ISSN 1516-392X

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS INORGÂNICOS[1]

Alisson Clay Rios da Silva[2]

Resumo
Neste trabalho, através de uma dosagem adequada dos componentes que constituem o geopolímero, foi desenvolvido o concreto de cimento geopolimérico (CCG), que teve suas características comparadas com o concreto de cimento Portland (CCP), através da fixação de alguns parâmetros de dosagem, como consumo de aglomerantes, relação água/aglomerante e teor de argamassa. Foram realizados ensaios para avaliar as propriedades mecânicas dos concretos, com ênfase nos ensaios de fadiga. O estudo deste comportamento, foi realizado por meio de ensaios dinâmicos, nos dois tipos de concretos, avaliando os efeitos de diferentes tensões máximas (crescentes e decrescentes). Os resultados de fadiga nas diversas variações realizadas, mostram um melhor desempenho ao comportamento em fadiga do CCG. Sua resistência à fadiga, quanto a aplicação de tensões da ordem de 70%, da resistência estática do concreto, apresentou valores 15% mais elevadas em relação à mesma tensão aplicada no CCP. Já em tensões mais altas, em torno de 80%, esses resultados chegam a valores 96% mais elevados para o CCG. Na análise microestrutural foi observado a melhor aderência matriz/agregado desenvolvida no CCG, comparada com a do CCP, provavelmente devido a natureza mais massiva da matriz geopolimérica.
Palavras-chave: Compósitos; Caracterização.

CHARACTERIZATION OF INORGANICS COMPOSITES

Abstract
In this work, a Geopolymeric Cement Concrete (GCC) was developed through adequate portions of geopolymer components. Its characteristics were compared with Portland Cement Concrete (PCC), through of the establishment of some parameters of design, as consumption of binders, water/aggregates ratio and mortar content. The concrete mechanical performance was evaluated with emphasis to the fatigue behavior. Were tested the effects of different tensile strength maximum (increasing and decreasing). The results of fatigue tests had shown that GCC presents a better performance when compared to PCC. Its fatigue strength was 15% higher than that of PCC, when 70% of rupture tension of the concrete in static bending (SR), was applied. Tensions of about 80% SR resulted in 96% of increase, when compared to GCC. The SEM microstructural analysis showed that the GCC has a matrix/aggregate bonding very strong, when compared to PCC, probably due to the massive nature of the geopolymeric matrix.
Key words: Composites; Characterization; Inorganics; Concrete; Cement.

[1] *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
[2] *Químico, Prof. Dr., Universidade Estadual da Zona Oeste (UEZO), RJ, Brasil; alissonrios@uezo.rj.gov.br.*

ISSN 1516-392X

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço na tecnologia do concreto foi voltado principalmente ao desenvolvimento de novos materiais e componentes que resultaram no aumento da resistência e melhoria do desempenho dos concretos de cimento Portland para adequação aos novos requisitos de durabilidade das estruturas de concreto. Neste contexto, surgiram os concretos de alto desempenho (CAD).[1]
No concreto geopolimérico, o geopolímero é utilizado como aglomerante ao invés de cimento Portland.[2] Os Concretos de Cimento Geopolimérico (CCG) apresentam propriedades físicas e mecânicas bem similares àquelas apresentadas pelos CAD Portland. Um estudo sobre o desempenho mecânico do CCG foi feito pela comparação das resistências à compressão de um traço fixado a partir de um estudo estatístico com mais de 200 traços diferentes de Concreto de Cimento Portland (CCP) existentes na literatura.[3] Os resultados de resistência à compressão variaram entre 45 MPa e 60 MPa, bem semelhantes aos resultados encontrados na literatura para CCP'S de composição similar. Outro fator considerado foi a excelente trabalhabilidade apresentada pelo CCG, que atingiu um abatimento da ordem de 110 mm com uma relação água/aglomerante igual a 0,384.
A durabilidade da matriz cimentícia é outro aspecto muito importante para os CAD. Os agentes agressivos podem exercer ação química ou física que deterioram o cimento Portland. Conforme resultados de Dias,[4] os geopolímeros constituem uma nova classe de materiais cimentícios de elevada resistência aos agentes agressivos (sulfatos e ácidos).

