

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PORCELANATO  
REFORÇADO COM FIOS METÁLICOS

**Roslene de Almeida Garbelotto**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PORCELANATO  
REFORÇADO COM FIOS METÁLICOS

ROSENE DE ALMEIDA GARBELOTTO  
Engenheira Civil

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS,  
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre  
2013

II

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciências dos materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha  
Co-orientador: Prof. Dr. Agenor De Noni Júnior

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Raimundo Frick Ferreira, UFRGS  
Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, PPGCEM / UNESC  
Prof. Dr. Vilson Menegon Bristot, UNESC

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho a três grandes homens:

Meu esposo Volmar, sempre presente;

ao meu Pai Elpídio e meu sogro Walmor, duas partidas durante este estudo, mas presentes

nos exemplos deixados.

De repente, a vida começou a impor-se,  
a desafiar-me com seus pontos de interrogação,  
que se desmanchavam para dar lugar a outros;  
eu liquidava esses outros e apareciam novos.

(Carlos Drummond de Andrade)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço esse trabalho científico em três grandes áreas que vou distribuí-la nos vértices de um triângulo equilátero, formando assim uma figura estável.

No ápice se encontra meu professor e orientador Alexandre, que aprendi a entendê-lo e admirá-lo durante esse percurso. Muitas vezes eu esperava uma resposta mais direta para meus questionamentos e ele me mostrava às possibilidades, foi assim que aprendi muito nessa trajetória. Ao meu coorientador Agenor, extremamente disciplinado, possui um olhar carinhoso e ao mesmo tempo de cobrança. Tenho muito orgulho por ter sido tua primeira professora de física no ensino médio. Ao meu colega Claudio e amigo que numa conversa informal me falou do “cermeto” e ali eu vi a possibilidade de desenvolver esse estudo. Aos meninos estagiários: Edimilson, Felipe, Gustavo e Rafael que me ajudaram a preparar mais de duzentos corpos de prova. Aos laboratórios que utilizei: Colégio Maximiliano Gaidzinski, Eliane Revestimentos Cerâmicos, SENAI Criciúma, UNESC, Siderúrgica SICAL e Faculdade SATC juntamente com as pessoas que prestaram o atendimento.

No vértice inferior direito, lado da razão, agradeço aos colegas de trabalho. Só existe a necessidade do crescimento intelectualmente quando se enxerga essa possibilidade, que deslumbrei no meu trabalho. Obrigado ao meu diretor Vilmar do Colégio Maximiliano Gaidzinski, e aos demais colaboradores. Muitas vezes eu os procurava para tirar dúvidas e pedir permissão para algumas faltas. Obrigada Sandra pela voz sempre suave e amiga e aos esclarecimentos prestados. Ao colega Tassi pelo companheirismo e incentivo dado, é um grande amigo que ganhei nesse caminho. A amiga Jucilene. Na Faculdade SATC, contei com o apoio do diretor Carlos, Coordenador Joeci e Kelli, obrigada por tudo.

No vértice inferior esquerdo, lado do amor, eu agradeço a minha família, seres que iluminam minha vida. Obrigada minha mãe Suely e maninha Carmem pela compreensão. No meu lar, agradeço ao meu maridão Volmar, que soube esperar esse longo tempo que eu

dispensei aos estudos intensamente. É um grande doutor na profissão e em casa. A minha filha Thereza por todo o amor doado e experiência transmitida de sua vida de pesquisadora científica e como doutoranda da mesma instituição. Ao meu filho Vinicius pelo amor de filho e pela confiança depositada no meu estudo. Muitas vezes trocamos conhecimentos, pois escolheste uma trajetória de estudo próxima a minha: engenharia mecânica. Obrigada Renata pela presença constante e ajuda prestada nas dúvidas de formatação.

Peço desculpe aos que eu não nomeei. Assim de uma forma tri fraternal eu concluo o triângulo de agradecimentos, afirmando que foi “tri legal” viver intensamente esse crescimento intelectual.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS .....	XV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	1
1.1 Definição do Problema e Justificativa .....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Avanços Tecnológicos da Cerâmica.....	4
2.2 Cerâmica Multicamada .....	6
2.3 Material Compósito – Cermeto .....	7
2.4 Considerações gerais sobre materiais cerâmicos.....	12
2.5 Porcelanato .....	14
2.6 Processo de fabricação do porcelanato .....	15
2.6.1 Preparação da massa .....	16
2.6.2 Conformação de peça.....	18
2.6.3 Queima.....	20
2.7 Fios metálicas para reforço .....	22
2.8 Propriedades mecânicas .....	23
2.9 Fratura .....	24
2.9.1 Mecânica da fratura – Teoria de Griffith .....	25



2.9.2	Resistência ao impacto.....	30
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.1	Materiais utilizados.....	33
3.1.1	Massa atomizada.....	33
3.1.2	Reforço.....	33
3.2	Método de conformação.....	34
3.3	Método de aplicação dos fios .....	36
3.4	Preparação dos corpos de prova .....	37
3.5	Processo de Queima.....	38
3.6	Caracterização dos corpos de prova.....	40
3.6.1	Expansão após prensagem.....	40
3.6.2	Retração de secagem.....	40
3.6.3	Densidade aparente a seco .....	40
3.6.4	Perda ao fogo.....	41
3.6.5	Absorção de água.....	42
3.6.6	Índice de deformação pirolástica .....	43
3.6.7	Resistência mecânica à flexão .....	44
3.6.8	Resistência mecânica ao impacto .....	44
3.6.9	Resistência mecânica à tração .....	45
3.6.10	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	46
3.6.11	Metalografia .....	47
4.	RESULTADOS.....	48
4.1	Caracterização do porcelanato.....	48
4.2	Caracterização dos cermetos .....	48
4.3	Densidade aparente a seco.....	49
4.4	Índice de Deformação Pirolástica .....	50
4.5	Resistência mecânica à flexão .....	51

4.6	Resistência mecânica ao impacto .....	53
4.7	Resistência mecânica à tração do fio .....	54
4.8	Resistência mecânica à tração dos corpos de prova de cermetos .....	55
4.9	Análise da superfície da fratura.....	58
4.10	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	60
4.11	Análise do fio.....	63
4.12	Metalografia.....	64
5.	DISCUSSÃO GERAL .....	67
6.	CONCLUSÕES .....	69
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Efeito hidrofílico de um revestimento fotocatalítico (FUJISHIMA 1999).....	5
Figura 2.2	Painel de revestimento em porcelanato equipado com células fotovoltaicas (BERTO 2006).....	5
Figura 2.3	Gráfico "tensão versus deformação" típica de uma ruptura frágil (CALLISTER 2002).....	7
Figura 2.4	Gráfico da deformação de um revestimento cerâmico multicamadas (adaptado - LANGE 2006).....	7
Figura 2.5	Esquema de classificação de compósito (CALLISTER 2002) .....	8
Figura 2.6	Perfil tensão-posição quando o comprimento da fibra é: (a) igual ao comprimento crítico, (b) maior do que o comprimento crítico para um compósito reforçado com fios que esteja submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração. (CALLISTER 2006) .....	9
Figura 2.7	Produtos confeccionados com cermetos (a) Plugues de faísca conhecido por vela. (b) Ferramenta de corte. ....	10
Figura 2.8	Aumento das propriedades mecânicas com a presença de fios em porcentagem (adaptado – BRESCIANI 2006).....	11
Figura 2.9	Processo de Fabricação Contínua ® de Cermetos (BRESCIANI 2006) .....	12
Figura 2.10	Diagrama de composições de produtos cerâmicos triaxiais em comparação com a composição do porcelanato (DE NONI 2007).....	15
Figura 2.11	Fluxograma da sequência para a obtenção do porcelanato.....	16
Figura 2.12	Moinhos de bolas (BRISTOT, 1996). ....	17
Figura 2.13	Atomizador: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (BRISTOT 1996). ....	18
Figura 2.14	Prensa hidráulica industrial utilizada na cerâmica de revestimento (SACMI 2008).....	19
Figura 2.15	Secador vertical: (a) vista esquemática lateral e frontal; (b) sistema físico (SACMI, 1996).....	20
Figura 2.16	Ciclo de queima de porcelanato (BIFFI, 2002).....	21

Figura 2.17	Forno a rolo (BRISTOT, 1996).....	21
Figura 2.18	Zona de classificação, embalagem, paletização e expedição (KINGERY 1998).....	22
Figura 2.19	(a) a geometria das trincas de superfícies e internas. (b) diagrama esquemático do perfil de tensão ao longo da linha X – X' em (a), demonstrando a amplificação de tensão nas extremidades da trinca. (CALLISTER 2007).....	26
Figura 2.20	Modos de carregamentos básicos de uma trinca. (CALLISTER 2007) .....	28
Figura 2.21	Corpo de prova Charpy com entalhe em V e princípio do ensaio (CALLISTER 2007).....	31
Figura 3.1	Fluxograma da metodologia para a realização desse trabalho .....	32
Figura 3.2	Fios prontos para a preparação dos corpos de prova.....	34
Figura 3.3	(a) presa hidráulica do colégio Maximiliano Gaidzinski (b) detalhe do compartimento para confecção do corpo de prova com o pó atomizado .....	35
Figura 3.4	Esquema de distribuição longitudinal de 5 fios num corpo de prova com medidas expressas em mm. ....	36
Figura 3.5	Representação da secção transversal dos corpos de prova. (a) com 5 fios, (b) com 10 fios e (c) com 15 fios.....	36
Figura 3.6	Aplicação dos fios na etapa de conformação .....	37
Figura 3.7	Forno laboratorial intermitente utilizado no estudo. ....	38
Figura 3.8	Forno a Rolo Laboratorial (DETEC). (a) vista geral (b) destaque da entrada dos corpos no túnel de queima. ....	39
Figura 3.9	Equipamento utilizado para a realização da densidade aparente. ....	41
Figura 3.10	Demonstração do CP sobre os cutelos durante o Ensaio de Deformação Piroplástica (a) Antes da queima e (b) Depois da queima .....	43
Figura 3.11	Representa o CP e as setas identificam o local onde o pêndulo colide. ....	44
Figura 3.12	Equipamento utilizado para o ensaio .....	45
Figura 3.13	Corpo de prova com capa nas extremidades para o ensaio de tração.....	46
Figura 4.1	Densidade Aparente a Seco em função da quantidade de fios.....	50
Figura 4.2	Resultados do Índice de Deformação Piroplástica. ....	50
Figura 4.3	Corpos de prova após o ensaio de Deformação Piroplástica, (a) 0 fios, (b) 5 fios, (c) 10 fios, (d) 15 fios. ....	51
Figura 4.4	Resistência Mecânica à Flexão em função do número de fios. ....	52

