UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA - EEL

ÉVELYN CASSILEINE BENTO DOS SANTOS MOLITERNO

Estudo do posicionamento do dispositivo de teste utilizada no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha e da influencia do tamanho de agregado nos resultados de medida de energia de fratura utilizando o método da cunha e o da barra entalhada e flexionada

Lorena

2013

ÉVELYN CASSILEINE BENTO DOS SANTOS MOLITERNO

Estudo do posicionamento do dispositivo de teste utilizada no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha e da influencia do tamanho de agregado nos resultados de medida de energia de fratura utilizando o método da cunha e o da barra entalhada e flexionada

Dissertação apresentado a Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para a obtenção de título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

Edição Reimpressa e Corrigida

Lorena

Janeiro, 2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha Catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Especializada em Engenharia de Materiais
USP/EEL

Moliterno, Évelyn Cassileine Bento dos Santos

Estudo do posicionamento do dispositivo de teste utilizada no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha e da influencia do tamanho de agregado nos resultados de medida de energia de fratura utilizando o método da cunha e o da barra entalhada e flexionada/ Évelyn Cassileine Bento dos Santos Moliterno ; orientador Sebastião Ribeiro. --ed. reimpr., corr.-- Lorena, 2013.

59 p.: il.

Dissertação (Mestre em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo.

1. Argamassa 2. Refratário 3. Energia de fratura 4. Método da cunha I. Título.

CDU 666.3

Aos meus pais, Edna e Cassimiro;

Aos meus irmãos, Ésoly e Wesley;

Ao meu amado marido Daniel;

E aos Oficiais do inesquecível Esquadrão Centauro.

AGRADECIMENTOS:

- À Deus, pela salvação e vida;
- Aos meus pais, por tudo o que eu sou;
- Aos amigos pelo apoio, amizade e companheirismos em todos os momentos, especialmente à Ésoly, Reny e Giseli;
- Ao professor Dr. Sebastião Ribeiro pela orientação, dedicação e ensino;
- A Escola de Engenharia de Lorena (EEL) e ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) e ao Programa de Pós graduação em Engenharia de Materiais, por permitir o desenvolvimento deste trabalho;
- À Indústria Brasileira de Artigos Refratários Ltda (IBAR) pelo apoio material e técnico, em especial ao Dr. Waldir de Souza Resende;
- À aluna de iniciação científica Mirella de Marchi;
- Aos técnicos do DEMAR pelo auxílio na execução experimental deste trabalho, em especial aos técnicos: Geraldo Prado, Francisco Paiva e Valdir;
- À Força Aérea Brasileira, em especial ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeronáutica (DCTA) pelo apoio na conclusão deste trabalho.

“Tudo que te vier à mão para fazer, fazê-o conforme as tuas forças, porque na sepultura para onde vais, não há obra, nem projeto, nem ciência, nem sabedoria alguma”.

“Porque dele e por ele, e para ele são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente.
Amém.”

Eclesiastes 9:10 e Romanos 11:36

RESUMO

MOLITERNO, E.C.B.S. Estudo do posicionamento do dispositivo de teste utilizada no ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha e da influencia do tamanho de agregado nos resultados de medida de energia de fratura utilizando o método da cunha e o da barra entalhada e flexionada. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

Os materiais cerâmicos são utilizados pelo homem há milhares de anos e podem ser considerados os primeiros materiais utilizados na fabricação de ferramentas. Argamassas são materiais cerâmicos formados pela mistura de cimento, areia e água, são fluidos nas primeiras horas e endurecem com o tempo, ganhando resistência mecânica, já os refratários são materiais constituídos basicamente por duas partes, uma de granulometria fina denominada matriz e a outra de granulometria grosseira, chamada agregado, trabalham em altas temperaturas e muitas vezes sofrem choques térmicos. Devido a sua fragilidade, são susceptíveis a fratura catastrófica, por isso o conhecimento de seu comportamento mecânico é tão importante. Uma importante propriedade dos materiais cerâmicos é a energia de fratura e o método mais conhecido para a sua determinação é o da barra entalhada flexionada em três ou quatro pontos, porém o grande problema deste método é a relação de tamanho de agregado/área de fratura, pois como a barra apresenta, em geral, pequenas dimensões, o material pode apresentar um agregado de dimensões próximas à dimensão da área de fraturada e o resultado final pode ser fortemente afetado. Então, em 1986, Tschegg patenteou o método da cunha (wedge splitting test) que minimiza este efeito, devido à utilização de amostras com grande área de fratura. Desde então, este método vem sendo utilizado com frequência por diversos pesquisadores no mundo. Porém não há estudos publicados que definam a posição ideal dos roletes do dispositivo de teste, levando ao uso de diferentes posições, sem que se saiba como isso pode influenciar o ensaio. Além de não existir uma definição de, a partir de que tamanho de agregado o método da barra entalhada passa a ser desaconselhável sendo necessário o uso do método da cunha. Neste trabalho analisou-se a influência da posição dos roletes e do tamanho de agregados nas medidas de energia de fratura e na carga máxima atingida no ensaio.

Palavras-chave: Argamassa. Refratário. Energia de fratura. Método da cunha. Método da barra entalhada.

ABSTRACT

MOLITERNO, E.C.B.S. Study of test device positioning at stable crack propagation test using wedge splitting test and also influence of aggregate size on the measurement results of fracture energy using wedge splitting test and the bending test on notched beams. 2013. 59 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

The ceramic materials are used by humans for thousands of years and can be considered the first materials used in the manufacture of tools. Mortar are ceramic materials made by the mixture of cement, sand and water, it is fluid in the first hours and stiffen over time, gaining mechanical strength, the refractories in turn are made basically of two phases, one of fine granulometry called matrix and another of coarse called aggregate. It works over high temperature and many times suffer thermal shock. Due to its fragility, it is susceptible to catastrophic fracture; therefore the knowledge of its mechanical behavior is so important. One of the mainly properties of ceramic materials is the fracture energy and one of the most known method for its determination is of three-point bending test on notched beams, but the biggest problem of this method is the relation between aggregate size and fracture area, because as the beam has small dimensions the aggregate can have a dimension so closed of the fracture area dimension and the final result can be tightly affected. Then in 1986, Tschegg patented the wedge splitting test, which minimizes this effect, because of the use of samples with a big fracture area. Since then, this method has been used for scientists around the world. But there are no studies that define the roll position of the test device, leading to the use of different positions, without know how it can influence the test. Besides not having a definition of from what aggregate size the wedge splitting test is advisable in despite of the bending test on notched beams. In this work was analyzed the influence of the rolls positions in the wedge splitting test and of the aggregate size in the measures of fracture energy and maximum load of test.

Keywords: Mortar. Refractory. Fracture energy. Wedge splitting test. Three-point bending test on notched beams.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Evolução da produção do cimento em milhões de toneladas de 2003 a 2010	17
Figura 2: Estrutura do concreto refratário.....	19
Figura 3: Curva carga-deslocamento típica de um ensaio de propagação estável de trinca.	22
Figura 4: Diagrama de estabilidade da trinca para um teste de trabalho de fratura.....	24
Figura 5: Curva Carga x Deslocamento para as três regiões de estabilidade	25
Figura 6: Esquema da zona de processo de trinca para materiais refratários	26
Figura 7: (a) Geometria e dimensões da amostra para medida da energia de fratura pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos e (b) seção transversal, mostrando a área por onde a trinca se propaga.....	27
Figura 8: (a) Representação esquemática do método da cunha e detalhes de construção das peças de transmissão da carga. F_H é força horizontal para a abertura da trinca e α , o ângulo da cunha (b) geometria da amostra e seção transversal mostrando a área por onde a trinca se propaga.	29
Figura 9: Dimensões da amostra.....	31
Figura 10: Posição dos roletes: B é a distância entre o ponto de aplicação da força F_H e a ponta do entalhe.	32
Figura 11: Superfície de fratura de uma amostra de tijolo refratário. As áreas marcadas indicam exemplos de onde a trinca circundou os agregados da amostra.....	35
Figura 12: Curvas carga-deslocamento (F-s) de amostras de tijolo refratário ensaiadas pelo método da cunha com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e a ponta da trinca de 33 mm (a) e 23 mm (b).	36
Figura 13: Resultado de carga máxima e energia de fratura de amostras de tijolo refratário, ensaiadas com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e a ponta da trinca de 33 mm e 23 mm.	37
Figura 14: Curva carga-deslocamento de amostras de argamassa ensaiadas nas três diferentes posições dos roletes.....	38

Figura 15: Energia de fratura versus a distância entre o centro dos roletes.....	40
Figura 16: Torque versus a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe.	40
Figura 17: Carga máxima versus a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe.	41
Figura 18: Fotografias das superfícies de fratura das amostras de concreto refratário sinterizadas a 1000°C, por 5 horas, com tamanho máximo de agregados de (a) 3,35 mm; (b) 4,75 mm; (c) 6,35 mm e; (d) 8,0 mm.	42
Figura 19: Curvas carga-deslocamento representativas das amostras de concreto refratário com agregados de (a) 3,35 mm, (b) 4,75 mm, (c) 6,35mm e (d) 8,0mm, ensaiadas pelo método da cunha.	43
Figura 20: Energia de fratura em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da cunha.	45
Figura 21: Carga máxima em relação ao tamanho de agregado medido pelo método da cunha.	45
Figura 22: Deslocamento em relação ao tamanho de agregado medido pelo método da cunha.	46
Figura 23: Curvas carga-deslocamento representativas das amostras de concreto refratário com agregados de (a) 3,35 mm, (b) 4,75 mm, (c) 6,35 mm e (d) 8,0mm, ensaiadas pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.	47
Figura 24: Energia de fratura em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da barra entalhado e flexionada em três pontos.....	48
Figura 25: Carga Máxima em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.	49
Figura 26: (a) Carga Máxima em relação ao tamanho de agregado; (b) Deslocamento em relação ao tamanho de agregado. Ambos medidos pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.	49
Figura 27: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 3,35 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x.	51
Figura 28: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 4,75 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x.	51