1.1 Os Geopolímeros

Os geopolímeros, também chamados polissialatos, são polímeros inorgânicos que compõem uma nova classe de materiais que apresentam características físicas e químicas próprias, que possibilitam diversas aplicações tecnológicas. Os materiais geopoliméricos são amorfos e sintetizados a partir da mistura de aluminossilicatos reativos e soluções alcalinas contendo NaOH ou KOH.[5]
As estruturas desses aluminossilicatos são caracterizadas de acordo com as unidades poliméricas, podendo ser dos seguintes tipos. Polissialatos Mn–(-Si-O-Al-O)n, polissiloxossialato Mn–(-Si-O-Al-O-Si-O-)n ou polidissiloxossialato Mn–(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)n.[5]
Os polissialatos cristalinos Mn –(-Si-O-Al-O-)n, bem como os polisiloxossialatos cristalinos Mn –(-Si-O-Al-O-Si-O-)n, resultam de condições hidrotérmicas de cura bem controladas.[6-8] Porém, os materiais que apresentam propriedades de interesse para aplicações industriais, como os cimentos polisiloxossialatos, são amorfos, podendo ser obtidos até mesmo em temperatura ambiente.[2]
Em relação ao cimento Portland, os cimentos geopoliméricos apresentam as seguintes vantagens: No processo de produção de oxido-aluminossilicatos, são utilizadas baixas temperaturas de calcinação (entre 600°C e 850°C). Nas idades iniciais é possível atingir uma resistência à compressão razoável (cerca de 70% da resistência final) e uma baixa permeabilidade (compatível ao granito), dentre outras.[2]

ISSN 1516-392X

1.2 Fadiga

1.2.1 Fadiga no concreto

As fissuras por fadiga nos concretos de cimento Portland são de natureza frágil, por apresentar pouca, ou nenhuma, deformação plástica associada à fissuração, ocorrendo a ruptura pela iniciação e propagação de microfissuras, sendo que em geral, a superfície de fratura é perpendicular à direção de tensão aplicada.[2]
Um dos maiores problemas encontrados por profissionais no campo da pavimentação está associado à formação de fissuras nas placas de concreto em um determinado período de serviço, pois, tais fissuras são a causa de diversos processos de deterioração em fases posteriores na estrutura do pavimento, caracterizando um estado limite de utilização da estrutura.[5]
Segundo Silva[2] a fadiga devido à aplicação de cargas repetidas, em pavimentos de concreto, é dependente do tipo de carga aplicada, da sua duração, bem como do número de ciclos de aplicações de cargas.
As tensões atuantes em um pavimento estão intimamente relacionadas ao tráfego e ao clima a que o pavimento está sujeito.

1.2.2 Hipótese de palmgren-miner (dano contínuo linear)

Silva[2] mostra em seus estudos que as propriedades de fadiga do concreto de cimento Portland limitam-se à aplicação de cargas a uma tensão constante, entretanto, isto não ocorre no campo. O histórico de tensões irá determinar níveis de carregamento com tensão variada, números de ciclos, sequências de carregamentos e tempos de relaxação diferentes.
Miner[9] apresentou em seus estudos uma equação linear de dano por fadiga, hoje conhecida como modelo de Palmgren-Miner. Este modelo assume que a resistência à fadiga não consumida pela repetição de uma dada carga fica disponível para a repetição de outras cargas, podendo ser determinado pela Equação 1.

$$D' = \sum \frac{n'}{N'} = 1 \qquad (1)$$

Onde D' é uma fração de dano, n' é o número de ciclos aplicado num nível determinado de tensão e N' é o número de ciclos que causará a ruptura por fadiga no mesmo nível de tensão.

1.3 Objetivo

O objetivo deste estudo foi caracterizar o compósito inorgânico usado como concreto para pavimento, através dos ensaios de fadiga (característica mecânica) e análise microestrutural (característica microestrutural investigada por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV).

ISSN 1516-392X

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Concreto de Cimento Geopolimérico (CCG)

Para a síntese do geopolímero foram utilizados os seguintes materiais: como fonte de Si e Al, um caulim e como fonte suplementar de SiO_2 e álcalis, silicato de sódio. Como fonte suplementar de álcalis, KOH comercial. A fonte de CaO foi a escória granulada de alto-forno (EGAF).

2.2 Concreto de Cimento Portland (CCP)

O cimento Portland, utilizado como referência de comparação, foi o cimento de alta resistência inicial do tipo CP V - ARI – RS, da Holcim.