Figura 4.5	Corpo de prova após o ensaio de resistência mecânica à flexão com a fratura identificada.....	53
Figura 4.6	Resistência Mecânica ao Impacto em função do número de fios .....	53
Figura 4.7	Imagem do corpo de prova após o ensaio de impacto. (a) vista superior, (b) vista inferior .....	54
Figura 4.8	Curva tensão <i>versus</i> deformação do ensaio de tração dos fios utilizadas como reforço.....	55
Figura 4.9	CP de cermetos durante o ensaio de tração. (a) CP de 5 fios, (b) CP de 15 fios. ....	56
Figura 4.10	Curva tensão x deformação dos corpos de prova com 5 fios.....	56
Figura 4.11	Curva tensão x deformação dos corpos de prova com 10 fios.....	57
Figura 4.12	Curva tensão x deformação dos corpos-de-prova com 15 fios. ....	57
Figura 4.13	Imagens da superfície de fratura. (a) CP de 5 fios, (b) CP de 10 fios e (c) CP de 15 fios.....	59
Figura 4.14	Imagem do fio no sentido longitudinal.....	60
Figura 4.15	CP cortados na seção transversal .....	61
Figura 4.16	Imagens Obtidas por MEV .....	62
Figura 4.17	Imagem da superfície de fratura obtida por MEV.....	63
Figura 4.18	Imagem obtida por MEV do centro do fio.....	63
Figura 4.19	Difratograma do fio. ....	64
Figura 4.20	Metalografia obtida na siderúrgica SICAL.....	64
Figura 4.21	Metalografia obtida na faculdade SATC .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Classificação de cerâmica em relação à absorção de água (NBR 13817). ....	42
Tabela 4.1	Resultados de caracterizações para CP de porcelanato.....	48
Tabela 4.2	Resultados de caracterização para CP com 5 fios .....	48
Tabela 4.3	Média das forças máximas por fio.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Absorção de água
AFNOR	Association Française for Normalisation
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
DAP	Densidade aparente
DETEC	Departamento de Engenharia e Tecnologia em Cerâmica
DIN	Deutsches Institut für Normung
EXP	Expansão pós-prensagem
IP	Índice de deformação piropiástica
ISO	Organization for Standardization
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
PF	Perda ao fogo
RMF	Resistência Mecânica à flexão
RS	Retração de secagem
SENAI	Serviço nacional da indústria
$\mu\text{m}$	Micrometro

## RESUMO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho mecânico de um compósito formado por massa cerâmica de porcelanato sendo a matriz e fios de aço o reforço, visando a utilização como cerâmica de revestimento. Com a inserção do fio metálico, teve-se por objetivo aumentar a tenacidade elevando a resistência mecânica ao impacto, proporcionando maior segurança em caso de ruptura acidental. O estudo laboratorial avaliou o comportamento mecânico de corpos de prova sem fios e com a adição de fios. Os fios foram distribuídos longitudinalmente em três configurações. Os corpos possuíam 1600 mm<sup>2</sup> de superfície e receberam os fios distribuídos em uma, duas e três camadas perfazendo comprimento respectivamente de 325 mm, 650 mm e 975 mm. Foram realizadas as caracterizações padrões para a cerâmica, expansão após prensagem, retração de secagem, densidade a seco, retração de queima, absorção de água e resistência mecânica à flexão. E adicionalmente foram avaliados: resistência mecânica ao impacto, índice de deformação pirolástica, resistência mecânica à tração e análise da microestrutura. O compósito proporcionou redução de aproximadamente 61% na deformação pirolástica e um acréscimo de aproximadamente de oito vezes na resistência ao impacto. Na análise do compósito, a tensão no fio ficou constante em torno de 800 MPa, mantendo aproximadamente 35% ao seu valor ao natural que era de 2000 MPa. O fio teve grandes perdas em suas características individuais, no entanto sua aplicação na cerâmica em forma de reforço do compósito enriqueceu as propriedades do porcelanato o que proporciona oportunidade de novas aplicações.

**Palavras chaves:** *Fios metálicos, Porcelanato, Resistência ao Impacto, Compósito.*



## ABSTRACT

This study evaluated the mechanical performance of a composite ceramic body of porcelain with a matrix of steel fibers, for use as a ceramic coating. With the insertion of metallic fiber account was intended to increase the toughness for increasing the mechanical impact resistance, providing greater safety in case of accidental rupture. The study assessed the mechanical behavior of the specimen without fibers and with the addition of fiber. The fibers were distributed longitudinally in three configurations. The bodies had 1600 mm<sup>2</sup> and received fibers distributed in one, two or three layers with total length of 325 mm, 650 mm and 975 mm respectively. Characterizations patterns for ceramic, expansion after pressing, drying shrinkage, dry apparent density, firing shrinkage, water absorption and mechanical flexural strength were performed. And we've checked also: mechanical impact, index pyroplastic deformation, mechanical tensile strength and microstructural analysis. We found that the composite material gave approximately 61% reduction in pyroplastic deformation and an increase of approximately eight times the impact resistance. In the analysis of the composite stress in the fiber was constant around 800 MPa, holding approximately 35 % of their value to the natural which was 2000 MPa. The fiber had big losses on their individual characteristics, however its application in ceramic composite as increased porcelain ceramic properties which provides opportunity for new applications.

**Key words:** *Metal Fibers, Porcelain, Impact Resistance, Composite.*

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A indústria de revestimento cerâmico brasileira está em ascensão tanto no cenário nacional como no internacional. Segundo os dados divulgados da ANFACER, o setor de revestimentos cerâmicos brasileiro é constituído por 93 empresas que estão instaladas em 18 estados. A concentração maior dessas empresas fica nas regiões Sudeste e Sul, mas com expansão expressiva na região Nordeste. Os fabricantes brasileiros de revestimentos cerâmicos estão alinhados com a melhor tecnologia disponível no mundo, com quase toda a produção em conformidade com as normas internacionais de qualidade. No ano de 2007, foi publicada a Norma Brasileira para Porcelanato – ABNT NBR 15463, primeira iniciativa mundial do gênero, que afirma a responsabilidade com a qualidade da cerâmica brasileira. O Brasil é um dos principais protagonista no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, estando na segunda colocação em produção e consumo. No ano de 2012 foram produzidos 865,9 milhões de metros quadrados e o Brasil exportou para 113 países, totalizando 58,8 milhões de metros quadrados, equivalente a uma receita de US\$ 270,7 milhões.

Um dos produtos responsáveis pela situação favorável do Brasil no mercado é o porcelanato. Ocorreu um crescimento considerável nos últimos anos apresentando grande aceitação no mercado externo, o que proporciona um rápido crescimento deste produto. (GILBERTONI 2005)

O atual consumidor busca a novidade e no universo da cerâmica para revestimento não é diferente. As indústrias, atendendo a este anseio do consumidor, lançam novidades anualmente em feiras, tanto no que diz respeito aos tamanhos das peças, às aplicações para locais específicos, aos desenhos da superfície, dentre outros detalhes. (BERTO 2006 e TUCCIA 2007)

O porcelanato assemelha-se a pedra natural possuindo inúmeras características que superam o desempenho de algumas delas e se destaca em relação à estas nos quesitos resistência química, resistência à brasão, uniformidade de cores na peça e entre peças,

facilidade de assentamento entre outras (HECK 1996). O porcelanato possui uma grande resistência mecânica à compressão, e ao mesmo tempo desenvolve uma fratura frágil durante o impacto (CALLISTER 2002 e MENEGAZZO 2002).

A motivação para o desenvolvimento deste estudo surgiu da possibilidade de confeccionar uma cerâmica com qualidade reconhecida, o porcelanato, melhorando sua característica com relação à fratura frágil. O propósito será ampliar sua utilização e aplicação.

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento da resistência ao impacto do porcelanato reforçado com fios metálicos, mantendo as características originais de estética, químicas e mecânicas do produto inicial. Desta forma, será desenvolvido um trabalho experimental com a realização de ensaios de caracterização e que são rotineiros para a produção de porcelanato, acrescidos de análises indicadas para a averiguação de um esperado incremento na resistência ao impacto em amostras confeccionadas com o reforço do fio.

### 1.1 Definição do Problema e Justificativa

O porcelanato de revestimento é indicado para a utilização em piso e parede. Seu desempenho nessas funções pode ser ampliado caso sua tenacidade, ou seja, a resistência ao impacto seja melhorada. Novas aplicações desse produto poderiam ser criadas, por exemplo, um porcelanato com uma resistência superior e maior tenacidade pode ser utilizado com maior segurança em fachadas – convencionais ou ventiladas – de prédios (PELLICELLI 2008). Em caso de quebra, os pedaços da peça ficarão unidos pelo fio evitando assim acidentes para as pessoas que transitam na calçada. Tal característica permitirá identificar numa vistoria periódica de manutenção a existência de peças fraturadas, mas unidas pelos fios, com posterior reposição sem ocorrência de acidentes.