Figura 29: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 6,35 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x. 51

Figura 30: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 8,00 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carga máxima e energia de fratura de amostras de tijolo refratário, em função da distância B (entre o centro do rolete e a ponta da trinca).	37
Tabela 2: Carga máxima e energia de fratura de amostras de argamassa, em função da distância B (entre o centro do rolete e a ponta da trinca).	39
Tabela 3: Carga máxima e energia de fratura de amostras de Supercastibar FL50 BF, com diferentes tamanhos de agregado, ensaiadas pelo método da cunha.	44
Tabela 4: Carga máxima e energia de fratura de amostras de Supercastibar FL50 BF, com diferentes tamanhos de agregado, ensaiadas pelo método da barra entalhada.	48
Tabela 5: Tabela comparativa entre os resultados de energia de fratura de concretos refratários obtidos pelos métodos da barra entalhada e flexionada e da cunha.	50
Tabela 6: Composição química dos pontos avaliados (indicados na figura 27) do concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 3,35 mm.	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO	14
3. JUSTIFICATIVA	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1 Materiais Cerâmicos.....	16
4.2 Mecânica da fratura.....	21
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
5.1. Avaliação da carga máxima e na energia de fratura em função da posição dos roletes no ensaio do método da cunha	30
5.2. Avaliação da influência do tamanho máximo de agregado de um concreto refratário na energia de fratura.....	32
5.3. Análise dos dados.....	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
6.1. Avaliação da carga máxima e na energia de fratura em função da posição dos roletes no ensaio do método da cunha.....	35
6.2. Avaliação da influência do tamanho do agregado na carga máxima e na energia de fratura de um concreto refratário medidos pelo método da cunha e da barra entalhada.....	42
6.2.1. Método da cunha.....	42
6.2.2. Método da Barra entalhada.....	46
6.2.3. Análise composicional.....	52
7. CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO A.....	59

1. INTRODUÇÃO

Há milhares de anos os materiais cerâmicos vêm sendo utilizado pela humanidade e ao longo do tempo surgiu a necessidade de se melhorar as características destes materiais de acordo com a sua utilização. Assim, novos produtos foram descobertos e passaram a ser utilizados em diferentes aplicações.

Dois materiais cerâmicos importantes são o cimento hidráulico e o refratário. O principal uso para o cimento é na engenharia civil, na qual é um produto indispensável desde antes do século 19 (isso por possuir várias aplicações). Na forma de argamassa é utilizado para o assentamento de tijolos e blocos, pisos e revestimentos, impermeabilização, regularização e acabamento de superfícies etc. Os refratários, por sua vez têm como principal função facilitar a produção de outros materiais, tais como metais, vidros, petroquímicos, e cimentos, pois eles suportam o trabalho em altas temperaturas. O maior usuário dos refratários é o setor siderúrgico e tem influenciado o perfil da demanda desses materiais, exigindo concretos refratários versáteis, de melhor qualidade e de maior conteúdo tecnológico. Isso que levou, com o passar do tempo, a criação dos concretos refratários auto-escoantes. São classificados concretos auto-escoantes todos aqueles dotados de elevada fluidez, onde se dispensa a necessidade de energia externa para sua moldagem.

Com a crescente utilização de materiais cerâmicos surgiu a necessidade de se entender o seu comportamento mecânico. Suas principais propriedades são: módulo de ruptura, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica linear, resistência a compressão, energia de fratura, resistência ao dano por choque térmico, resistência à erosão, além das propriedades químicas como a resistência à corrosão.

Neste trabalho foram estudados dois métodos de determinação de energia de fratura: o método da cunha no qual foram estudadas a influência do posicionamento dos roletes do dispositivo de teste no ensaio e a influência do tamanho do agregado do material nos resultados do teste e; o método da barra entalhada no qual também foi estudado a influência do tamanho de agregado nos resultados do teste e posteriormente, comparado com os dados obtidos pelo método da cunha.

2. OBJETIVO

Este trabalho visou estudar os testes de medida de energia de fratura, com os objetivos principais de:

- Avaliar a influência do posicionamento dos roletes do dispositivo de teste sobre os resultados de carga máxima e energia de fratura utilizando o método da cunha;
- Avaliar a influência do tamanho de agregado na estabilidade dos testes medida de energia de fratura de concretos refratários pelos métodos da cunha e da barra entalhada;
- Comparar o método da barra entalhada e flexionada com o método da cunha para a determinação da energia de fratura de concretos;
- Contribuir com o aperfeiçoamento da técnica do método da cunha para a avaliação da energia de fratura de materiais cerâmicos.

3. JUSTIFICATIVA

Desde o desenvolvimento do método da cunha para a determinação de energia de fratura ele vem sendo utilizado em vários laboratórios no exterior. Seus usuários defendem que este método é mais confiável do que o método da barra entalhada flexionada devido ao fato de que em materiais com agregados grandes, estes poderiam ter dimensões muito próximas as da seção de fratura neste método, o que poderia afetar fortemente o resultado. Este efeito seria minimizado na utilização do método da cunha, visto que os corpos de prova utilizados neste teste apresentam dimensões maiores. Porém, não há uma definição sobre a partir de que tamanho de agregado é aconselhável o uso do método da cunha ao invés do método da barra entalhada.

Também não há uma definição do posicionamento dos roletes do dispositivo de teste, levando ao uso de diferentes posições, sem que se saiba como isso pode influenciar os resultados do ensaio.

Diante disso o projeto foi elaborado para estudar o método da cunha e seus parâmetros, analisar a influência do posicionamento dos roletes e definir a partir de qual tamanho de agregado este método é considerado melhor que o da barra entalhada.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Materiais Cerâmicos

O homem primitivo usava pedras nativas como ferramentas. O desenvolvimento destas ferramentas resultou do descobrimento de como dar forma a pedra bruta cortando, afiando e polindo. Algum tempo depois foi descoberto que a argila ao longo da margem dos rios poderia ser moldada em utensílios e tijolos que podiam ser usados após secar. E esta foi seguida por uma descoberta associada com tratamento da argila em temperaturas mais altas do que a da secagem simples de artigos cerâmicos em ar ou no sol, visando uma melhoria no desempenho. Desde então, novos produtos cerâmicos e formas de aplicação foram descobertos, seguindo uma cadeia evolutiva até os dias de hoje, em que são produzidos produtos cerâmicos para uma série de diferentes aplicações [1].

A produção de cerâmica em grande quantidade começou durante o quarto milênio a.C. no Oriente Médio. A transição para uma indústria de manufatura em larga escala ocorreu na Europa durante o século 18. No início desse século olarias eram indústrias de artesanato, mas a situação foi se transformando e no final do século, o impacto de uma maior compreensão científica mudou o campo das cerâmicas. Ao mesmo tempo, a indústria cerâmica desempenhou um papel importante na revolução industrial e no desenvolvimento de sistema de fábricas na Inglaterra e em toda Europa. A indústria cerâmica se tornou uma indústria de exportação importante e crescente atraindo os empresários e engenheiros para desenvolvimento de novos métodos de produção e de “marketing” [2].

No passado, a produção de produtos cerâmicos era em grande parte empírica e para manter a uniformidade, os produtores sempre obtinham suas matérias primas na mesma fonte e evitavam mudar qualquer detalhe do processo. Isso, porque eles tratavam com sistemas muito complexos que não entendiam. Hoje, como resultado de anos de pesquisa, o processamento e a fabricação são otimizados baseados em um entendimento dos princípios básicos científicos e de engenharia [2].

Os materiais com propriedades cimentícias tiveram a Roma e a Grécia antigas como

as pioneiras na sua utilização. E devido as suas propriedades químicas e físicas incomparáveis produziram um material tão duradouro que permanece até os dias de hoje em magníficas estruturas como as do Pantheon em Roma [2]. A produção de cimento no mundo está em constante crescimento, no Brasil ela foi de 35,1 milhões de toneladas em 2003 e em 2010 atingiu 59,1 milhões de toneladas, conforme ilustra a figura 1, e com um crescimento esperado de 7,7% para 2011, o que representará um crescimento de cerca de 64% em relação aos números de 2001, ou seja, um crescimento de 64% em 10 anos, diferente da década passada, quando o crescimento de 2001, em relação ao ano de 1991 foi de 41,8%, conforme dados do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) [3].

Figura 1: Evolução da produção do cimento em milhões de toneladas de 2003 a 2010.

Fonte: SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) [3].

Quando misturado com areia e cascalho é obtido o concreto, que é o material de construção civil mais utilizado nas nações industrializadas [1,4]. Duas propriedades do concreto, que o destaca como material construtivo, são: sua resistência à água – diferentemente do aço e da madeira, o concreto sofre menor deterioração quando exposto à água, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água – e sua maleabilidade – que possibilita obter inúmeras formas construtivas inusitadas.

Além disso, outras vantagens são a abundância de seus elementos constituintes e seus baixos custos [4].