2.3 Agregados

A areia quartzosa foi lavada e seca em estufa, aproveitando-se todo o material passante na peneira de 4,8 mm. O agregado graúdo caracterizado como brita graduação 0 foi identificado como traquito por ensaio petrográfico. O mesmo foi lavado durante o peneiramento para eliminar o material passante na peneira #200.

2.4 Moldagem de Corpos de Prova

Todos os corpos-de-prova de 100 mm x 100 mm x 400 mm foram moldados em uma única camada e vibrados em mesa vibratória por 15 segundos; posteriormente as amostras foram arrasadas. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos por sacos plásticos e mantidos nos moldes por um período de 48 horas.

2.5 Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram determinados segundo a Norma NBR 12142 (1991).[10]

2.6 Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica da marca MTS (*Material Test System*) com capacidade máxima de 10.000 kgf e equipado com osciloscópio, existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IME-SE4, onde todos os ensaios dinâmicos foram realizados.

2.6.1 Metodologia dos ensaios de fadiga

Nos ensaios de fadiga para ambos os concretos, CCG e CCP, buscou-se determinar o comportamento destes materiais quando submetidos aos seguintes casos, onde RT é o percentual da tensão de ruptura estática do concreto à flexão:

- para a frequência de 10 Hz, foi determinado o número de ciclos (N) necessário para a ruptura da amostra quando submetida a variações em (RT);
- com o mesmo valor de (RT) obtido para N = 105 com frequência de 10 Hz, foi determinado o número de ciclos (N) necessários para a ruptura do concreto com frequências de 1 Hz e 5 Hz;

ISSN 1516-392X

- para a frequência de 10 Hz, foi determinado o número de ciclos (N) necessários para a ruptura da amostra quando submetida a variações em (RT) de uma forma decrescente (ensaio à tensão variável); e
- para o mesmo valor de (RT) obtida em alguns dos ensaios e com uma frequência de 10 Hz, encontrar o número de ciclos que leve à ruptura do concreto quando a tensão mínima for superior àquela utilizada nos demais ensaios (Smin = 0,07).

Os ensaios dinâmicos foram realizados com a finalidade de determinar a resistência à fadiga dos concretos em estudo. Para tanto, os corpos-de-prova foram submetidos à carregamento cíclico, com frequência de 10 Hz, sendo que o valor de tensão mínimo foi de 7% e o máximo assumindo valores entre 70% e 85% da resistência estática de cada concreto. Cada nível de tensão máxima aplicado foi mantido constante até a ruptura de cada corpo-de-prova.

Quanto aos ensaios de fadiga com tensão variável, o modo de carregamento foi realizado da seguinte maneira: (a) variando a tensão de forma crescente; e (b) variando a tensão de forma decrescente. No primeiro caso, foram determinados três níveis de relação entre tensões que variaram de forma crescente, estes níveis de relação entre tensões empregados foram de RT1 = 0,70, RT2 = 0,75 e RT3 = 0,80, sendo que foram aplicados para cada um dos três níveis de tensões, os seguintes números de ciclos: RT1 = 50.000 ciclos, RT2 = 30.000 ciclos e RT3 = livre (até ruptura do corpo-de-prova). No segundo caso, em que a relação entre tensões variou de maneira decrescente, foram determinados dois níveis de relações entre tensões que foram, RT1 = 0,85 e RT2 = 0,80, sendo aplicado um número de 3.000 ciclos para RT1 e um número de ciclos livre (até a ruptura) para RT2. Estes níveis de variação de tensão máxima foram determinados em função de que seria possível comparar estes resultados com aqueles obtidos para relação entre tensões constante e igual a 0,80. A frequência adotada nos ensaios de tensão variável foi de 10 Hz para ambos os concretos.

O método utilizado nos ensaios foi PCA/66, que leva em consideração a curva tensão e o número de ciclos alcançado.

3 RESULTADOS

3.1 Resistência à Flexão

Os resultados de resistência a flexão média encontrada para o CCP foi de 5,4 MPa e serviu de base para os ensaios de fadiga. No caso do CCG, o resultado médio encontrado foi de 5,9 MPa.

Foram analisadas ainda, as deformações sofridas para ambos os concretos quando submetidos à aplicação de carga estática. Os resultados mostraram uma deformação final para o CCG 50% mais elevada que o CCP. Estes valores estão apresentados na Figura 1.