Nas fachadas tradicionais de revestimentos cerâmicos as peças são fixadas com argamassa colante sobre a parede. O sistema de fachadas ventiladas consiste em um espaço entre a base suporte do edifício e a placa de revestimento, que é fixada a estrutura por ancoragens mecânicas. Esse sistema amplia a eficiência energética dos edifícios, que passam a ter característica de sistemas sustentáveis, com uso cada vez mais disseminado

(CAMPOS 2011). As peças de porcelanato especificadas para fachadas ventiladas possuem dimensões superiores a  $60 \times 60 \text{ cm}^2$ . Placas cerâmicas formadas por multicamadas e materiais compósitos podem mudar o modo de propagação da fratura, deixando de ser puramente frágil. Obter um produto nobre, como é o porcelanato, com incremento justamente no seu ponto mais crítico ampliará sua utilização e surgirão aplicações até então atribuídas a outros materiais.

O trabalho de pesquisa será realizado com um único tipo de massa de porcelanato e, após estudo bibliográfico, será escolhido um tipo de fio para o reforço, formando-se assim o cermeto. O intuito é melhorar a tenacidade e para isso a variável em estudo será na quantidade de fio utilizada, e o ciclo de queima dos corpos de prova. Para avaliar o comportamento das variáveis estudadas serão realizados ensaios nos corpos de provas e, após a análise detalhada dos resultados, será descrito e comentado.

## 1.2 Objetivos Específicos

- 1- Analisar as características dos fios metálicos, a fim de escolher o fio que atenderá as características técnicas pretendidas ao produto;
- 2- Estudar a influência de diferentes posições e tamanhos do fio metálico na massa de porcelanato, estabelecendo a disposição que proporcionará o maior aumento da tenacidade das peças;
- 3- Verificar as diferenças de comportamento do compósito em diferentes condições de queima;
- 4- Compreender o comportamento de compósito com matriz cerâmica reforçado com metálica, ou seja, um cermeto;
- 5- Analisar o comportamento da fratura provocada nos ensaios;
- 6- Avaliar as características do produto final enfatizando a tenacidade.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Avanços Tecnológicos da Cerâmica

Buscar novas funções e aplicações está presente em todos os avanços tecnológicos (ROSA 2002). Quando se fala em cerâmica, essa tendência está em ascendência conforme o artigo “Revestimentos Cerâmicos: acima e além das aplicações tradicionais” (BERTO 2006). Algumas das múltiplas possibilidades que atualmente estão abertas ao uso de revestimentos cerâmicos, com base em novas e algumas delas até agora inexploradas, funcionalidades desses produtos. Deve-se perceber que estas não são apenas possibilidades futuras, pois sua realidade industrial e comercial já os torna imediatamente utilizáveis em vários ambientes (BERTO 2006 e BRESCIANI 2006).

Este é precisamente o conceito-chave para as novas aplicações dos revestimentos: as suas características os tornam utilizáveis para funções completamente diferentes – funções até agora reservadas a outros produtos – ou, em certos casos, para funções totalmente novas. Além disso, as funcionalidades envolvidas são destinadas a melhorar aspectos diretamente relacionados com a qualidade de vida e com condições de habitabilidade, tais como são relatadas (BERTO 2006): (a) “Revestimentos com recobrimentos funcionais” recebem tratamento em sua superfície propondo algo especial como destruir materiais orgânicos, figura 2.1; (b) “revestimentos reguladores de umidade ambiente” que em ambientes úmidos se propõe em absorver parte dessa umidade e em ambientes secos o produto libera parte da água retida em si para o ambiente e (c) “Revestimentos equipados com elementos funcionais” que consiste em adaptar com relativa facilidade uma grande variedade de elementos sensoriais aos revestimentos cerâmicos, proporcionando a estes funcionalidades novas e não tradicionais. Essa dupla função já foi consagrada; como exemplo pode-se citar um painel solar com células fotovoltaicas, que ao mesmo tempo serve como cobertura de telhado, que já está instalado e funcionando na Alemanha ao longo de uma autoestrada há mais de cinco anos, figura 2.2.

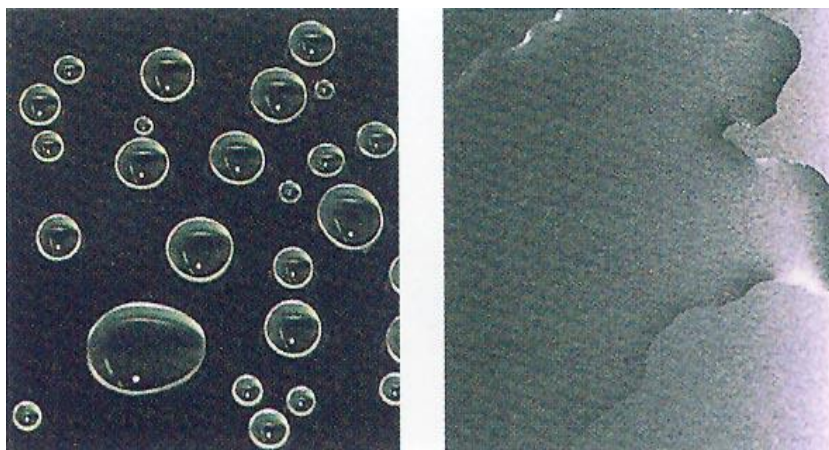


Figura 2.1 Efeito hidrofílico de um revestimento fotocatalítico (FUJISHIMA 1999).



Figura 2.2 Painel de revestimento em porcelanato equipado com células fotovoltaicas (BERTO 2006).

A possibilidade de produzir revestimentos cerâmicos com superfícies antibacterianas também já foi estudada. Partindo-se de uma mistura de grês porcelanato, preparou-se uma composição modificada com 2% em massa de prata, como o óxido de prata. O desempenho antibacteriano de tais superfícies mostrou bons resultados. Os resultados positivos permitem prever uma possibilidade de desenvolvimento industrial futuro (TUCCI 2007).

Cerâmicas com diferentes composições e técnicas de conformação foram empregadas para obtenção de cerâmicas porosas com características apropriadas para aplicações térmicas e isolantes para serem utilizadas, por exemplo, na proteção da

fuselagem de veículos espaciais no momento da reentrada na atmosfera. Este estudo foi realizado por (SANTANA 2010) em sua tese de doutorado.

O desenvolvimento de novos produtos inicia com a exigência do mercado e/ou com uma nova necessidade ao ser detectada no mercado consumidor. Nesse momento é desencadeada uma sequência de ações. Um dos primeiros aspectos a serem considerados na análise de um produto é o motivo que leva a falha ou colapso durante sua utilização (ROSA 2002).

## 2.2 Cerâmica Multicamada

Em função da natureza frágil dos materiais cerâmicos durante a fratura, sua utilização como componente estrutural é limitada (PORTU 2006). Por outro lado, componentes cerâmicos constituídos por camadas alternadas de dois tipos diferentes de materiais, denominadas de cerâmicas multicamadas, podem mudar o modo de propagação da fratura, deixando de ser puramente frágil (PORTU 2006). As aplicações estudadas para estes tipos de materiais compósitos estão voltadas para a cerâmica técnica (PORTU 2006 e LUBE 2006). As possibilidades industriais para produção em escala também constituem um importante gargalo.

A resistência mecânica de um produto depende do tipo de material, de sua microestrutura e do processo de fabricação. Estas variáveis determinam a quantidade de energia absorvida até a fratura, o modo de propagação da fratura e o tamanho dos defeitos naturais (ROSA 2002).

A figura 2.3 representa qualitativamente o comportamento típico de um material cerâmico que se rompe de modo frágil. Como pode ser observado ao aplicar determinada tensão sobre o material, o mesmo sofre uma conseqüente deformação. A constante de proporcionalidade entre tensão e deformação, ou seja, o coeficiente angular da reta corresponde ao módulo de elasticidade (E). Quando a tensão atinge valores capazes de produzir o crescimento do tamanho dos defeitos, o material se rompe de modo catastrófico (LUBE 2006 e CALLISTER 2002).

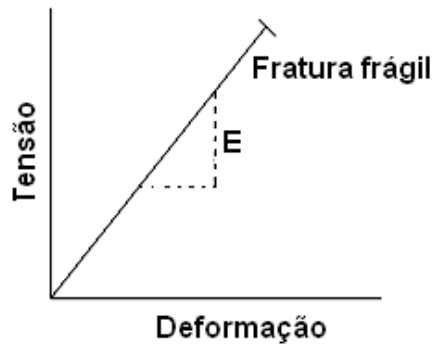


Figura 2.3 Gráfico "tensão versus deformação" típica de uma ruptura frágil (CALLISTER 2002).

No caso dos materiais cerâmicos multicamadas, apesar da natureza intrinsecamente frágil de cada camada individualmente, quando a tensão supera o limite de resistência mecânica, a frente da propagação da fratura, que tem início na primeira camada, se dissipa quando atinge as camadas adjacentes. Esse comportamento ao ser registrado por uma curva tensão *versus* deformação, pode ser representado conforme a figura 2.4. Ao ser comparado com um material monolítico, a fratura requer uma maior deformação total. Assim, ocorrendo uma melhoria em suas propriedades mecânicas e tornando o processo de fratura mais previsível. A curva na forma de degrau, depois de atingido o limite de resistência mecânica da primeira camada, corresponde à fratura sucessiva das demais camadas (PORTU 2006 e LUBE 2006).