Já as argamassas consistem em uma mistura de cimento, areia e água, são fluidos nas primeiras horas e endurecem com o tempo, adquirindo resistência mecânica. As etapas para a produção de uma argamassa são a mistura da areia com cimento e água em proporções adequadas e cura. A cura é uma fase importante do processo, pois nela ocorrem as reações de hidratação que conferem grande parte da resistência mecânica às argamassas [5]. É o material mais comumente usado na construção civil no mundo inteiro e possui diversas aplicações como assentamento de tijolos e blocos, pisos e revestimentos, impermeabilização e regularização e acabamento de superfícies, dentre outras [6].

Outro marco importante para a indústria de materiais cerâmicos foi o desenvolvimento de refratários, que teve um maior impacto na produção de ferro, aço, na indústria de vidros e dos próprios materiais cerâmicos [1,7]. O consumo de refratários no Brasil está fortemente ligado à indústria siderúrgica, que absorve aproximadamente 70% da produção de refratários em termos de volume na produção de ferro e aço [7,8]. Assim como na história de outros materiais cerâmicos, o maior progresso em refratários se deu através do entendimento científico e de novos métodos de caracterização [1] o que resulta na redução do consumo específico de refratários. Como referência da década de 60, precisava-se de 30 kg de refratário para produzir uma tonelada de aço. Em 1985 eram necessários 20 kg para produzir a mesma quantidade de aço, valor este, estima-se, estar hoje está abaixo de 10kg de refratário/t aço [7].

4.1.1. Materiais cerâmicos refratários

Uma classe importante dos materiais cerâmicos utilizados em larga escala são os refratários [9,10]. Estes têm como principal função facilitar a produção de outros materiais, tais como metais, vidros, petroquímicos, cimentos e outros materiais cerâmicos, pois eles suportam a utilização em altas temperaturas na fabricação destes materiais. O primeiro concreto refratário foi desenvolvido e utilizado por Sainte-Claire Deville, na França, antes de 1856. Antes dos anos 20 a utilização de refratários era algo baseado em tentativa e erro. Frequentemente usavam-se produtos naturais como rochas e argilas, que devido a sua

variedade de composição e propriedades, tendiam a falhas imprevisíveis. Historicamente, a força motriz para a mudança foi o desenvolvimento de novas tecnologias nos processos e o desejo por parte dos produtores de materiais de aumentar a produtividade, através de uma vida em trabalho mais longa, geralmente em temperaturas cada vez mais altas. Isso foi possível através da melhoria das propriedades termomecânicas e resistência à corrosão dos refratários. Mais recentemente, outros fatores tornaram-se importantes, tais como a necessidade de proteger o ambiente e as pessoas de resíduos e emissões insalubres [9].

O maior usuário dos refratários é o setor siderúrgico e tem influenciado o perfil da demanda desses materiais exigindo concretos versáteis, de melhor qualidade e de maior conteúdo tecnológico [8,11,12].

A principal propriedade dos refratários é a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem fundir ou se decompor, e de permanecerem inertes quando expostos a ambientes severos [10,12,13]. Também a capacidade de proporcionar isolamento térmico é com frequência uma consideração importante [12]. Porém, na escolha de um refratário para uma aplicação particular uma variedade de propriedades físicas deve ser considerada.

O desempenho de um refratário depende em grande parte da sua composição. Com base nisso, existem vários tipos como argila refratária, sílica, refratários básicos e refratários especiais [12].

Figura 2: Estrutura do concreto refratário

Os concretos refratários possuem uma estrutura complexa contendo basicamente duas partes, uma constituída por matérias primas com granulometria mais fina chamada de matriz, a outra mais grosseira chamada de agregados (Figura 2). As quantidades e as composições químicas e mineralógicas das matérias-primas que constituem essas partes são fundamentais para produzirem as propriedades desejadas para esses materiais durante o trabalho [9,13,14].

O surgimento de diversos processos de aplicação e moldagem dos concretos refratários estimulou o desenvolvimento de materiais com comportamentos reológicos distintos e específicos para cada técnica, tais como, os auto-escoantes, os bombeáveis, os de projeção, além dos tradicionais vibráveis [15,16].

Em 1980 surge uma nova família de refratários, os chamados auto-escoantes [9], cujo consumo na indústria metalúrgica, de cimento e de incineração de lixo tem crescido rapidamente nos últimos anos e, com isso, a qualidade requerida deste material também tem crescido [17]. Eles são assim chamados devido a sua característica típica de conformação [18] que, devido a sua fluidez, permite que eles fluam e se desgaseifiquem sem a aplicação de energia externa, dispensando, assim, a necessidade de vibração para moldagem. Para que isso ocorra, são dotados de elevada fluidez (80 a 110% - mesa de fluidez) [5]. A obtenção de concretos desta natureza é relativamente recente, e só se fez possível pela evolução dos conhecimentos, que relacionam a reologia de concretos com sua distribuição granulométrica, além do aprimoramento dos aditivos, em especial, dos defloculantes [18]. O comportamento auto-escoante de uma suspensão só pode ser alcançado através de uma alta densidade de empacotamento de partículas [17]. A idéia básica é a redução dos pontos de contato entre os agregados pelo aumento no volume da matriz.

As vantagens de se utilizar concretos refratários auto-escoantes incluem economia, fácil aplicação de finas camadas, formas complexas e regiões de difícil acesso, entre outras [17]. Porém, eles também possuem suas limitações, em particular, o controle de tempo de moldagem que deve ser longo suficiente para permitir a desgaseificação natural do material e, ainda, rápido o suficiente para prevenir a segregação ou sedimentação [9].

Importantes propriedades do concreto refratário auto-escoante são: alta resistência e estabilidade volumétrica a alta temperatura, resistência à oxidação, boa fluidez,

trabalhabilidade e segurança ambiental [17].

4.2 Mecânica da fratura

A abordagem da mecânica da fratura permite selecionar materiais e avaliar a integridade estrutural de componentes, levando em conta a inevitável presença de descontinuidades como as trincas. Há três variáveis para se considerar: o material, a tensão presente e o tamanho da trinca [19].

A fratura simples consiste na separação de um corpo em dois ou mais pedaços em resposta a uma tensão de natureza estática (isto é, constante ou que se modifica lentamente ao longo do tempo) que é imposta, e a temperaturas que são baixas quando comparadas à temperatura de fusão do material. A tensão aplicada pode ser de tração, de compressão, de cisalhamento, ou de torção. Para materiais de engenharia, são possíveis dois modos de fratura: dúctil e frágil. Esta classificação é baseada na deformação plástica do material. Os materiais dúcteis apresentam normalmente uma deformação plástica substancial com uma grande absorção de energia antes da fratura. Por outro lado, existe normalmente pouca ou nenhuma deformação plástica com baixa absorção de energia acompanhando uma fratura frágil [20].

Nos materiais cerâmicos, as ligações iônicas ou covalentes permitem pouco ou nenhum deslizamento de planos cristalinos. Dessa forma, a fratura é quase sempre do tipo frágil. Em geral, a superfície de fratura é uniforme e não há indícios característicos na superfície que apontem para a origem da fratura [19]. Durante a propagação de uma trinca existe uma liberação de energia de deformação elástica, ou seja, uma parte da energia que fica armazenada no material quando ele é deformado elasticamente. Além disso, durante o processo de extensão da trinca são criadas novas superfícies livres nas faces da trinca, as quais dão origem a um aumento na energia de superfície do sistema [20].

A fratura é um dos problemas mais preocupantes na construção de estruturas de concretos refratários, por isso a energia de fratura, γ_{wof} , é uma importante propriedade a ser estudada [5,9,21]. Ela pode ser definida como a energia absorvida para a criação de uma área projetada unitária de superfície de fratura [21]. Que é determinada a partir da curva

carga-deslocamento gerada por um teste de propagação estável de trinca [5,14,22]. A curva típica deste teste assemelha-se com a curva da figura 3. A integral da área sob a curva é chamada de trabalho de fratura. Conforme a literatura especializada, esta integral é feita até o ponto em que houve uma queda de 90% da carga medida em relação à carga máxima atingida no ensaio [8].

Figura 3: Curva carga-deslocamento típica de um ensaio de propagação estável de trinca.

Utilizando-se da equação a seguir, tem-se que a energia de fratura é [5,14,22]:

$$\gamma_{wof} = \frac{1}{2A} \int F_V ds \quad \text{Equação 1}$$

em que A é a área projetada da superfície de fratura (seção transversal do corpo de prova), F_V é a carga vertical aplicada pela máquina de teste e s é o deslocamento do atuador da máquina. O valor da integral $\int F_V ds$ é determinado pela área sob a curva carga-deslocamento, correspondente. E o fator 2 é incluído porque quando o corpo de prova é rompido, duas novas superfícies de fratura são formadas.

Para avaliar a energia de fratura, a condição de propagação estável da trinca deve ser rigorosamente obedecida, ou seja, a extensão da trinca deve ser tal que permita o monitoramento completo pela máquina de ensaio durante a sua propagação [16,23,24]. Esta estabilidade depende da velocidade do teste, das características da máquina de teste,

da geometria e profundidade do entalhe e das propriedades física do material da amostra [24].