ISSN 1516-392X

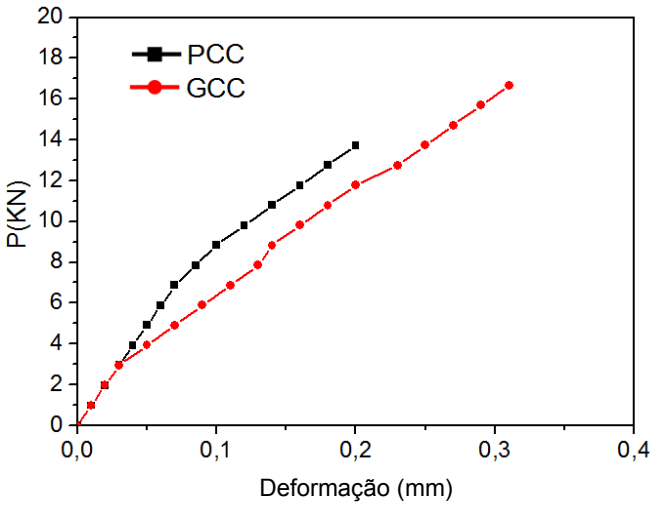


Figura 1. Relação entre carga e deformação para os dois concretos.

Percebe-se ainda que, até a carga de 3 kN, o CCP e o CCG apresentam o mesmo comportamento de deformação. A partir deste ponto é possível notar uma maior deformação sofrida pelo GCC para cargas mais elevadas. Este comportamento pode estar associado à boa aderência entre a matriz geopolimérica com os agregados, além da boa resistência a flexão apresentada pela matriz.

3.2 Fadiga

3.2.1 Ensaios com tensão constante

Foram realizados ensaios com diversos valores de RT, com o objetivo de analisar o comportamento dos dois tipos de concreto em estudo para diversos níveis de tensão máxima aplicada. Os resultados encontrados mostram que com o aumento da tensão máxima aplicada, menor a resistência à fadiga do material. Em contra partida, para níveis de tensão mais baixos, o número de ciclos suportado aumenta. Estes resultados concordam com os de outros autores, como Silva,[2] que realizou ensaios de fadiga em concreto Portland através de três níveis de RT: 0,65, 0,75 e 0,85. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à fadiga do concreto é diferente para os diversos níveis de tensão aplicados, verificando que o número de ciclos sob fadiga para RT = 0,65 foi superior aos encontrados para as outras relações. A Figura 2 mostra a curva Relação entre tensões versus Número de ciclos, para os dois concretos.

ISSN 1516-392X

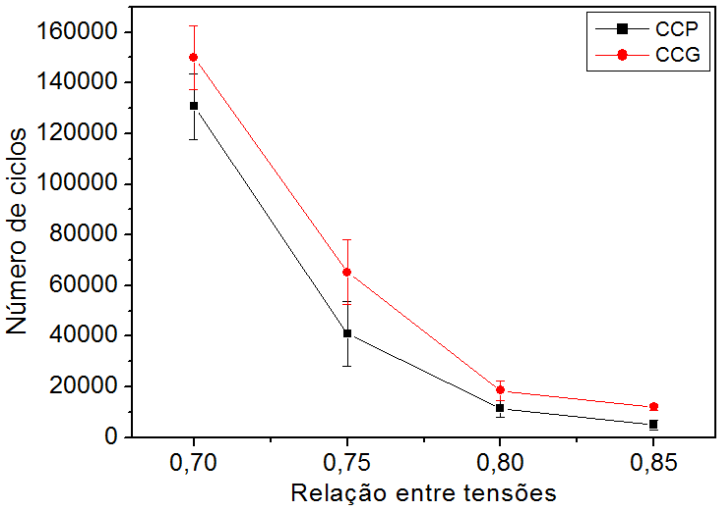


Figura 2. Variação do Número de ciclos de fadiga com a relação entre as tensões aplicadas, para o CCG e CCP.

É possível perceber que no caso de relações entre tensões de 0,70, a diferença média do CCG em relação ao CCP, para as mesmas condições, apresentou valores 15% superiores. Para relações entre tensões de 0,85, o CCG exibiu valores 96% mais elevados, quando comparado ao CCP. Isto indica um comportamento favorável do CCG, sob fadiga, para altos e baixos níveis de tensão (RT) aplicada.

3.2.2 Ensaios com diferentes frequências de aplicação de carga

Para o estudo da influência da frequência na fadiga dos concretos, foram realizados ensaios com frequências diferentes daquela adotada na maioria dos ensaios deste trabalho, que foi de 10 Hz. Para os ensaios de fadiga com diferentes frequências foram utilizados os valores de 5 Hz e 1 Hz, adotando-se a mesma relação entre tensões, de RT = 0,75 (Figura 3).