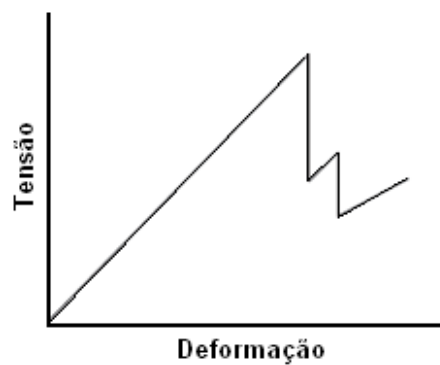


Figura 2.4 Gráfico da deformação de um revestimento cerâmico multicamadas (adaptado - LANGE 2006).

### 2.3 Material Compósito – Cermeto

No universo de novas tecnologias, muitas vezes são solicitados materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas,



por cerâmicas ou materiais poliméricos convencionais. Essa busca é intensificada quando engenheiros da indústria aeronáutica e/ou médicos e dentistas, entre outros, solicitam um material com combinação de características consideravelmente formidáveis para aplicação em seus campos de ação (CALLISTER 2002 e MARTINS 2008).

Para atender essas necessidades busca-se um material compósito. No presente contexto, é um material multifásico feito artificialmente que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem. As fases devem ser quimicamente diferentes e estarem separadas por uma interface distinta. Um dos exemplos mais óbvios de material compósito e de ampla aplicação é o concreto que reúne o agregado graúdo (pedra britada ou pedregulho), o agregado miúdo (areia), cimento e água formando uma mistura monolítica. (CALLISTER 2002 e VAN VLACK 1970).

Alguns materiais compósitos são formados por apenas duas fases, a matriz que é contínua e envolve a outra fase que é denominada de fase dispersa geralmente mais dura. As propriedades do compósito resultarão das propriedades das partes constituintes, das suas quantidades e da geometria da fase dispersa. Os compósitos reforçados com partículas são divididos conforme figura 2.5. (CALLISTER 2002) O compósito em estudo será reforçado com fio.

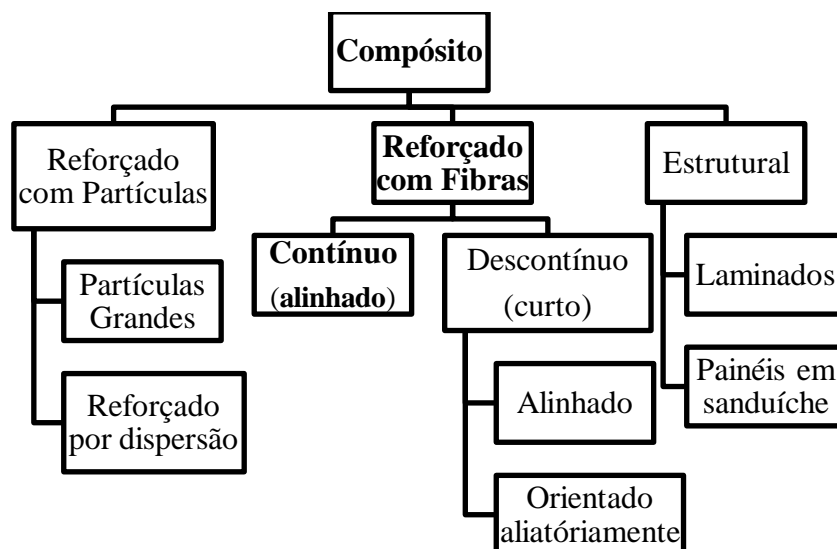


Figura 2.5 Esquema de classificação de compósito (CALLISTER 2002)

Segundo Callister (2002), tecnologicamente os compósitos mais importantes são os que possuem a fase dispersa na forma de uma fibra. Os objetivos de projeto destes

compósitos incluem com frequência ganho na resistência excepcionalmente alto. As características mecânicas dependem de um comprimento crítico de fibra que proporcione um efetivo aumento da resistência e uma aderência almejada para o material compósito. O comprimento crítico ( $l_c$ ) depende do diâmetro da fibra ( $d$ ), da sua resistência final (ou limite de resistência à tração) ( $\sigma_f$ ), bem como da força da ligação entre a fibra e a matriz (ou da tensão limite de escoamento cisalhante da matriz, o que for menor) ( $\tau_c$ ) de acordo com a equação 1. A disposição contínua e uniforme da fibra desenvolve uma melhoria significativa na resistência do compósito (CALLISTER 2002).

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau_c} \quad \text{Equação 1}$$

Uma fibra com comprimento igual ao “comprimento crítico” só suporta a carga máxima no seu centro; sendo assim, à medida que o comprimento da fibra aumenta, o reforço é mais efetivo (figura 2.6). Para fios com comprimentos maiores em 15 vezes ou mais que o comprimento crítico são denominadas fios contínuas; as fios descontínuas ou curtas possuem comprimentos menores que este. Segundo o mesmo autor (CALLISTER 2002) para várias combinações de matriz – fibra, esse comprimento crítico varia entre 20 a 150 vezes o diâmetro da fibra.

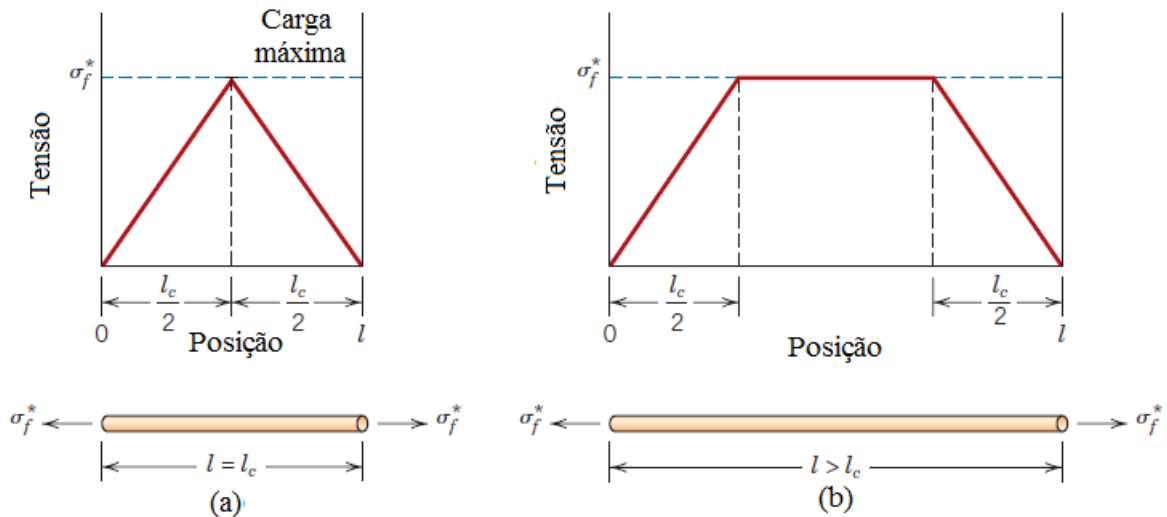


Figura 2.6 Perfil tensão-posição quando o comprimento da fibra é: (a) igual ao comprimento crítico, (b) maior do que o comprimento crítico para um compósito reforçado com fios que esteja submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração. (CALLISTER 2006)

Os materiais cerâmicos suportam elevadas temperaturas e são resilientes à oxidação, no entanto sua desvantagem é uma disposição à fratura catastrófica com pouca absorção de energia. Os materiais metálicos são tenazes, desta forma resistindo melhor à fratura. Os materiais compósitos que reúnem a cerâmica e o metal recebem o nome de “cermetos”. Se a matriz for a cerâmica a intenção é elevar consideravelmente a tenacidade à fratura na qual a cerâmica é deficiente. A iniciação das trincas ocorre normalmente com a fase matriz (cerâmica) e sua propagação é obstruída ou retardada pelas partículas, fios ou uísqueres do reforço (o metal) (CALLISTER 2002).

Um cermeto é projetado tendo em vista as excelentes propriedades de um cerâmico, tais como a dureza, resistência à flexão e a altas temperaturas, e aquelas de um metal, tais como a ductilidade (ROSA 1994).

Os cermetos possuem vasta aplicação devido as suas excelentes características técnicas. Dessa forma muito indicados, por exemplo, em locais submetidos a elevados gradientes térmicos. Os plugues de faísca, também conhecidos como vela (Figura 2.7 a), é um exemplo de utilização de cermetos. O cermeto mais comum é o carbetto cimentado amplamente utilizado como ferramenta de corte para aços endurecidos (figura 2.7 b).

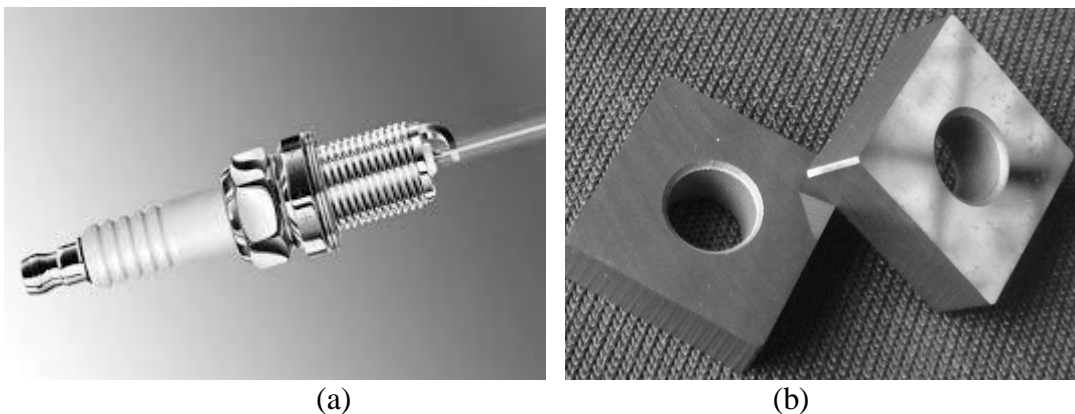


Figura 2.7 Produtos confeccionados com cermetos (a) Plugues de faísca conhecido por vela. (b) Ferramenta de corte.