A condição de propagação estável da trinca ocorre quando a taxa de crescimento de energia na amostra e na máquina é menor que a requerida no processo irreversível de dissipação de energia na ponta da trinca, assumindo que a taxa de energia cinética aplicada da máquina pode ser negligenciada. Este balanço de energia pode ser descrito pela equação a seguir [24]:

$$U_T = U_S + U_M + W_{fs} + U_{ke} \quad \text{Equação 2}$$

em que U_S e U_M são a energia elástica acumulada na amostra e na máquina, respectivamente, W_{fs} é o trabalho requerida para a fratura e U_{ke} é a energia cinética aplicada pela máquina. Como o teste é feito em uma velocidade muito baixa e energia cinética U_{ke} pode ser negligenciada. Normalmente a velocidade da máquina deve ser menor que 10^{-5} m/min para que isso ocorra. Nesta equação, (U_S+U_M) fornece a energia potencial para a propagação da trinca, enquanto W_{fs} , a energia de superfície, fornece a resistência à propagação da trinca.

De forma simples, a energia acumulada na amostra e na máquina de ensaio durante a deformação elástica deve ser a menor possível e transformada em energia de superfície de modo controlado. A condição necessária para tal pode ser descrita pela seguinte inequação [23,25,26]:

$$-\frac{d(U_M+U_S)}{dc} \leq \frac{dW_{fs}}{dc} \quad \text{Equação 3}$$

em que $d(U_M+U_S)/dc$ é a variação das energias elásticas armazenadas na máquina (U_M) e na amostra (U_S) por unidade de propagação de trinca (dc), sendo essa, portanto, a variação da energia potencial, e dW_{fs}/dc é a variação de energia de superfície (dW_{fs}) por unidade de propagação de trinca, representando a variação da energia consumida durante o processo de propagação.

A figura 4 ilustra as condições de estabilidade da trinca durante o teste. A energia é plotada contra (c/h) , que é a razão entre a profundidade do entalhe e a espessura da amostra. Este diagrama mostra três regiões de estabilidade durante um teste. Estas regiões são denominadas I, II e III e pode ser definidas pela magnitude de energia e a taxa de crescimento de energia (dU/dc). As regiões I e II são inaceitáveis para a determinação da

energia de fratura, respectivamente uma região instável e uma semi-estável, enquanto a região III é a região necessária de estabilidade completa. Estas regiões irão produzir gráficos carga x deslocamento similar as ilustradas esquematicamente na figura 4 [24].

Na região I a energia elástica acumulada na amostra e na máquina excede o requerido para a propagação da trinca na amostra, ou seja, $(U_S + U_M) > W_{fs}$. Entretanto, as suas derivadas em relação ao comprimento da trinca não atendem a condição de estabilidade da equação (3), isso é, (dU/dc) é maior do que (dW/dc) . A propagação da trinca, neste caso, será instável e apresentará uma curva carga x deslocamento instável a curva I da figura 5 [24].

Figura 4: Diagrama de estabilidade da trinca para um teste de trabalho de fratura [24]

Na região II da figura 4 a energia elástica acumulada não excede a necessária para a abertura completa da trinca, porém a equação 3 permanece insatisfeita para o comprimento de trinca inicial, o que resulta em uma propagação semi-estável. A curva Carga x deslocamento neste caso é similar a curva II da figura 5. Assim como na região I, esta também apresenta uma abertura de trinca muito rápida, que não pode ser totalmente monitorada pela máquina de teste e, por isso, não é adequada para o cálculo da energia de fratura [24].

Figura 5: Curva Carga x Deslocamento para as três regiões de estabilidade [24]

Para testes feitos na região III da figura 4 o critério de estabilidade da equação 3 é totalmente satisfeita, o que resulta em uma curva carga x deslocamento completamente estável, semelhante a curva III da figura 5. A partir desta curva é possível a determinação da energia de fratura [24].

Durante a fratura de refratários fenômenos muito interessantes de absorção de energia ocorrem nas proximidades da trinca, estes consomem uma grande quantidade de energia à medida que a frente da trinca avança. Estes eventos ocorrem em duas regiões

diferentes, a zona de processo em frente da trinca em avanço. Uma vez que a trinca começa a se propagar, esta desenvolve uma zona frontal de equilíbrio, contudo a região atrás de trinca continua a crescer [16,27].

A figura 6 ilustra um esquema da zona de processo total ao redor da trinca em avanço. Na ponta da trinca o microtrincamento prevalece e há geralmente uma considerável ramificação da trinca, associada, principalmente, à junção das microtrincas na região. O tamanho da região de processo frontal varia de acordo com refratário, mas estima-se que esta deva ser bem ampla [16,28], muito maior que a maioria dos corpos de prova em escala laboratorial quando totalmente desenvolvida. Isso indica que os resultados de um corpo de prova de pequena escala laboratorial, provavelmente, não geram números absolutos, porque a zona de processo de trinca está apenas parcialmente desenvolvida. Devido a estes efeitos de tamanho, testes em escala laboratorial devem apenas fornecer valores de comparação entre diferentes microestruturas de refratários testadas com o mesmo tamanho de corpo de prova e sob as mesmas condições de ensaio [16].

Figura 6: Esquema da zona de processo de trinca para materiais refratários [16]

A outra região importante na ponta da trinca em propagação nos refratários é a região atrás da ponta da trinca. Em materiais frágeis, a extensão de abertura da ponta da trinca, CMOD, não é muito grande. Elementos microestruturais do refratário, como, por exemplo, os agregados grandes, são capazes de interagir através das superfícies recém-formadas de trinca [16].

A importância da zona de processo pode ser vista em várias publicações [16,27-31].

4.2.1. Determinação da energia de fratura pelo método da barra entalha

O método mais conhecido e utilizado para determinar a energia de fratura é o método da barra entalhada flexionada em três pontos [8,16,32], desenvolvido por Nakayama. Este método é muito importante e direcionou a pesquisa de fratura de refratários para o uso de uma única trinca grande semelhante ao estudo da mecânica da fratura para metais [16].

Figura 7: (a) Geometria e dimensões da amostra para medida da energia de fratura pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos e (b) seção transversal, mostrando a área por onde a trinca se propaga [23].

Nakayama definiu a configuração de uma amostra com entalhe especial (conforme esquematizado na figura 7) e utilizou uma máquina de teste rígida o suficiente para permitir o acompanhamento da propagação estável de trinca na amostra entalhada, através do registro da curva carga-deslocamento [8,22]. Normalmente a barra possui medidas de altura (h) e espessura (b) de 25 mm x 25 mm ou 40 mm x 40 mm, com a profundidade do entalhe (c) em torno de 0,4 da altura, restando assim pequena área de fratura, o que pode

ser um grande problema na utilização deste método, visto que, a barra apresenta pequenas dimensões e, por isso, agregados refratários podem ter tamanhos próximos à dimensão da área de fratura, o que pode afetar fortemente o resultado final [23]. Também, como visto anteriormente, o tamanho da zona de processo da região da trinca para refratários pode ser bastante grande e os corpos de prova para teste de trabalho de fratura em escala laboratorial podem não ser grandes o suficiente para permitir o completo desenvolvimento da zona de processo de trinca [16].

Por outro lado, uma desvantagem de se utilizar grandes amostras está no acúmulo de energia elástica e quando ocorre propagação da trinca essa pode fazer-se de modo instável [8,32]. Por isso, a caracterização da mecânica da fratura, de forma mais rigorosa, requer um método que permita propagação estável de trinca para dimensões do corpo de prova. Amostras com maiores dimensões são compatíveis com a característica grosseira da microestrutura dos refratários [23].

4.2.2. Determinação da energia de fratura pelo método da cunha

Em 1986 Tschegg patenteou o método que utiliza um sistema de cunha, chamado “wedge splitting test”, ou simplesmente, “método da cunha” [23,33]. Esta metodologia consiste em efetuar a propagação de uma trinca com a ajuda de uma cunha, controlando a propagação estável da trinca em corpos de prova considerados grandes [8,23]. A figura 8 mostra o arranjo experimental desta técnica.

Este método surge para o ensaio de amostras relativamente grandes sem o problema de armazenamento de grandes quantidades de energia elástica. Neste método a relação entre o tamanho de agregado e a área de fratura, é bem maior, promovendo a obtenção de resultados mais confiáveis e com menor dispersão, pois a área de fratura é mais representativa da microestrutura grosseira do material. Além de que a razão entre o tamanho da amostra e o tamanho da zona de processo da trinca, que no método da barra entalhada é muito crítica, tem seu efeito minimizado [8,14].

Como mostrado na figura 8, o dispositivo de teste consiste em dois encostos inclinados, dois roletes móveis e uma cunha que são inseridos no rebaixo do corpo de

prova. A cunha recebe a carga e a transmite para os roletes e estes para os encostos produzindo as forças horizontais F_H , que são transmitidas para a amostra sob teste [23,34].

Figura 8: (a) Representação esquemática do método da cunha e detalhes de construção das peças de transmissão da carga. F_H é força horizontal para a abertura da trinca e α , o ângulo da cunha (b) geometria da amostra e seção transversal mostrando a área por onde a trinca se propaga.

Em amostras cerâmicas a propagação de trinca estável é difícil devido a pouca deformação que estas sofrem antes de se romper, em função de sua alta rigidez, comparada a rigidez da máquina de ensaio. Estas dificuldades são superadas por este método, devido ao uso da cunha [35]. Sua utilização permite que a força aplicada pela máquina de ensaio seja bastante reduzida, diminuindo significativamente a energia elástica armazenada na máquina, facilitando a propagação estável da trinca durante o teste. A correlação entre força aplicada pela máquina de ensaios, F_V , e a transmitida para a amostra, F_H , mostrando a influência do ângulo da cunha, α , na relação carga aplicada e carga transmitida, pode ser avaliada observando a seguinte equação [14,23,25,35]:

$$F_H = \frac{F_V}{2 \cdot \tan(\alpha/2)} \quad \text{Equação 4}$$

Como consequência, o ângulo da cunha escolhido deve ser tão pequeno quanto possível. Entretanto, a literatura especializada indica que este não deve ser menor do que 5° para garantir o desempenho do teste [35].