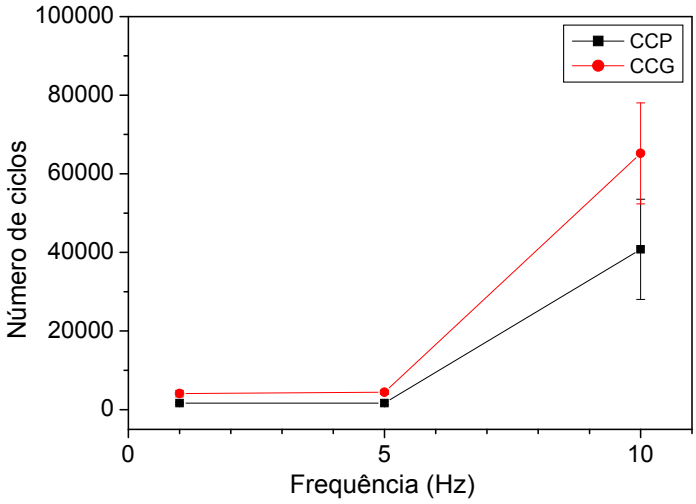


Figura 3. Relação entre a frequência e o número de ciclos alcançados.

Através da Figura 3 é possível observar que quanto mais elevada for a frequência aplicada, maior o número de ciclos alcançados para o CCG. Outros autores como [11] também observaram a diminuição do número de ciclos sob fadiga para CCP, com uma frequência 5 Hz.

ISSN 1516-392X

Para todos os níveis de frequência aplicados os ganhos de resistência à fadiga para o CCG, foram mais elevados do que os alcançados pelo CCP. No caso de pavimentos de concreto, a frequência é um dos principais fatores que influenciam na durabilidade.[11] De acordo com os resultados expostos, o CCG apresenta comportamento mais favorável à variação de frequências a que os pavimentos estão sujeitos em campo.
Entretanto, quando as frequências são variáveis o número de ciclos perde seu valor de comparação. Para uma melhor avaliação da vida útil do pavimento, a variável temporal é o parâmetro que deve ser introduzida no estudo de fadiga.
Através da relação: f = 1/T, sendo f a frequência e T o período, é possível obter os resultados mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Avaliação da vida útil sob fadiga

CCG		
Frequência (Hz)	Período (s)	Total (s)
10	0,1	6519,6
5	0,2	882,4
1	1,0	4110
CCP		
Frequência (Hz)	Período (s)	Total (s)
10	0,1	4079,0
5	0,2	329,0
1	1,0	1641

Para a aplicação da frequência de 10 Hz a vibração do material é muito rápida, o que não permite o alívio completo das tensões dentro do mesmo ciclo de carregamento. Neste caso ocorre um maior efeito de tração e um menor efeito de fadiga.
Com a aplicação de 5 Hz a vibração é mais lenta, havendo o alívio parcial das tensões dentro de um mesmo ciclo de carregamento. O efeito neste caso é mais acentuado tanto em fadiga quanto em tração.
Já para o carregamento com frequência de 1 Hz a vibração é muito lenta, ocorrendo assim um alívio total das tensões dentro de um mesmo ciclo de carregamento. Neste caso há um efeito moderado de tração e fadiga, além de um maior tempo sem carregamento.

3.2.3 Ensaios com tensão variável

Os ensaios com tensão variável foram realizados através da variação da RT de forma crescente e decrescente. Os resultados mostram que quando a tensão é aplicada de forma decrescente, a hipótese para a determinação do dano acumulado pode não ser segura (Figura 4).