Confeccionar cerâmica de revestimento com uma camada interna de reforço em fibra dispersa dentro da massa já é possível e utiliza a “técnica de compactação contínua”, técnica esta que está registrada por patentes internacionais (BRESCIANI 2006). Esta técnica permite a produção industrial de placas cerâmicas, apropriadas para o uso em fachadas externas, com dimensões maiores em relação à área e espessura com menor dimensão. O aumento da área da placa e redução na espessura é comparado à confecção de

placa similar, sem a utilização do reforço. No uso em fachadas possui outro benefício, pois se a peça se romper os pedaços ficam unidos pelas fios, evitando assim a queda e possíveis acidentes. Com isso, o resultado obtido é um incremento considerável da resistência ao impacto das peças, levando a uma menor fragilidade das mesmas (BRESCIANI 2006).

O estudo, realizado “*Compactación contínua de placas cerâmicas reforzadas con fios altamente resistentes*” (BRESCIANI 2006), trata da fabricação de cermetos através de um sistema de prensagem contínua, com uma massa cerâmica contendo fios metálicas. Os resultados obtidos (figura 2.8) apresentaram uma estabilidade na resistência à flexão e um ganho maior que 450% na resistência ao impacto, o que comprova a possibilidade do incremento relevante na resistência ao impacto através da utilização de cermetos

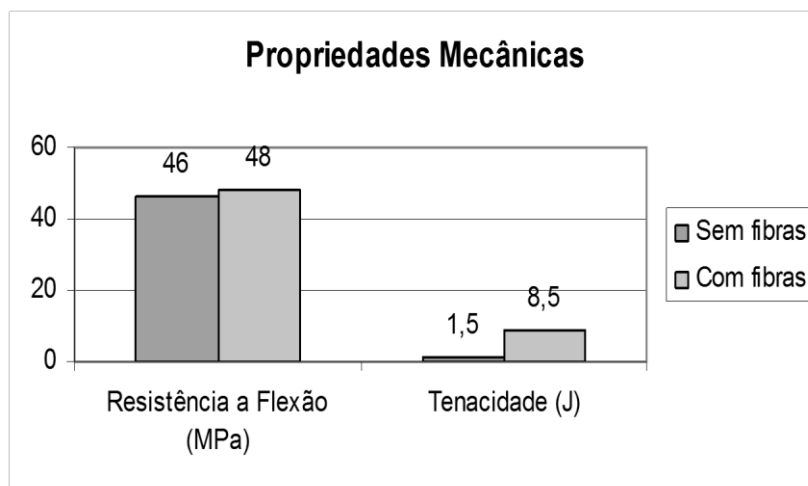


Figura 2.8 Aumento das propriedades mecânicas com a presença de fios em porcentagem (adaptado – BRESCIANI 2006).

Na Figura 2.9 têm-se um exemplo de um método de produção em escala industrial de cermetos. Inicialmente é aplicada uma primeira camada de pó, posteriormente a camada de fios é aplicada sobre a mesma e por fim é aplicada a segunda camada de pó; na sequência é realizada a compactação em prensa contínua e, por fim, é realizado o corte a cru. Esta técnica demonstrada já possui registro internacional de patente.

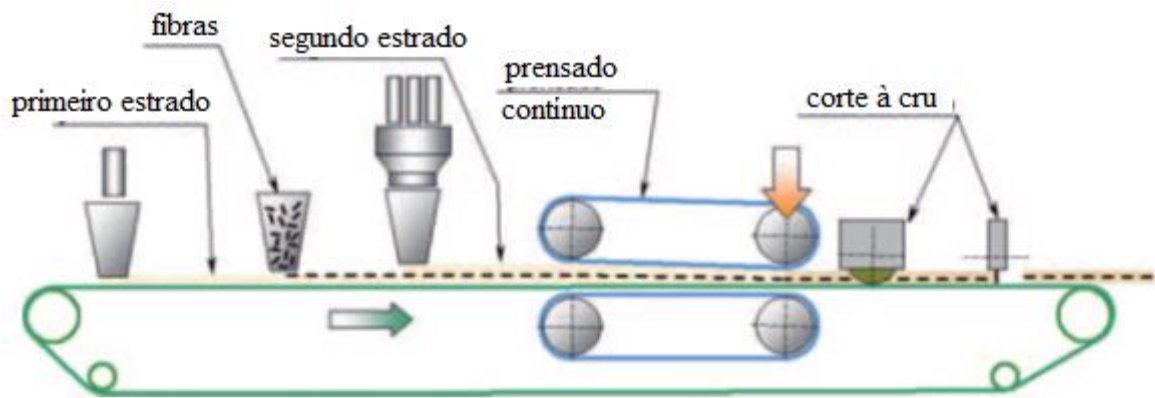


Figura 2.9 Processo de Fabricação Contínua ® de Cermetos (BRESCIANI 2006)

#### 2.4 Considerações gerais sobre materiais cerâmicos

Estudar as técnicas de fabricação e decoração dos objetos de cerâmica é tido como o “alfabeto” dos arqueólogos e historiadores, pois fornecem dados seguros para a reconstrução de muitos aspectos da vida de antigas civilizações. Sua utilização segue ao longo dos tempos na confecção de materiais tanto utilitários como artísticos, modelados em uma pasta composta de argila e de materiais purificadores (BARSA 1999).

A obtenção da cerâmica é uma técnica sem data precisa e desenvolvida por diferentes povos antigos na execução de vasilhames utilitários desde a mais remota antiguidade. A palavra cerâmica vem do grego *Kéramos*, que se referia especificamente ao vasilhame em terracota. Atualmente este termo é empregado a tudo que se fabrica com matéria-prima argilosa (KINGERY, 1998).

A cerâmica possui larga aplicação na construção civil utilizando tijolos, telhas, argamassa, concreto, revestimentos cerâmicos para piso e parede, louças sanitárias, entre outros; mas também é utilizada em tecnologia de ponta como em próteses dentárias, próteses ósseas, capacitores, e especificamente na fabricação de componentes de foguetes espaciais, devido a sua durabilidade. (CALLISTER 2002, BOTTINO 2002 e ANFACER)

As peças de cerâmica podem ser esmaltadas ou polidas e se dividem em três diferentes grupos de produtos sendo: terracota, grês e porcelana. A divisão ocorre em função do grau de cozimento e a composição química do material utilizado (BARSA, 1999).

Conceituando de forma clássica, os materiais cerâmicos são: “minerais de composição inconstante e pureza duvidosa, expostos a um tratamento térmico não mensurável, que dura o suficiente para permitir que reações desconhecidas ocorram de modo incompleto, formando produtos heterogêneos e não estequiométricos” (CLAUSSEN 1995 e KINGERY 1976). Como conceito contemporâneo, “materiais cerâmicos são compostos sólidos formados pela aplicação de calor, algumas vezes calor e pressão, constituídos por ao menos: um metal e um sólido elementar não metálico ou um não metal; dois sólidos elementares não metálicos, ou um sólido elementar não metálico e um não metal” (ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA 1997).

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo o que induz a dividi-lo em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, a cerâmica de revestimento é um grupo da classificação geral adotada (ABCEREM 2013)

A cerâmica para revestimento é definida pela NBR 13816. As peças cerâmicas destinadas ao uso em pisos e paredes devem possuir características de: textura fina, resistência à abrasão, impermeáveis a líquidos se forem esmaltados e com uma superfície durável e rígida. Os produtos são obtidos a partir da escolha dos tipos de argilas aglutinantes mediante quantidades variáveis de fundentes e aquecidos em forno a temperaturas consideradas elevadas (1100 °C a 1250 °C). Em função das quantidades diferentes e dos diversos tipos de fundentes, existe uma grande variação no grau de vitrificação das cerâmicas brancas (SHREVE 1980).

Dentre as tipologias de revestimentos cerâmicos atualmente produzidos, o porcelanato tem se destacado pela grande expansão em sua produção, observada nos últimos anos. O sucesso do produto se deve pelas propriedades técnicas e estéticas oferecidas (OLIVEIRA 1998). O porcelanato é um tipo de revestimento cerâmico cuja característica principal é a sua baixa porosidade aberta (absorção de água inferior a 0,5%), o que proporcionou o estabelecimento de um novo grupo de produtos (BI a) na norma ISO 13006. (GARCIA-SAINZ 2008 e ISO 1300:1998(E) 1998)

Esse conceito de produto teve origem na Itália no final da década de 70, com a denominação de “grés porcellanato” (OLIVEIRA 1998). O nome foi se adequando ao longo do tempo e a diversos idiomas. No Brasil, sob intensa influência italiana, o produto

passou a ser conhecido como “grês porcelanato”. A revista Cerâmica Industrial em 1996 (HECK 1996) publicou o primeiro artigo técnico sobre o tema no Brasil, ano em que se iniciou a produção na primeira fábrica nacional em Criciúma – SC, da empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos (SERRALHEIRO 2004). Após a revisão da Norma Brasileira sobre placas cerâmicas para revestimento desta tipologia (ABNT NBR 15463: 2007) válida a partir de 19/03/2007, atribui oficialmente o nome de “porcelanato”, tornando prescrita a norma NBR 13818 no que diz respeito às especificações técnicas do produto. (DE NONI 2007)

## 2.5 Porcelanato

Para que o produto cerâmico possa ser denominado porcelanato, além de ser desenvolvido a partir de matérias-primas de reconhecida pureza, deve estar de acordo com a norma ISO 13006 (Internacional), e NBR 15463 (nacional).