Com os dados de carga e deslocamento obtidos durante o teste é plotada uma curva, semelhante a da figura 3, da qual é calculado o trabalho de fratura e posteriormente a energia de fratura.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Avaliação da carga máxima e na energia de fratura em função da posição dos roletes no ensaio do método da cunha

A avaliação da energia de fratura em função da posição dos roletes foi feita em duas etapas, inicialmente foram utilizadas amostras de tijolo refratário e, posteriormente, foram utilizadas amostra de argamassa, visto que, para o estudo do ensaio, estas apresentam resultados equivalentes aos do concreto refratário, porém com um custo inferior. Para as amostras de tijolo refratário o ensaio foi realizado em duas diferentes posições dos roletes e para as de argamassa foram realizadas em três diferentes posições.

5.1.1. Amostras:

Inicialmente foram utilizadas amostras de tijolo refratário Alumibar 70 PAC da Indústria Brasileira de Artigos Refratários – IBAR com as seguintes dimensões $113 \times 100 \times 75 \text{ mm}^3$. Nestas foram feitos rebaixos, entalhes e ranhuras mecanicamente empregando-se de um disco de corte diamantado, conforme ilustrado na Figura 9.

Posteriormente o ensaio foi realizado com amostras de argamassa que foram obtidos pela mistura de areia média lavada, cimento Portland CPIII-E-32 e água potável. A composição mássica utilizada em termos de cimento:areia foi de 1:2. A água foi baseada em 0,46 da massa de cimento. A areia e o cimento foram pesados e misturados previamente em uma argamassadeira de laboratório, com adição da água logo depois, permitindo perfeita interação entre os três constituintes da argamassa. O material foi despejado em molde de aço produzindo amostras de $113 \times 100 \times 75 \text{ mm}^3$. O molde possui uma configuração, tal que as amostras, ao serem desmoldadas já apresentavam rebaixos,

entalhes e ranhuras, conforme ilustrado na Figura 8. Após a moldagem, a cura ocorreu em ambiente saturado de umidade a 23°C, sendo que nas primeiras 24 horas a amostra ainda se encontrava no molde. Após 24 horas foi feita a desmoldagem e a amostra permaneceu no ambiente saturado por mais 6 dias. Após a cura, a amostra foi seca em uma estufa a 60°C por 24 horas e posteriormente foram aguardados 28 dias para que os ensaios fossem executados.

Figura 9: Dimensões da amostra (mm).

Todas as amostras foram retificadas em sua face inferior, para o perfeito assentamento das mesmas sobre o suporte do dispositivo da cunha.

5.1.2. Teste:

As amostras de tijolo refratário foram submetidas ao ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha utilizando-se uma máquina de ensaios mecânicos, servo-hidráulica, da marca MTS, série 810, com célula de carga de 5 kN. Os testes foram controlados pelo deslocamento do atuador, com velocidade de 30 $\mu\text{m}.\text{min}^{-1}$. No sistema utilizado, o ângulo da cunha, α , foi de 10° (ver figura 8). Foram utilizadas duas diferentes posições dos roletes durante os ensaios. Inicialmente os roletes foram posicionados com

uma distância B de 33 mm entre o seu centro e a ponta do entalhe e posteriormente foram posicionados com uma distância B de 23 mm, como ilustra a Figura 10. Foram utilizadas quatro amostras para cada posição dos roletes.

As amostras de argamassa também foram submetidas ao ensaio de propagação estável da trinca pelo método da cunha utilizando-se a mesma máquina de ensaios mecânicos e mesmas condições. Porém, para este ensaio foram utilizadas três diferentes posições dos roletes. Inicialmente os roletes foram posicionados com uma distância B de 39 mm e posteriormente foram posicionados com uma distância B de 31,5 mm e, por fim, uma distância de 24 mm. As distâncias, máxima e mínima, foram determinadas de acordo com o tamanho da amostra e a distância intermediária foi definida como a média entre elas.

Figura 10: Posição dos roletes: B é a distância entre o ponto de aplicação da força F_H e a ponta do entalhe.

5.2. Avaliação da influência do tamanho máximo de agregado de um concreto refratário na energia de fratura

As amostras foram confeccionadas com o concreto refratário auto-escoante Supercastibar FL50 BF da Indústria Brasileira de Artigos Refratários – IBAR, concreto

comercial que possui tamanho máximo de agregado de 8,0 mm e composição química conforme anexo I. Para este trabalho este concreto foi produzido com quatro diferentes tamanhos máximos de agregados, são eles 3,35; 4,75; 6,35 e 8,0 mm. A adição de água deionizada foi de 8% da massa de concreto em todos os casos. A mistura do concreto foi feita em uma argamassadeira de laboratório, permitindo perfeita interação de seus constituintes.

Para as amostras a serem testadas pelo método da cunha, o concreto foi vertido em molde de aço produzindo amostras de 100 mm x 100 mm x 75 mm, o molde possui uma configuração, tal que as amostras, ao serem desmoldadas já apresentavam rebaixas, entalhes e ranhuras, conforme ilustrado na figura 8.

Em seguida, os concretos, ainda no molde, foram colocados num ambiente com saturação de vapor d'água, por 24 horas, na temperatura de 23°C. Depois disso, as amostras foram desmoldadas para, então, permanecerem por mais 24 horas nas mesmas condições anteriores. Após, a secagem foi feita por 48 horas numa estufa a 110°C. As amostras, então, foram sinterizadas a 1.000°C, por 5 horas. Após a sinterização, as amostras foram retificadas em sua face inferior, para o perfeito assentamento das mesmas sobre o suporte do dispositivo de ensaio.

Para as amostras a serem testadas pelo método da barra entalhada flexionada em três pontos foram feitas amostras deste mesmo material utilizando um molde de aço 25 mm x 25 mm x 145 mm, mantendo-se as mesmas condições de tempo e temperatura durante as etapas, sendo que após a sinterização estas amostras foram retificadas na sua face inferior e também foram feitos, mecanicamente, entalhes de 1,75 mm de espessura e 8 mm de profundidade em uma retífica com disco diamantado, garantindo a estas as características necessárias para o ensaio, conforme ilustra a figura 7.

Os testes utilizando o método da cunha foram feitos igualmente ao descrito no item anterior, porém neste caso os roletes do dispositivo de teste foram posicionados a uma distância B de 20 mm, posição esta, selecionada de acordo com o tamanho da amostra (ver figura 10). Foram utilizadas quatro amostras para cada tamanho de agregado.

Já o teste utilizando o método da barra entalhada e flexionada em três pontos foram feitos com mesma máquina de ensaios e utilizando mesma célula de carga, porém a

distância entre os pontos foi de 125 mm e os testes foram controlados pelo deslocamento do atuador, com velocidade de $0,01 \text{ mm.min}^{-1}$. E foram utilizadas cinco amostras para cada tamanho de agregado.

5.3. Análise dos dados

Com os dados instantâneos de deslocamento do atuador e da carga, foram elaboradas curvas Carga x Deslocamento (F-s) que tiveram o início corrigido mantendo-se a linearidade da zona elástica. O trabalho de fratura foi calculado integrando-se a área abaixo destas curvas, a partir das quais foi calculada a energia de fratura γ_{wof} que é a razão entre o trabalho de fratura e a área da superfície formada, de acordo com a equação (C). Como a energia de ligação das partes da amostra é transformada em energia de superfície, a área considerada é igual a duas vezes a área da fratura, pois há formação de duas superfícies. A integral sob a curva foi feita até o ponto em que houve uma queda até a carga equivalente a 10% da carga máxima atingida durante o ensaio, $F_{m\acute{a}x}$.

Posteriormente, para as amostras de tijolo refratário e de argamassa foi analisada a dependência da força F_V , necessária para a propagação estável da trinca, em relação à distância B entre a ponta do entalhe e a aplicação da força (posição do centro dos roletes). Já para as amostras de concreto refratário Supercastibar FL50 BF foi analisada a influência do tamanho de agregado nos resultados de energia de fratura das amostras.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Avaliação da carga máxima e da energia de fratura em função da posição dos roletes no ensaio do método da cunha

6.1.1. Tijolo refratário

Na figura 11 tem-se a fotografia de uma amostra fraturada de tijolo refratário. Observa-se que a trinca circundou a maioria dos agregados, resultando no aumento da área de fratura real. Isso indica que a energia necessária para a fratura dos agregados é maior que a necessária para descolá-los da matriz.

Figura 11: Superfície de fratura de uma amostra de tijolo refratário. As áreas marcadas indicam exemplos de onde a trinca circundou os agregados da amostra.

Na Figura 12 estão ilustradas as curvas carga-deslocamento de uma amostra com os roletes a distância de 33 mm e 23 mm da ponta do entalhe, respectivamente. Ambas apresentam um comportamento de propagação e crescimento estável da trinca, o que garante o monitoramento completo do crescimento da trinca através da estrutura da

amostra, condição necessária para a determinação da energia de fratura.

Figura 12: Curvas carga-deslocamento (F-s) de amostras de tijolo refratário ensaiadas pelo método da cunha com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e a ponta da trinca de 33 mm (a) e 23 mm (b).