ISSN 1516-392X

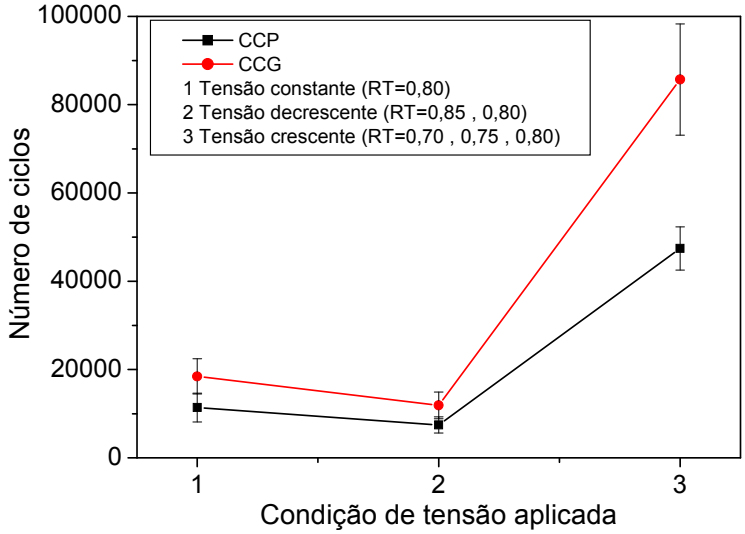


Figura 4. Influência das condições de aplicações de tensão para os dois concretos estudados.

Entretanto, quando a tensão varia de forma crescente, a hipótese de Palmgren-Miner é válida. Os resultados encontrados neste item tanto para o CCP, quanto para o CCG, indicam a concordância dos autores com relação a condição de tensão aplicada.

É possível observar que existe pouca influência da variação de tensões, quando esta for aplicada de forma crescente, no comportamento dos concretos sob fadiga. Estas observações também foram feitas por diversos autores,[2,11] através da aplicação de dois estágios de tensão. Aplicando níveis de tensão que iam de alto para baixo e níveis de baixo para alto, os autores puderam concluir que a tensão quando aplicada de baixa para alta, a hipótese de Palmgren-Miner seria correta; entretanto isto não era observado variando a tensão de alta para baixa, ou seja, a hipótese nestas condições conduzia a erro nos resultados. É possível observar ainda que o número de ciclos obtidos foi menor do

que àqueles encontrados nos ensaios com tensão constante (RT = 0,80), e inferiores também àqueles obtidos para tensão variável de forma crescente. Isto indica a maior influência da variação de tensões, quando aplicada de forma decrescente, no comportamento do concreto sob fadiga. Estes resultados concordam com aqueles encontrados por Silva,[2] onde o autor observa a menor resistência à fadiga encontrada em tensões decrescentes.

Quanto ao desempenho dos concretos nas variações de tensões, observa-se a bom desempenho do concreto geopolimérico em tensões crescentes e decrescentes quando comparado ao concreto Portland.

3.2.4 Ensaios com diferentes tensões mínimas

Para o estudo da influência da tensão mínima na fadiga do concreto, através das alterações no número de ciclos com um aumento da relação entre tensões mínimas ($\sigma min/fct,m = R$), foram adotados dois novos valores: R = 0,20 e R = 0,40, distintos do valor utilizado nos demais ensaios que foi de R = 0,07. Com estes dois novos níveis de tensão mínima foram realizados ensaios com relação entre tensões máxima de RT = 0,75, mantendo-se cada ensaio com RT constante.

É importante relatar que a maioria dos trabalhos sobre fadiga consultados, não levam em consideração o efeito provocado pela tensão mínima. Considerando na maioria das vezes a tensão mínima igual à zero, ou, próximo desse valor. Um

ISSN 1516-392X

exemplo é o estudo desenvolvido por Crepaldi[11] em concreto com adição de látex, em que o autor realiza seus ensaios com tensão mínima sempre igual à zero.