O porcelanato é constituído basicamente por uma mistura de argilominerais, feldspato e quartzo (SÁNCHEZ 2002 e MANFREDINI 1995). A fração argilomineral gera plasticidade em presença de umidade, resistência mecânica a seco das peças, forma mulita e fase vítrea durante a queima. Os feldspatos são responsáveis por formar a fase vítrea que acelera a sinterização. O quartzo é o componente mineral com maior temperatura de fusão; desta forma ajuda a estabilidade térmica e dimensional (SÁNCHEZ 2002 e MANFREDINI 1995). O quartzo e o feldspato são materiais que mesmo na presença de umidade não apresentam a característica de plasticidade, eles correspondem a fração de partículas de maior tamanho na mistura, geralmente no máximo com 63 µm. Sendo assim, favorecem o empacotamento de partículas durante a etapa de compactação e a retirada de água na secagem das peças. As partículas cristalinas provenientes desses materiais ou cristalizadas durante a queima são as responsáveis em reforçar a microestrutura (SÁNCHEZ 2002). Em função dos materiais que compõem o porcelanato, ele pode ser enquadrado na classe dos materiais cerâmicos triaxiais (DE NONI 2007). Na figura 2.10 o diagrama triaxial destaca a região de composição de alguns produtos cerâmicos triaxiais; o porcelanato está entre eles. (NORTON 1975 e DE NONI 2007)

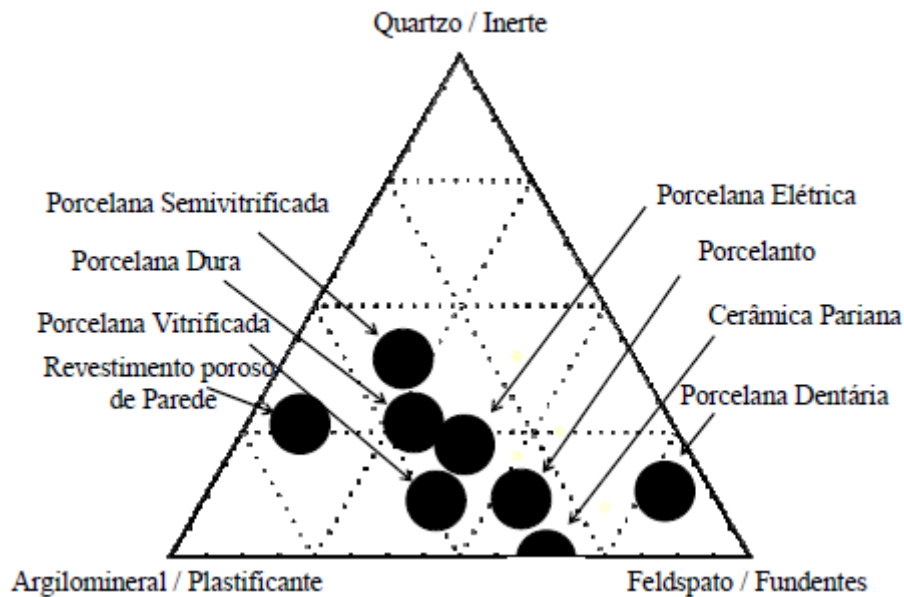


Figura 2.10 Diagrama de composições de produtos cerâmicos triaxiais em comparação com a composição do porcelanato (DE NONI 2007).

A norma brasileira (ABNT NBR 15463:2007) relata: “Porcelanatos são placas cerâmicas para revestimento, constituídas por argilas, feldspato e outras matérias-primas inorgânicas. Destina-se a revestir pisos e paredes, podendo ser conformados por prensagem, extrusão ou por outros processos. O processo de fabricação envolve elevado grau de moagem, alto teor de matérias-primas fundentes e alta densificação após a queima, resultando em produtos com baixa porosidade e elevado desempenho técnico. Podem ser esmaltados ou não, polidos ou naturais, retificados ou não retificados. Podem apresentar dimensões variadas, que vão desde áreas inferiores a 50 cm<sup>2</sup> ou superiores a 2500 cm<sup>2</sup>”.

A normalização também determina exigências quanto a outras características do produto; para que o mesmo esteja adequado a ela, deve cumprir os limites estipulados para propriedades de resistência como: à flexão, à abrasão superficial, abrasão profunda, manchamento, ataque químico e ao gelo. Determina limites também para dimensões, dureza, ortogonalidade, curvaturas (central-lateral) e empeno.

## 2.6 Processo de fabricação do porcelanato

O processo industrial do porcelanato técnico é composto de três etapas que são executadas sequencialmente até obter o produto final: (a) preparação do pó, a partir da moagem e homogeneização das matérias-primas que pode ser por via úmida, com posterior secagem por atomização, ou por via seca; (b) conformação da peça, geralmente por



compactação a partir do pó atomizado com umidade entre 5 e 7% e pressão de compactação entre 35 e 50 MPa; (c) queima, em ciclo rápido entre 40 e 60 min de frio-a-frio com temperatura máxima entre 1180 e 1220 °C, determinada pela obtenção da máxima densificação e teor de absorção de água menor que 0,5% ou menor que 0,1% (DE NONI-2007).

As composições das massas para a obtenção do porcelanato sofreram grandes mudanças ao longo dos últimos anos. Tais mudanças têm como justificativa básica o desenvolvimento tecnológico ocorrido na área de maquinarias do setor cerâmico, tais como: moinhos, secadores verticais, fornos a rolos e prensas hidráulicas de elevada pressão, tudo isso associado ao processo de queima rápida (SACMI 1996).

O processo possui uma sequência de etapas descritas na figura 2.11.

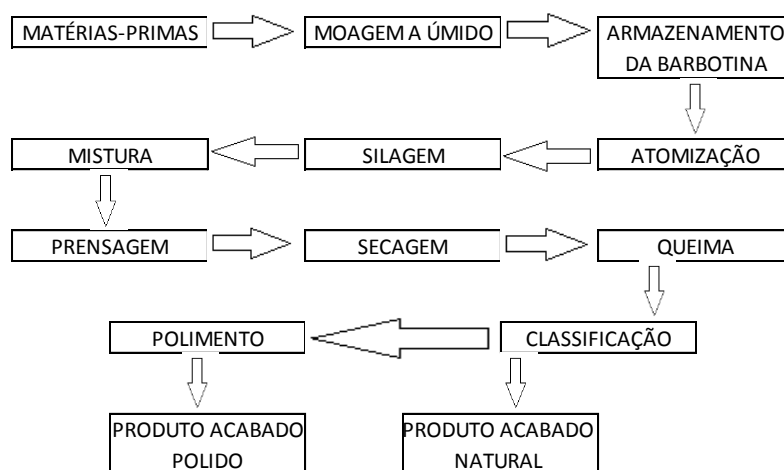


Figura 2.11 Fluxograma da sequência para a obtenção do porcelanato.

A seguir tem-se uma breve descrição das etapas do processo de produção do porcelanato técnico por via úmida sem decoração.

### 2.6.1 Preparação da massa

O processo de fabricação do porcelanato técnico inicia-se com a dosagem das matérias-primas, onde a quantidade de cada constituinte é obtida através da pesagem, seguindo uma formulação já estabelecida. Sendo importante existir um controle na liberação das matérias-primas para o uso e conhecer a umidade presente em cada uma. Controles necessários para não alterar o conteúdo de sólidos da massa e não exceder a

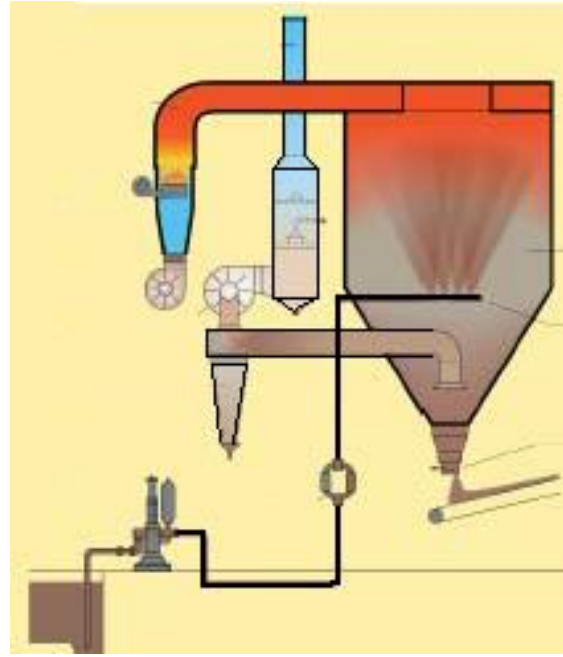
quantidade de água ideal. No porcelanato técnico na dosagem são incluídos corantes que serão os responsáveis pela coloração da peça.

Após a dosagem, acontece a moagem da mistura resultante do passo anterior. Esta consiste em reduzir o tamanho das partículas de um material, mudando a distribuição granulométrica, mistura e homogeneização de matérias-primas, moendo-as finalmente em meio aquoso (35 a 40% de água). Para essa etapa são empregados moinhos de bolas descontínuos ou contínuos (figura 2.12). Esses dotados de movimentos de rotação e alojam bolas de alta densidade de diâmetros variados no seu interior, desta maneira ocorre a moagem por choque e atrito com o material a moer, resultando uma suspensão chamada de barbotina. Uma moagem não eficiente pode alterar a reatividade da massa na etapa de queima, e comprometer todos os passos seguintes. A resistência mecânica, por exemplo, entre outros fatores, é dependente do tamanho dos poros gerados na peça, resultante das condições das partículas da massa.



Figura 2.12 Moinhos de bolas (BRISTOT, 1996).