Na tabela 1 têm-se os valores de carga máxima e energia de fratura obtidos nas duas diferentes posições dos roletes utilizadas neste teste, bem como o desvio desses valores. A carga máxima e a energia de fratura em relação à posição dos roletes também podem ser observadas na figura 13. O cálculo da energia de fratura foi feito a partir dos gráficos obtidos no ensaio (Figura 12) e utilizando a equação (1).

É possível notar que a amostra que foi ensaiada com maior distância B (entre a aplicação da força e a ponta da trinca) apresentou menor carga necessária para iniciar a trinca. Esse comportamento pode ser justificado pela Lei de Alavanca desenvolvida por Arquimedes que diz que, quando uma força P_h é aplicada através dos roletes é formado um braço de alavanca entre o ponto de aplicação de P_h e o local que sofre maior tensão (ponto onde a trinca é iniciada, devido à concentração de tensões resultante da geometria da amostra). Essa tensão é proporcional a força aplicada e a distância entre o ponto de aplicação da mesma e o ponto sob tensão. Sabe-se, também, que a tensão necessária para quebrar as ligações de um determinado material deve ser um valor fixo, logo se mantendo a tensão constante, temos que a força necessária para que esta tensão seja atingida é inversamente proporcional à distância a que a mesma está sendo aplicada. Este resultado é

muito importante visto que quanto maior a carga, maior a energia armazenada pela amostra e pela máquina e conseqüentemente menor a estabilidade do sistema.

Tabela 1: Carga máxima e energia de fratura de amostras de tijolo refratário, em função da distância B (entre o centro do rolete e a ponta da trinca).

Distância B (mm)	Carga Máxima (N)			Energia de Fratura (J/m ²)		
	Valor Medido	Média	Desvio	Valor Medido	Média	Desvio
23	582,79	579,29	± 120	103,18	103,83	± 18
	569,14			96,36		
	728,98			128,42		
	436,27			87,36		
33	487,39	482,65	± 136	91,22	92,90	± 19
	655,37			118,37		
	463,27			89,66		
	324,57			72,37

Figura 13: Resultado de carga máxima e energia de fratura de amostras de tijolo refratário, ensaiadas com distância entre a aplicação da força (posição dos roletes) e a ponta da trinca de 33 mm e 23 mm.

Conforme a literatura técnica os valores de energia de fratura devem ser equivalentes, pois o material permaneceu o mesmo, porém os valores obtidos apresentam

uma pequena variação que é inerente aos resultados de ensaios de cerâmicas.

Visando a maior compreensão dos resultados obtidos, este ensaio foi realizado, posteriormente, com amostras de argamassa, porém com um maior número de amostras e variando-se a posição dos roletes entre três posições distintas, nos quais foram obtidos os resultados apresentados no item 6.1.2.

6.1.2. Argamassa:

A Figura 14 mostra exemplos da curva carga-deslocamento para amostras ensaiadas com as três diferentes posições dos roletes. Observou-se a propagação estável da trinca para todas as amostras. A partir das curvas obtidas nos testes foi extraído o valor médio da carga máxima atingida durante a propagação da trinca, $F_{\text{máx}}$ e, posteriormente, foram calculados a energia de fratura, γ_{wof} e do torque necessário para o início da propagação da trinca.

Figura 14: Curva carga-deslocamento de amostras de argamassa ensaiadas nas três diferentes posições dos roletes.

Na tabela 2 podem-se observar os valores de carga máxima e energia de fratura obtidos nas três diferentes posições dos roletes utilizadas neste teste, bem como o desvio desses valores.

Tabela 2: Carga máxima e energia de fratura de amostras de argamassa, em função da distância B (entre o centro do rolete e a ponta da trinca).

Distância B (mm)	Carga Máxima (N)			Energia de Fratura (J/m ²)		
	Valor Medido	Média	Desvio	Valor Medido	Média	Desvio
24	320,72	341,91	± 30	25,4512	28,16	± 4
	363,24			30,8749		
	371,56			31,5632		
	312,11			24,7627		
31,5	324,33	328,12	± 5	27,7942	26,46	± 2
	331,91			25,1178		
	333,26			28,0965		
	322,99			24,8153		
39	269,04	259,47	± 13	26,8384	27,34	± 1
	249,91			27,8479		
	272,69			28,3185		
	246,26			26,3678		

Na figura 15, a energia de fratura do material está plotada contra a distância B, entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe. Pode-se afirmar que a energia de fratura independe do posicionamento dos roletes, o que é um resultado importante, pois, significa que, não é necessário se estabelecer com rigor uma posição para os roletes e que este posicionamento pode ser definido de acordo com a limitação de cada equipamento. Porém pode se observar que o erro experimental reduz à medida que a distância B aumenta o que, pode ser devido à diminuição da carga que aumenta a estabilidade do sistema.

Na figura 16 observa-se que o torque se comporta de maneira semelhante à energia de fratura, não apresentando tendência.

Na figura 17, tem-se plotada a carga máxima necessária, contra a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe, em que se pode observa que houve uma tendência e que a carga diminui à medida que a distância é aumentada. Isso deve ser levado em

consideração, pois diminuindo a carga diminui-se a quantidade de energia armazenada na amostra e na máquina, que deve ser a menor possível e transformada em energia de superfície de modo controlado, sendo isso uma condição necessária para a propagação estável da trinca de acordo com a equação (3).

Figura 15: Energia de fratura versus a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe.

Figura 16: Torque versus a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe.

Figura 17: Carga máxima versus a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe.

Analisando-se os resultados, observa-se que quanto maior é a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe (ponto de aplicação da força), menor é a carga máxima necessária para iniciar o trincamento. Por outro lado, não houve uma tendência ou variação significativa da energia de fratura e do torque, o que era esperado visto que a energia de fratura é uma propriedade do material e o torque depende da força de ligação do material que não foi alterado durante o trabalho.

O mesmo pode ser observado em um estudo semelhante avaliou o comportamento de amostras analisadas alterando-se a profundidade do entalhe, o que, conseqüentemente, altera a distância B. Neste estudo foi observado que para determinado material, a energia de fratura mostrou-se independente da profundidade do entalhe por ser uma propriedade do material, porém houve uma variação da carga máxima, devido ao fato desta ser dependente da área de fratura que também foi alterada [36].

6.2. Avaliação da influência do tamanho do agregado na carga máxima e na energia de fratura de um concreto refratário medidos pelo método da cunha e da barra entalhada

6.2.1. Método da cunha

Figura 18: Fotografias das superfícies de fratura das amostras de concreto refratário sinterizadas a 1000°C, por 5 horas, com tamanho máximo de agregados de (a) 3,35 mm; (b) 4,75 mm; (c) 6,35 mm e; (d) 8,0 mm.

Na figura 18 têm-se imagens das superfícies fraturadas das amostras de concreto refratário com os diferentes tamanhos de agregado. É possível observar que houve a fratura dos agregados, o que indica uma boa ancoragem deste na matriz.

Na figura 19 estão ilustradas curvas carga-deslocamento representativas das amostras ensaiadas pelo método da cunha. Em que se pode ver um comportamento de propagação e crescimento estável da trinca, o que garante o monitoramento completo do crescimento da trinca através da estrutura da amostra.

Figura 19: Curvas carga-deslocamento representativas das amostras de concreto refratário com agregados de (a) 3,35 mm, (b) 4,75 mm, (c) 6,35mm e (d) 8,0mm, ensaiadas pelo método da cunha.

Na tabela 3 podem-se observar os valores de carga máxima e energia de fratura, obtidas para as amostras fabricadas com diferentes tamanhos de agregados, ensaiadas pelo método da cunha, bem como o desvio desses valores.

A partir dos gráficos construídos com os dados obtidos durante o ensaio e utilizando a equação (1), foram calculadas as energias de fratura das amostras para os diferentes

tamanhos de agregado, também como a carga máxima foi medida, como pode ser visto nos gráficos das figuras 20 e 21.

Tabela 3: Carga máxima e energia de fratura de amostras de Supercastibar FL50 BF, com diferentes tamanhos de agregado, ensaiadas pelo método da cunha.

Tamanho máximo de agregado (mm)	Carga Máxima (N)			Energia de fratura (J/m ²)		
	Valor Medido	Média	Desvio	Valor Medido	Média	Desvio
3,35	508,32	549,36	± 71	69,50	64,68	± 4
	622,36			59,95		
	594,80			63,81		
	471,97			65,47		
4,75	596,18	598,59	± 27	65,93	66,27	± 2
	579,81			67,06		
	580,33			68,28		
	638,04			63,82		
6,35	540,88	553,37	± 9	73,75	77,77	± 4
	554,49			79,30		
	560,34			81,92		
	557,76			76,11		
8,00	608,93	605,70	± 16	83,29	79,20	± 5
	612,37			71,67		
	618,92			80,75		
	582,57			81,06		

É possível notar que quanto maior o tamanho do agregado, maior é a energia de fratura. Um fato interessante é que a diferença entre a energia de fratura dos refratários com agregados de 3,35 mm e 4,75 mm é muito pequena, podendo ambas serem consideradas equivalentes, o que também ocorreu com os refratários de 6,35 mm e 8,0 mm. Porém entre os dois de maior agregado e os dois de menor agregado houve um aumento considerável, cerca de 18%, isso mostra que houve uma mudança no comportamento a fratura, possivelmente, devido a uma mudança na zona de processo de trinca.

Como pode ser visto na figura 21, não foi possível observar tendência na medida da carga máxima e os valores se apresentaram muito próximos. O que também ocorreu na medida do deslocamento pode ser visto na figura 22.

Figura 20: Energia de fratura em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da cunha.