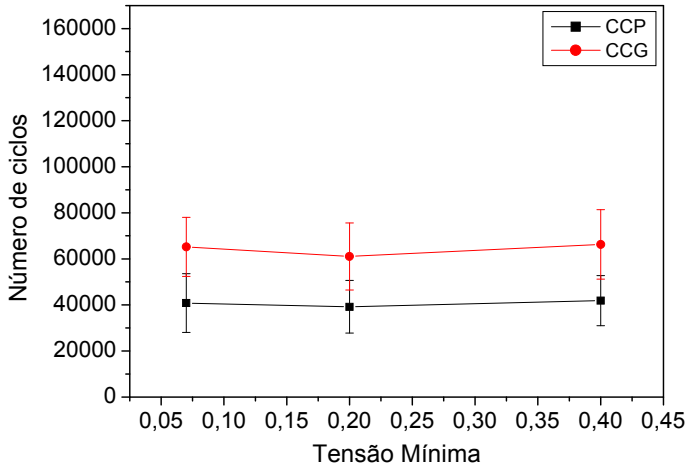
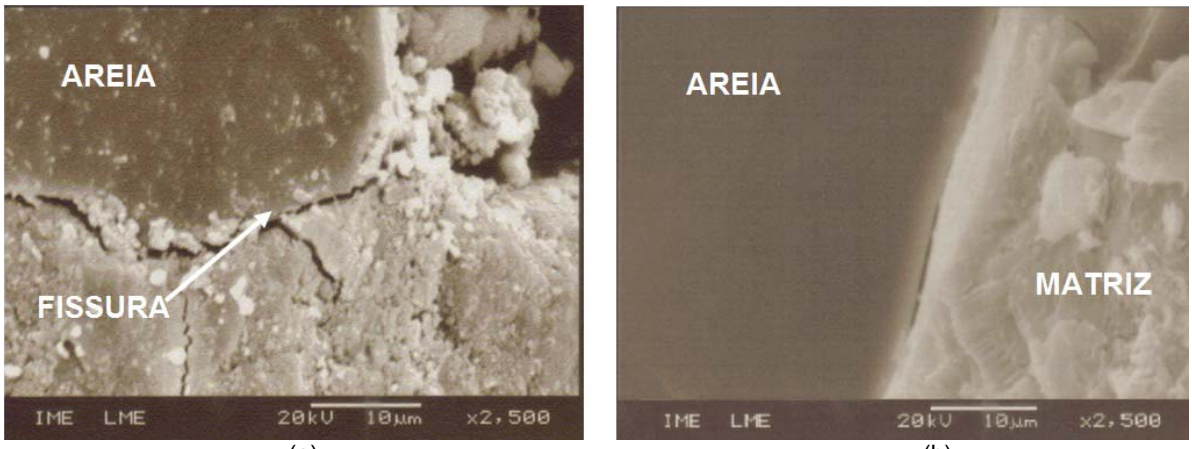


Figura 5. Variação de tensão mínima para os dois concretos.

De acordo com estes resultados (Figura 5), é possível observar que existe pouca ou nenhuma influência do aumento de R no número de ciclos de fadiga encontrado, possivelmente pelo fato de se ter aumentado a tensão mínima em função da relação entre tensões. Isto significa uma alteração pequena, quando comparada ao comportamento em pista, onde as tensões mínimas aumentam de forma mais significativa, não estando apenas sob a ação das cargas do tráfego, mas também das intempéries.

3.3 Análise Microestrutural

Foram obtidas imagens por elétrons secundários da superfície de fratura dos concretos ensaiados à fadiga, visando observar a morfologia e as características da zona de transição na interface dos agregados com a matriz geopolimérica e com a matriz de cimento Portland. As amostras para a análise em MEV foram retiradas dos corpos-de-prova após a ruptura por fadiga, onde a relação entre tensões para este caso foi de 0,80.

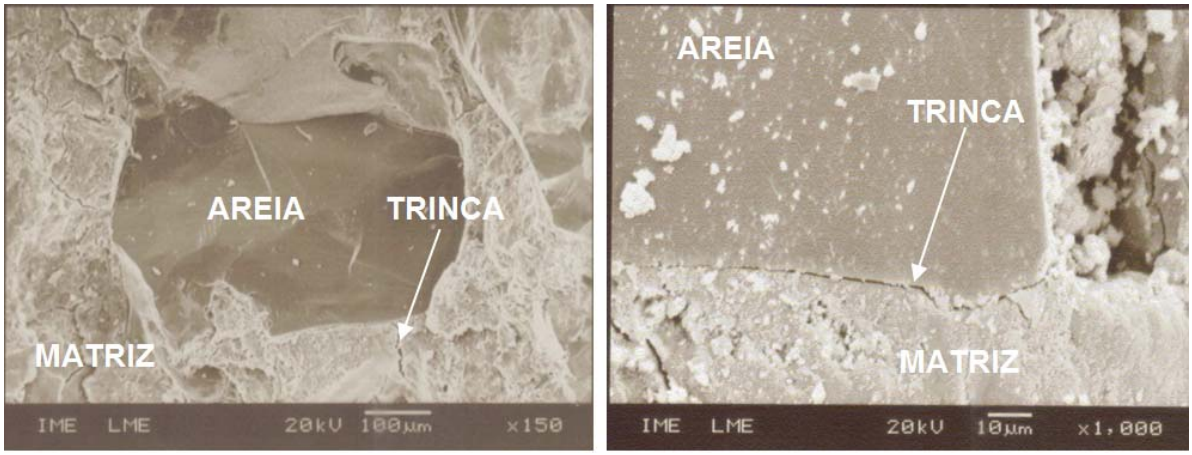


(a) (b)

Figura 6. Micrografias obtidas por MEV de ambos os concretos. (a) Zona de transição no CCP; e (b) interface matriz agregado no CCG.