Na sequência, a suspensão obtida é armazenada em tanques que possuem agitadores centrais para manter a homogeneidade. Em seguida, transfere-se esta para os tanques de serviço, antes porém, é necessário o peneiramento através de peneiras vibratórias com malhas definidas. Retirando os resíduos mais grossos e partículas metálicas magnéticas, evitam-se problemas, como por exemplo, entupimento dos bicos pulverizadores do atomizador. Nesses tanques, a suspensão é mantida sob agitação por aproximadamente 48h, na sequência é bombeada para os atomizadores (figura 2.13)



(a) (b)  
Figura 2.13 Atomizador: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (BRISTOT 1996).

A última etapa de preparação da massa é a atomização, que consiste em secar a barbotina pela pulverização contracorrente em câmara de alta temperatura ( $600^{\circ}\text{C}$ ). Assim obtendo-se a massa atomizada, ou seja, grãos pequenos, médios e grandes que foram definidos pelos diferentes diâmetros dos furos dos bicos pulverizadores, pela pressão de bombeamento, viscosidade e densidade da suspensão. A massa depois de atomizada deverá ser armazenada durante certo período (48 h) para homogeneização da mesma.

### 2.6.2 Conformação de peça

A etapa de conformação é fundamental, pois é o momento em que a forma e as características pretendidas são adquiridas, portanto é importante decidir que processo de conformação, se deve e pode ser utilizado (FREITAS 2009). Neste estudo, a conformação indicada é a mesma realizada no processo industrial da massa atomizada escolhida. Será a conformação por prensagem a seco.

Entre os diferentes métodos de moldar peças empregadas pela indústria cerâmica com a aplicação de pressão, a prensagem hidráulica (Figura 2.14) é o mais utilizado. Com esse equipamento, dois objetivos essenciais em toda a fabricação são atingidos, que são:

grande rendimento da produção, pela facilidade de automatizar e boas características dos produtos acabados.



Figura 2.14 Prensa hidráulica industrial utilizada na cerâmica de revestimento (SACMI 2008)

Através de força de compressão, ocorre a conformação e compactação da massa atomizada numa prensa. Na prensagem, os pós com umidade em torno de 4 e 7% são comprimidos entre duas superfícies, uma móvel (punção) e a outra fixa (estampo), com pressões específicas entre 35 MPa a 40 MPa. Estes valores variam de acordo com os formatos das placas cerâmicas e do tipo de produto. Tal pressão provoca um rearranjo e uma parcial deformação dos grãos, permitindo uma elevada compactação do corpo cerâmico sem diferenças de densidade aparente do material. O corpo cerâmico então conformado passa pelo processo de secagem.

De uma forma geral, o termo “secagem” é definido como o processo de remoção do líquido em um sólido, por meio da evaporação (MOYERS 1997). A fase da secagem tem dois objetivos: reduzir o conteúdo de água que foi necessária à moldagem, para que a queima do material seja realizada em tempos aceitáveis industrialmente aumentar a resistência mecânica do suporte cru (ou verde), permitindo o seu transporte nas próximas etapas do processo. Normalmente nos secadores industriais (Figura 2.15), o calor

necessário para efetuar a secagem das peças é introduzido predominantemente por convecção, sendo que esses gases quentes podem ser gerados numa fornalha e/ou do ar de recuperação do forno (SACMI, 1996)

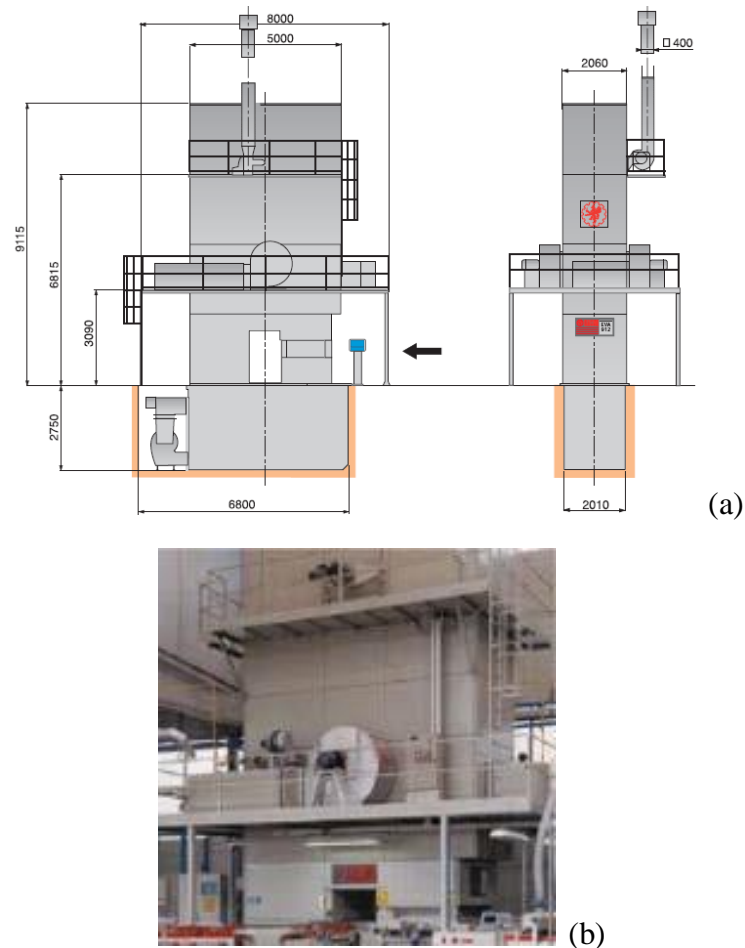


Figura 2.15 Secador vertical: (a) vista esquemática lateral e frontal; (b) sistema físico (SACMI, 1996).

### 2.6.3 Queima

Nessa etapa, a peça cerâmica já está em condições de passar pelo processo que concretiza suas propriedades técnicas, a queima. Nessa fase, o corpo é exposto a elevadas temperaturas máximas de 1180 a 1220 °C em ciclos de 40 e 60 min de frio-a-frio, que promovem a interação, total ou não, entre os constituintes. A densificação ocorre com a queima facilitada, pela fase líquida devido aos materiais fundentes que compõe a formulação de massa. A figura 2.16 demonstra a variação da temperatura em função do tempo.

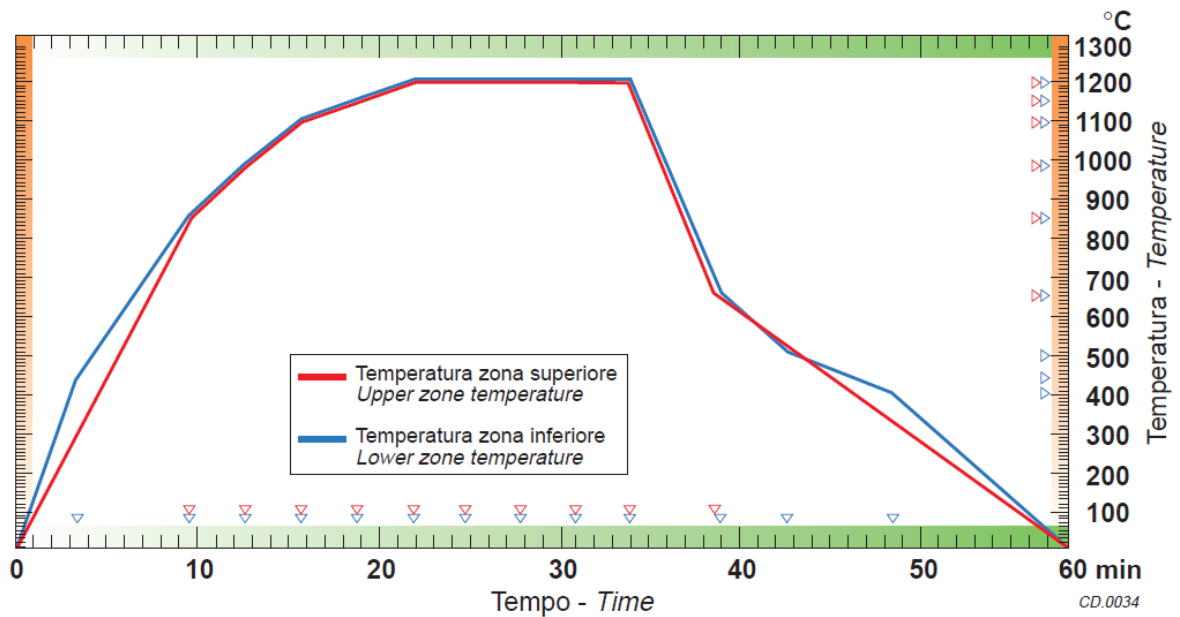


Figura 2.16 Ciclo de queima de porcelanato (BIFFI, 2002)

A queima rápida de revestimentos cerâmicos realiza-se em fornos mono estrados de rolos. Esses fornos têm permitido reduzir de forma significativa a duração dos ciclos de queima a valores inferiores aos 40 min (Figura 2.17). A melhora dos coeficientes de transmissão de calor das peças e a uniformidade e flexibilidade dos mesmos que proporciona essa redução do tempo (BRISTOT, 1996)



Figura 2.17 Forno a rolo (BRISTOT, 1996).

Após as etapas descritas, as peças estão na forma natural e prontas para utilização, podendo passar por polimento na superfície, conferindo um brilho acentuado a mesma.



Figura 2.18 Zona de classificação, embalagem, paletização e expedição (KINGERY 1998)

Para concluir o processo industrial, segue para o setor de classificação dos defeitos estéticos para posterior expedição. Esta classificação é realizada em máquinas classificadoras automáticas. Em seguida é realizado o embalagem e a paletização, e as caixas vão para o setor de expedição (Figura 2.18).

O porcelanato é um produto cerâmico de características apreciadas, desde que o processo de fabricação ofereça credibilidade, que promova ao produto real qualidade, tanto técnica quanto estética.