Figura 21: Carga máxima em relação ao tamanho de agregado medido pelo método da cunha.

Figura 22: Deslocamento em relação ao tamanho de agregado medido pelo método da cunha.

6.2.2. Método da Barra entalhada

Na figura 23 estão ilustradas as curvas carga-deslocamento representativas de amostras ensaiadas pelo método da barra entalhada flexionada em três pontos. Em que, assim como no caso das amostras ensaiadas pelo método da cunha, estas também apresentam um comportamento de propagação e crescimento estável da trinca, embora suas curvas sejam menos bem comportadas do que as obtidas pelo ensaio utilizando o método da cunha.

Na tabela 4 podem-se observar os valores de carga máxima e energia de fratura obtidas para as amostras fabricadas, com diferentes tamanhos de agregados, ensaiadas pelo método da barra entalhada e flexionada, bem como o desvio desses valores.

Figura 23: Curvas carga-deslocamento representativas das amostras de concreto refratário com agregados de (a) 3,35 mm, (b) 4,75 mm, (c) 6,35 mm e (d) 8,0mm, ensaiadas pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.

A figura 24 mostra a energia de fratura das amostras em função do tamanho do agregado, calculada a partir dos gráficos construídos com os dados obtidos no ensaio e utilizando a equação (1). Também podem ser visto nos gráficos das figuras 25 e 26 a carga máxima média e o deslocamento do atuador em função do tamanho de agregado.

Pode-se observar que, embora o material seja o mesmo que o ensaiado pelo método da cunha, não houve alteração significativa na energia de fratura quando esta foi medida pelo método da barra entalhada, porém houve uma leve tendência ao crescimento com o aumento do tamanho do agregado. A carga máxima apresentou uma tendência de crescimento com o aumento do tamanho de agregado e o deslocamento não apresentou esta tendência.

Tabela 4: Carga máxima e energia de fratura de amostras de Supercastibar FL50 BF, com diferentes tamanhos de agregado, ensaiadas pelo método da barra entalhada.

Tamanho máximo de agregado (mm)	Carga Máxima (N)			Energia de fratura (J/m ²)		
	Valor Medido	Média	Desvio	Valor Medido	Média	Desvio
3,35	307,45	310,10	± 41	59,28	54,52	± 4
	267,14			54,05		
	278,17			57,73		
	370,85			50,35		
	326,92			51,19		
4,75	350,17	339,46	± 46	44,96	54,39	± 6
	333,29			59,44		
	353,62			55,73		
	267,66			58,84		
	392,55			53,00		
6,35	380,49	351,21	± 25	59,88	53,73	± 4
	329,50			48,91		
	362,92			52,62		
	362,92			53,14		
	320,20			54,10		
8,00	335,01	359,89	± 34	59,72	59,38	± 4
	372,05			61,62		
	407,54			64,24		
	320,89			54,16		
	363,96			57,16

Figura 24: Energia de fratura em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos

Figura 25: Carga Máxima em relação ao tamanho de agregado medida pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.

Figura 26: (a) Carga Máxima em relação ao tamanho de agregado; (b) Deslocamento em relação ao tamanho de agregado. Ambos medidos pelo método da barra entalhada e flexionada em três pontos.

Também foi verificado que os resultados de energia de fratura obtidos pelo método da barra entalhada foram menores que os obtidos pelo método da cunha, o que pode ser devido ao fato de que como a área analisada pelo método da barra entalhada é pequena, esta pode ser pouco representativa do material como um todo. Como podemos notar, a partir da tabela 5, a energia de fratura aumentou com o aumento do tamanho do agregado e em uma área reduzida, a quantidade de agregados maiores também é menor.

Tabela 5: Tabela comparativa entre os resultados de energia de fratura (J.m^{-2}) de concretos refratários obtidos pelos métodos da barra entalhada e flexionada e da cunha.

MÉTODO UTILIZADO	TAMANHO MÁXIMO DE AGREGADOS (mm)			
	3,35	4,75	6,35	8,00
Barra entalhada	54,52 $\pm$ 4	54,39 $\pm$ 6	53,73 $\pm$ 4	59,38 $\pm$ 4
Cunha	64,68 $\pm$ 4	66,27 $\pm$ 2	77,77 $\pm$ 4	79,20 $\pm$ 5

Outro fator que afetou os resultados foi a variação no tamanho da zona de processo de trinca, que é dependente da estrutura do material. Quando as dimensões de uma amostra não são tais que possa haver o total desenvolvimento da zona de processo de trinca os resultados obtidos não são valores absolutos e, por isso, não podem ser comparados com resultados obtidos com amostras com dimensões diferentes.

No estudo citado anteriormente, referente à avaliação do comportamento de amostras analisadas alterando-se a profundidade do entalhe, também foi observado que dos dois materiais estudados, aquele que apresentava o maior tamanho de agregado apresentou uma variação na energia de fratura com a variação do tamanho do entalhe, o que mostrou que para este material a zona de processo não pode se desenvolver totalmente e os resultados apresentados foram diferentes do que o esperado pela literatura técnica que é energia de fratura igual para materiais iguais [36].

Foram obtidas imagens, utilizando um microscópio eletrônico de varredura, com o objetivo de observar a distribuição dos agregados na matriz e a interação entre eles. Estas imagens podem ser vistas nas figuras 27, 28, 29, e 30.

Figura 27: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 3,35 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x.

Figura 28: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 4,75 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x.

Figura 29: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 6,35 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x.

Figura 30: Microscopia da amostra de concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 8,00 mm, nas ampliações de: (a) 70x e (b) 800x

Nas figuras 27, 28, 29 e 30 é possível observar o agregado de diversos tamanhos e a baixa porosidade do material, o que é uma característica dos concretos autoescoantes. É interessante notar que embora a figura 28 seja de um concreto com menor tamanho de agregado em relação ao concreto da figura 29, na área analisada na imagem temos o contrário, o que se deve à pequena área de fratura do material, que algumas vezes pode não ser a melhor representação do material como um todo. O que ocorre porque a área é muito pequena e em alguns casos pode não representar bem o material. Isso pode também ocorrer no ensaio do método da barra entalhado, visto que este é feito em amostras com uma pequena área de fratura.

6.2.3. Análise composicional

Tabela 6: Composição química dos pontos avaliados (indicados na figura 27) do concreto refratário Supercastibar FL50 BF com tamanho máximo de agregado de 3,35 mm.

Ponto	Al ₂ O ₃ [m/m]	SiO ₂ [m/m]	CaO [m/m]	TiO ₂ [m/m]	FeO [m/m]	K ₂ O [m/m]	Totais [m/m]
1 (Agregado)	34.08	63.28	1.53	1.10	--	--	100.00
2 (Matriz)	25.78	68.22	2.60	0.99	2.41	--	100.00
3 (Agregado)	30.94	67.13	1.92	--	--	--	100.00
4 (Matriz)	28.39	68.69	1.11	1.23		0.59	100.00

Para analisar a composição do concreto foi utilizada a técnica de EDS e o resultado pode ser visto nas tabelas 6, onde os pontos 1, 2, 3, e 4 referem-se aos pontos indicados na figura 27.

A partir da tabela 6 pode-se concluir que o material do agregado possui composição muito próxima a composição do material da matriz.

7. CONCLUSÕES

No ensaio do método da cunha a posição em que os roletes são colocados não interfere na energia de fratura, porém a carga máxima durante o ensaio (carga necessária para o início da propagação da trinca) é diferente de acordo com a distância entre o centro dos roletes e a ponta do entalhe, sendo que, quanto maior essa distância menor é a carga máxima necessária, o que pode ser justificado pela Lei da Alavanca desenvolvida por Arquimedes. Diminuindo a carga diminui-se a quantidade de energia armazenada na amostra e na máquina, que deve ser a menor possível e transformada em energia de superfície de modo controlado, sendo que a condição necessária para a propagação estável da trinca.

A energia de fratura e o torque independem do posicionamento dos roletes durante o ensaio, o que era esperado visto que a energia de fratura e o torque dependem da força de ligação do material que não foi alterado durante o trabalho. Este é um resultado importante, pois, significa que, não é necessário se estabelecer com rigor uma posição para os roletes e que este posicionamento pode ser definido de acordo com a necessidade de cada usuário do método.

Quanto à energia de fratura medida utilizando-se o método da cunha para um material com diferentes tamanhos de agregados, pode-se afirmar que a energia de fratura aumenta com o aumento do tamanho de agregado, porém este aumento não é linear. Quando estes mesmos materiais são submetidos ao ensaio da barra entalhada e flexionada em três pontos, observa-se que não houve um aumento significativo da energia de fratura, isso pode ocorrer devido ao fato de a pequena área da amostra utilizada não ser o suficiente para representar o material por completo, já que os maiores agregados contidos no material podem não estar presentes na área estudada. Por este motivo, conclui-se que o método da cunha é mais representativo para a determinação da energia de fratura do método da barra entalhada e flexionada para concretos com agregados grandes.

Os resultados de carga máxima indicam uma tendência de aumento com o aumento do tamanho do agregado, porém o deslocamento do atuador e, conseqüentemente, o tamanho de abertura da trinca, não apresentou uma relação direta com o tamanho do agregado.