ISSN 1516-392X

A boa aderência entre a matriz do CCG e a areia pode ser notada na Figura 6b, a partir da menor degradação da zona de interface agregado/matriz do material após a aplicação do carregamento cíclico, devido à inexistência de gradientes de concentração de Portlandita nesta zona. Já na Figura 6a é possível observar que a fissura tende a contornar os agregados pela interface matriz agregado, assim como acontece no CCG. Entretanto, no CCP observa-se uma maior degradação na zona de transição, devido a porosidade e a presença de cristais de Portlandita nesta zona, o que limita consideravelmente as propriedades mecânicas do concreto.
A Figura 7 mostra a propagação da fissura no CCP e CCG até encontrar o agregado, onde a partir deste ponto ocorre um desvio em sua trajetória passando a contornar o agregado para continuar seu crescimento. Segundo alguns autores,[3] se o agregado é mais poroso do que a matriz, as partículas de agregado podem resultar num caminho mais curto através do concreto. Caso contrário, os agregados atuam como obstáculo à propagação desta fissura. No caso do CCG ocorrem microfissuras da ordem 1 µm que são formadas devido à tensões internas geradas durante as reações de geopolimerização. Para a diminuição do efeito destas fissuras no comportamento mecânico do concreto, podem ser adicionadas cargas particuladas, assim como fibras metálicas.



(a) (b)

Figura 7. Micrografias obtidas por MEV de ambos os concretos. (a) Propagação da trinca no CCG; e (b) propagação da trinca no CCP.

4 CONCLUSÕES

Nos ensaios de flexão é possível notar uma maior deformação sofrida pelo CCG para maiores cargas. Este comportamento pode estar associado à boa aderência entre a matriz geopolimérica com os agregados, além boa resistência a flexão apresentada pela matriz.
A resistência à fadiga quanto a variação de tensões em ambos os concretos, foi maior do que quando submetido a resistência à fadiga com tensão constante, somente, quando a tensão variou de baixa para alta (tensão crescente). Para a variação de tensão de um nível mais elevado para um mais reduzido, o número de ciclos obtido foi inferior àquele alcançado com tensão constante.
As análises por microscopia eletrônica de varredura mostram que a interface entre os agregados e as fibras, no caso do CCG reforçado por fibras é densa e contínua, assim como a da matriz. A estrutura mais densa e compacta do CCG foi determinante no bom desempenho deste concreto, em relação aos ensaios do CCP.

ISSN 1516-392X

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro e aos Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório de Materiais Conjugados do IME.

REFERÊNCIAS

1 AÏTICIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. 1 ed. São Paulo: Pini, 2000. 662 p.
2 SILVA, A. C. R. Comportamento do concreto geopolimérico para pavimento sob carregamento cíclico. 2006. 184p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, 2006.
3 THOMAZ, E. C. S. Desempenho do concreto Geopolimérico. 108p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia, 2000.
4 DIAS, D. P. Cimentos Geopoliméricos: Estudo de Agentes químicos Agressivos, Aderência e Tenacidade à Fratura. 216p. Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, 2001.
5 DAVIDOVITS, J., "Geopolymers Inorganic Polymeric New Materials", Journal of Thermal Analysis. 37, 1633 –1656, 1991.
6 BARBOSA, V.F.F.; MACKENZIE, K.J.D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials. Vol. 2, 2000, pp. 309–317.
7 DEVENTER, J. S. J. V., PROVIS, J. L., "Geopolymerisation kinetics. 1. In situ energy-dispersive X-ray diffractometry", Chemical Engineering Science 62 2309 – 2317, 2007.Machenzie
8 MACKENZIE, K. J. D., BARBOSA, V. F. F., "Synthesis and thermal behavior of potassium sialate geopolymers", Materials Letters, 57, 1477– 1482, 2003.
9 MINER, M.A. Cumulative Damage in Fatigue. Trans. ASME, v 67, pp. 159-164.
10 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12142 (MB3483) - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro. Dezembro. 1991.
11 CREPALDI, A. P. P. Contribuição ao estudo da fadiga do concreto. Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. vol. 3, p. 193-208, 2001.