Grande. Disponível em: <[https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/7017/livro\\_gordon.pdf?sequence=1](https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/7017/livro_gordon.pdf?sequence=1)> (acesso em 19/06/2023).
- Hartman, C.; A. Jeknavorian; D. Silva et al. (2011) Aditivos químicos para concretos e cimentos. In Isaia, G.C. (ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, p. 347-380.
- Hasparyk, N.P. (2005) *Investigação de Concretos Afetados pela Relação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado*. Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6350>> (acesso em 19/06/2023).
- IDRRIM (2016) *Application des Normes Revisees NF EN 14227 - Parties 1, 2, 3 et 5: Melanges Traites aux Liants Hydrauliques - Specifications*. Disponível em: <<https://www.idrrim.com/ressources/documents/7/4205,NOTE-D-INFORMATION-N-30-web.pdf>> (acesso em 19/06/2023).
- Isaia, G.C. (2011) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. A água no concreto, v. 1, p. 311-346.
- Johnson, C.V.; J. Chen; N.P. Hasparyk et al. (2017) Fracture properties of the alkali silicate gel using microscopic scratch testing. *Cement and Concrete Composites*, v. 79, p. 71-75. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.012.
- LaHucik, J.; S. Schmidt; E. Tutumluer et al. (2016) Cement-treated bases containing reclaimed asphalt pavement, quarry by-products, and fibers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2580, n. 1, p. 10-17. DOI: 10.3141/2580-02.
- Leemann, A. e F. Winnefeld (2007) The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 5, p. 341-349. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.01.004.
- Leemann, A.; B. Münch; P. Gasser et al. (2006) Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 8, p. 1425-1433. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.02.010.
- Lemke, J.L. (1990) *Talking Science: Language, Learning and Values*. Norwood: Ablex.
- Llamazares Gomez, O. (1971) El empleo de la grava-cemento en los firmes de carretera. *Informes de la Construcción*, v. 24, n. 231, p. 43-47. DOI: 10.3989/ic.1971.v24.i231.3361.
- Mehta, P.K. e P.J.M. Monteiro (2008) *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto.
- Melese, E.; H. Baaj; S. Tighe et al. (2019) Characterization of full-depth reclaimed pavement materials treated with hydraulic road binders. *Construction & Building Materials*, v. 226, p. 778-792. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.317.
- Motta, L.M.G. (1979) *O Estudo da Temperatura em Revestimentos Betuminosos*. Dissertação (mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2966/1/150146.pdf>> (acesso em 19/06/2023).
- Motta, L.M.G. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/135-1991/753-laura-maria-goretti-da-motta>> (acesso em 19/06/2023).
- Munhoz, F.A.C. (2007) *Efeitos de Adições Ativas na Mitigação das Reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-10012008-100734/pt-br.php>> (acesso em 19/06/2023).
- Nassaji, H. e G. Wells (2000) What's the use of 'triadic dialogue'? an investigation of teacher-student interaction. *Applied Linguistics*, v. 21, n. 3, p. 376-406. DOI: 10.1093/applin/21.3.376.
- Neville, A. (2004) The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 8, p. 1275-1296. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.004.
- Neville, A.M. e J.J. Brooks (2013) *Tecnologia do Concreto* (2a ed.). Porto Alegre: Bookman.

- Nunn, R. (2000) Language learning across boundaries: negotiating classroom rituals. In *Annual Conference of the British Association for Applied Linguistics*. Cambridge: British Association for Applied Linguistics. Online.
- Ollivier, J.P.; J.C. Maso e B. Bourdette (1995) Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Based Materials*, v. 2, n. 1, p. 30-38. DOI: 10.1016/1065-7355(95)90037-3.
- Powers, T.C. (1958) Structure and physical properties of hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 41, n. 1, p. 1-6.
- Prado, R.J.; F. Tiecher; N.P. Hasparyk et al. (2019) Structural characterization of alkali-silica reaction gel: an X-ray absorption fine structure study. *Cement and Concrete Research*, v. 123, p. 105774. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.019.
- Salloum, S. e S. BouJaoude (2019) The use of triadic dialogue in the science classroom: a teacher negotiating conceptual learning with teaching to the test. *Research in Science Education*, v. 49, n. 3, p. 829-857. DOI: 10.1007/s11165-017-9640-4.
- Scrivener, K.L.; A.K. Crumie e P. Laugesen (2004) The interfacial transition zone between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, v. 12, n. 4, p. 411-421. DOI: 10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c.
- SETRA (1998) *Guide D'application des Normes Pour le Reseau Routier National*. Cedex: Laboratoires Central des Ponts et Chaussées.
- Suzuki, C.Y.; A.M. Azevedo e F.I. Kabbach Jr. (2013) *Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: Conceitos e Dimensionamento*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Tang, Y.-J.; X.-B. Zuo; G.-J. Yin et al. (2018) Influence of calcium leaching on chloride diffusivity in cement-based materials. *Construction & Building Materials*, v. 174, p. 310-319. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.112.
- Theyse, H.L.; M. De Beer e F.C. Rust (1996) Overview of South African mechanistic pavement design method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1539, n. 1, p. 6-17. DOI: 10.1177/0361198196153900102.
- T-MIX (2019) Grave Ciment - Sous Couches de Chaussées. Disponível em: <<http://www.t-mix.fr/t-mix-Grave-Ciment.html>> (acesso em 19/06/2023).
- Valcuende, M.; E. Marco; C. Parra et al. (2012) Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 4, p. 583-592. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.01.001.
- Wang, Y.; Q. Yuan e D. Deng (2019) Degradation of mechanical properties of CA mortar caused by calcium leaching. *Construction & Building Materials*, v. 208, p. 613-621. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.164.
- Wells, G. (1993) Reevaluating the IRF sequence: a proposal of articulation of theories of activity and discourse for the analysis of teaching and learning in the classroom. *Linguistics and Education*, v. 5, n. 1, p. 1-37. DOI: 10.1016/S0898-5898(05)80001-4.
- Yeo, Y.S. (2011) *Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Basecourse for Western Australian Roads*. Tese (doutorado). School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University. Perth. Disponível em: <<https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/2277>> (acesso em 19/06/2023).