REFERÊNCIAS

1. Engineered Materials Handbook: Ceramics and Glasses. Materials Park. ASM International, 1991.
2. CARTER, C.B.; NORTON, M.G. **Ceramic Materials**: Science and Engineering. Springer, 2007.
3. CIMENTO.ORG. **Cimento Brasil**. Disponível em: www.cimento.org. Acesso em: 21 de dezembro de 2011.
4. PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e as evoluções do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, n. 53, 14-19, 2009.
5. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J.A. Determinação da influência da composição no comportamento de fratura de argamassas utilizando o método da cunha In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 52, 2008, Florianópolis SC. **Anais....** São Paulo - SP : Tecart Editora LTDA, 2008. v. 1. p. 1-12.
6. RIBEIRO, S.; SANTOS, E.M.B.; GARCIA, G.C.R; RODRIGUES, J.A. Energia de fratura de argamassas produzidas com cimento portland: resultados interlaboratoriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 53, 2009, Guarujá. **Anais....** São Paulo : Monferrer, 2009. v. 1. p. 1-12.
7. LOBATO, E. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral - Relatório 71: Refratários. **Ministério de minas e energia**. Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso em 21 de dezembro de 2011
8. VIEIRA, J.S.C.; PAIVA, A.E.M.; RIBEIRO, S.; DENTE, C.C.E.; FORTES, G.; RODRIGUES, J.A. Estudo comparativo entre métodos de determinação da energia de fratura de concretos refratários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18, 2008, Porto de Galinhas, PE. 2008. **Anais CBCiMat**, São Paulo, SP, Metallum Eventos Científicos, 2008.
9. LEE, W. E.; VIEIRA, W.; ZHANG, S.; GHANBARI AHARI, K.; SARPOOLAKY, H.; PARR, C. Castable refractory concretes. **International Materials Review**, v.3, n. 46, p. 145-167, 2001.
10. CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução, 7.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnico e Científicos Editora S.A., 2008.

11. VIEIRA, J.S.C.; PAIVA, A.E.M.; RIBEIRO, S.; DENTE, C.C.E.; FORTES, G.; RODRIGUES, J.A. Efeito do teor de água sobre as propriedades mecânicas de um concreto refratário aluminoso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18, 2008, Porto de Galinhas, PE. **Anais CBCiMat**, São Paulo, SP, Metallum Eventos Científicos, 2008.
12. BÓ, M.D.; BARBETTA, P.A.; HOTZA, D. Utilização de Resíduos da Indústria de Revestimentos Cerâmicos na Fabricação de Refratários Triaxiais. **Cerâmica Industrial**, v.12, n. 1/2, p. 42-46, 2007.
13. RAAD, H.J. **Influência das condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concreto refratários aluminosos**. 136p. Dissertação de mestrado em construção civil – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG/Belo Horizonte, MG, 2008.
14. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J.A.: The influence of microstructure on the maximum load and fracture energy of refractory castables. **Ceramics International**, v. 36, n. 1, p. 263-274, 2010.
15. PILEGGI, R.G.; STURT, A.R. INOCENTINNI, M.D.M.; PANDOFELLI, V.C. Concretos de alto desempenho – Um novo conceito em refratários. **Cerâmica**, v.48, n. 305, p. 17-21, 2002.
16. CUNHA-DUNCAN, F.N.; BRADT, R.C. Fratura de refratários. **Cerâmica**, v.49, p. 199-215, 2003.
17. ALTUN, I.A. Effect of temperature on the mechanical properties of self-flowing low cement refractory concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 8, p. 1233-1237, 2001.
18. PILEGGI, R.G.; PANDOFELLI, V.C.; RODRIGUES, J.A. Obtenção de concretos refratários auto-escoantes com ultra-baixo teor de cimento através do controle da distribuição granulométrica da fração final. **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 12, p. 29-33, 1998.
19. ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. **Ciência e engenharia dos materiais**. 1.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
20. CALLISTER Jr., W.D. **Fundamentos de ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
21. MENOU, A.; MOUNAJED, G.; BOUSSA, H.; PINEAUD, A.; CARRE, H. Residual fracture energy of cement paste, mortar and concrete subject to high temperature. **Theoretical and Applied. Fracture Mechanics**, v.45, p. 64-71, 2006.

22. QUINTELA, M. A.; MELO, T.M.F.; LAGE, I.J.; PANDOFELLI, V.C.; RODRIGUES, J.A. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. **Cerâmica**, v. 47, p.174-179, 2001.
23. RIBEIRO, S.; EXPOSITO, C.C.D.; RODRIGUES, J.A. Projeto, adaptação, instalação e testes preliminares para um sistema de medida de energia de fratura de materiais cerâmicos pelo método da cunha. **Cerâmica**, v.54, p.418-426, 2008.
24. NAKAYAMA, J.; ABE, H.; BRADT, R.C. Crack stability in the work-of-fracture test: Refractory Applications. **Journal of the American Ceramic Society**, v.64, 11, p. 671-675, 1981.
25. HARMUTH, H.; RIEDER, K.; KRABATH, M.; TSCHEGG, E. Investigation of nonlinear fracture behavior of ordinary ceramic refractory materials. **Materials Science and Engineering**, n. A214, p. 53-61, 1996.
26. HARMUTH, H. Stability of crack propagation associated with fracture energy determined by wedge splitting specimen. **Theoretical and Applied. Fracture Mechanics**, v.23, n. 1, p.103-108, 1995.
27. SAKAI, M.; BRADT, R.C. Fracture toughness testing of brittle materials. **International Material Reviews**, v.38, n.2, p.53-78, 1993.
28. DUAN, K.; HU, X.; WITTMANN, F.H. Size effect on specific fracture energy of concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v.74, p. 87-96, 2007.
29. MURALIDHARA, S.; PRASAD, B.K. RAGHU; ESKANDARI, HAMID, KARIHALOO; B.L. Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 479-486, 2010.
30. HU, X.; DUAN, K. Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, p.1321-1330, 2003.
31. BAZANT, Z.P.; KAZEMI, M. T. Size effect in fracture of ceramics and its use to determine fracture energy and effective process zone length. **Journal of the American Ceramic Society**, v.73, n. 7, p. 1841-1853, 1990.
32. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A.: Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e na energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para a propagação estável da trinca. **Cerâmica**, v. 55, p. 181-189, 2009.

33. TSCHIEGG, E. Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruch-mechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete, Prüfkörper. **Australian Patent AT390328B**, registered 1986.
34. TSCHIEGG, E.K., FENDT, K.T., MANHART, Ch., HARMUTH, H. Uniaxial and biaxial fracture behavior of refractory materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v.76, n. 14, p. 2249-2259, 2009.
35. BRÜHWILER, E.; WITTMANN, F. H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. **Engineering Fracture Mechanics**, v.35, n. 1/2/3, p. 117-125, 1990.
36. SOUSA, H.L., FORTES, G.M., PAIVA, A.E.M., RODRIGUES J.A. Caracterização da energia de fratura de corpos de prova de concretos refratários com entalhe de diferentes profundidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18, 2008, Porto de Galinhas, PE. **Anais CBCiMat**, São Paulo, SP, Metallum Eventos Científicos, 2008.

ANEXO A

IBARIndústrias Brasileiras de Artigos
Refratários IBAR Ltda.**FOLHA DE DADOS TÉCNICOS**

CÓDIGO PRODUTO / REVISÃO	0155 - 10
NOME PRODUTO	SUPERCATIBAR FL50 BF
INICIO VIGÊNCIA	01/09/10
DESCRIÇÃO DO PRODUTO	Concreto Refratário Aluminoso de Fluência Livre e de Baixo Teor de Óxido de Ferro.
PRINCIPAL APLICAÇÃO	Altos Fornos e Locais de Alta Abrasão.
EMBALAGEM	Saco de papel multifolhado contendo 25 Kg.
IDENTIFICAÇÃO	Rótulo Contendo: nome do produto/ cliente, quantidade, peso\bruto\líquido), nº do lote, data de fabricação e prazo de estocagem.
ARMAZENAMENTO	Manter em local coberto, arejado e protegido da umidade.
PRAZO DE ESTOCAGEM	6 meses (armazenamento em condições adequadas).
TEMPERATURA MÁXIMA DE USO	1600°C.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Un. Med.	Nominal
SiO ₂	(%)	45,0
Al ₂ O ₃	(%)	50,0
CaO	(%)	1,3
Fe ₂ O ₃	(%)	0,7

PROPRIEDADES	Un. Med.	Nominal
Qde. de Água p/ Mistura	(%)	7,8
Tempo de Pega	(min.)	240
Massa Específica Aparente (110°Cx24h)	(g/cm ³)	2,35
Massa Específica Aparente (1000°Cx5h)	(g/cm ³)	2,30
Massa Específica Aparente (1400°Cx5h)	(g/cm ³)	2,35
Variação Linear Dimensional (1000°Cx5h)	(%)	-0,2
Variação Linear Dimensional (1400°Cx5h)	(%)	-0,7
Resistência a Compressão (110°C x 24h)	(MPa)	70,0
Resistência a Compressão (1000°Cx5h)	(MPa)	90,0
Resistência a Compressão (1400°Cx5h)	(MPa)	105,0
Quantidade de Material Requerido	(Kg/m ³)	2350

Notas

- Os ensaios são executados conforme Método Interno da Ibar, que são baseados nas normas ABNT, ASTM, DIN e/ou Normas de C
- Para aplicação e manuseio, consultar a folha de aplicação e de segurança do produto.
- As Folhas de Dados Técnicos apresentam valores nominais (médios) de produção, portanto não devem ser utilizados como especi
Caso Necessário, para controle do produto, deverá ser solicitado a folha de especificação com valores garantidos.
- Na confirmação da proposta e/ou pedido, deve ser verificado com a nossa área comercial se esta FDT encontra-se na sua última r

8mm - original