## 2.7 Fios metálicas para reforço

Os aços para barra, arames e fios, conforme a aplicação, pode apresentar características de resistência à tração realmente notáveis. Fios e arames de aço são produzidos por trefilação obtidos a partir de barras. Na trefilação se obtém dimensões mais precisas, seção mais uniforme e superfícies perfeitas e polidas. Durante a trefilação, o material aumenta sua resistência e fica mais duro.

As barras de aço carbono para aplicações especiais tais como aros de pneus, molas de válvulas e “fio de música” e outras aplicações de maior responsabilidade, devem ser produzidas de modo a reduzir-se ao mínimo a ocorrência de imperfeições superficiais. Quanto menor as imperfeições superficiais, menor a resistência à fadiga do produto final, propriedade fundamental nas aplicações citadas. (CHIAVERINI 2005)

Com o fio para instrumento musical em aplicações mecânicas, pode-se obter valores de resistência à tração em torno de 2550 MPa para os diâmetros menores, em torno de 0,10 mm de diâmetro. Os arames de aço com alto teor de carbono são conhecidos por possuírem elevados valores das propriedades mecânicas. Para os de diâmetros pequenos – menores que 2 mm – é recomendado o tratamento térmico de patenteamento. Os objetivos fundamentais são de aumentar a resistência à tração e aumentar a tenacidade. O patenteamento consiste num tratamento térmico antes da trefilação, de aquecer o aço a uma temperatura seguido de um resfriamento rápido. Resumidamente o patenteamento seguido de trefilação permite obter fios de alta qualidade com limites de resistência a tração com valores entre 2450 a 2940 MPa e juntamente com tão boas resistência a ductilidade e a tenacidade. (CHIAVERINI 2005 e REZIC 2009)

## 2.8 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais são o alvo da atenção de várias pessoas e grupos que possuem interesses diferentes. Estas buscam como utilizar um material usufruindo da melhor forma possível o seu desempenho e, ao mesmo, tempo não solicitar ao material esforço ao qual ele não responderá, e assim, colocando a falha no que foi projetado. (CALLISTER 2002 e SOUZA 1982).

Muitos materiais em serviço estão sujeitos a forças ou cargas. Em tais situações é necessário conhecer as características do material para projetar conforme as necessidades às quais o material será exposto. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação, a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez (CALLISTER 2002).

“As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço” (CALLISTER 2002). Portanto, como os esforços serão aplicados aos corpos em análise e, em qual momento, são padronizados por ensaios. Algumas das normas técnicas utilizadas pelos laboratórios de ensaios são: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) no Brasil, ASTM (American Society for Testing and Materials) nos Estados Unidos, DIN (Deutsches Institut für Normung) na



Alemanha, AFNOR (Association Française for Normalisation) na França, entre outras (SOUZA 1982).

Embora as causas de falha e o comportamento de materiais possam ser conhecidos, a prevenção de falhas é uma condição difícil de ser garantida. A resistência mecânica de um produto depende do tipo de material, de sua microestrutura e do processo de fabricação. Estas variáveis determinam a quantidade de energia absorvida até a fratura, o modo de propagação da fratura e o tamanho dos defeitos naturais (CALLISTER 2002).

A falha em materiais frágeis ocorre em geral por ruptura, pois ocorre um crescimento instável de pequenos defeitos, como porosidades e inclusões, resultando numa fratura. Esse crescimento instável leva a ruptura final.

## 2.9 Fratura

A fratura, de modo geral, consiste na separação ou fragmentação em duas ou mais partes de um corpo no estado sólido, pelas ações de tensões impostas que possua natureza estática e a temperatura menor que a de fusão do material (ROSA 1994 e CALLISTER 2002). O estudo da fratura é bem vasto e envolve áreas bem diversas, como a física do estado sólido, a ciências do material e a mecânica do contínuo. A fratura deve ser tratada como um fenômeno envolvendo as mais diferentes áreas do conhecimento humano.

Qualquer processo de fratura é dividido em duas etapas distintas: o início da trinca e a propagação desta, em resposta a imposição de uma tensão. A modalidade da fratura de forma geral é classificada em dois tipos: fratura dúctil e fratura frágil. A classificação está baseada na habilidade de um material em experimentar uma deformação plástica. A fratura dúctil é caracterizada por uma considerável deformação plástica antes da fratura propriamente dita. Já a fratura frágil caracteriza-se por uma grande velocidade na propagação da trinca, apresentando pouca ou nula deformação plástica (CALLISTER 2002 e ROSA 1994).

A fratura dúctil possibilita a visualização da propagação da trinca que ocorre de forma lenta gerando um alerta, permitindo uma ação de prevenção a ser elaborada e executada. Sendo assim uma fratura dúctil normalmente é preferível. Para que ocorra a

propagação de uma trinca, é necessário que a tensão em seu extremo ultrapasse a tensão coesiva do material, sendo essa a tensão que mantém os átomos unidos (ROSA 1994).

As cerâmicas, na temperatura ambiente, quase sempre fraturam antes de qualquer deformação plástica que possa ocorrer em resposta à aplicação de um esforço de tração, sendo a fratura frágil uma característica dos materiais cerâmicos.

A fratura frágil gerou a necessidade de uma melhor compreensão dos mecanismos de fratura. Cronologicamente o estudo da fratura iniciou com técnicas de ensaio de impacto, de modo a se determinar as características da fratura dos materiais. No entanto os resultados obtidos por estes ensaios são de característica qualitativa, limitando a utilização dos resultados em projetos. Posteriormente surge o estudo da “mecânica da fratura” como disciplina científica e trabalhando a quantificação dos resultados (CALLISTER 2002). Na sequência se fará um breve relato primeiro da mecânica da fratura e posteriormente sobre os ensaios de impacto (resistência ao impacto).

### 2.9.1 Mecânica da fratura – Teoria de Griffith

O grande mérito da mecânica da fratura é a de possibilitar ao projetista, valores quantitativos de tenacidade do material permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica (ROSA 1994). O comportamento de um material contendo trincas ou outros tipos de falhas é analisado por meio da mecânica da fratura. Oriundas de defeitos extrínsecos (processamento, usinagem, dentre outros) e intrínsecos (microestrutura e características particulares do material) (DOWLING 2007 e SALVINI, 1995). O estudo da “mecânica da fratura” permite a quantificação das relações entre as propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trincas. (CALLISTER 2002). A resistência à fratura de um material sólido é uma função das forças de coesão que existem entre os átomos.

Griffith realizou um estudo na década de 1920 sobre a fratura que poderia ser explicada pela presença de defeitos ou trincas muito pequenos, microscópios, que sempre existem sob condições normais na superfície e no interior de um material. A existência desses defeitos reduz a resistência à fratura quando uma tensão é aplicada, porque pode ser amplificada ou concentrada na extremidade desses defeitos ou pequenas trincas. Mas essa magnitude depende da orientação e da geometria da trinca. Esse fenômeno é demonstrado

na figura 2.19 com a representação de um perfil de tensões através de uma seção reta que contém uma trinca interna (CALLISTER 2007).

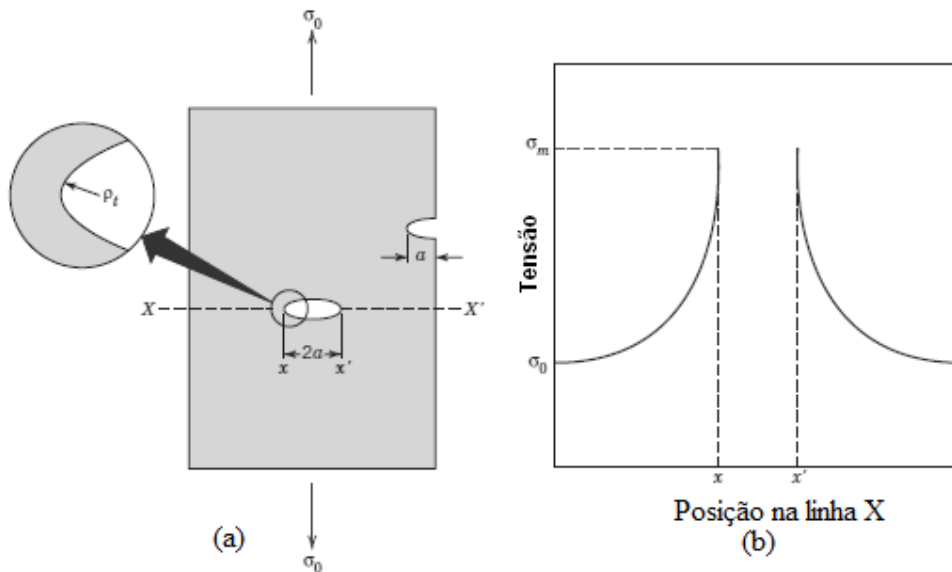


Figura 2.19 (a) a geometria das trincas de superfícies e internas. (b) diagrama esquemático do perfil de tensão ao longo da linha X – X’ em (a), demonstrando a amplificação de tensão nas extremidades da trinca. (CALLISTER 2007)

Pode-se verificar pelo perfil que a tensão é máxima ( $\sigma_m$ ) na extremidade da trinca e vai diminuindo ao se afastar em direção a extremidade da peça. Na lateral da peça assume o valor de tensão ( $\sigma_0$ ), ou seja, a carga aplicada é dividida pela área da seção reta da amostra (perpendicular a essa carga). Devido às habilidades em amplificar uma tensão aplicada em suas localizações, esses defeitos são algumas vezes conhecidos por “fatores de concentração de tensões” (CALLISTER 2002).

Para uma micro trinca relativamente longa que possui um pequeno raio de curvatura de extremidade vale a equação (Equação 2). O grau de amplificação da tensão depende do comprimento da trinca e do raio de curvatura da extremidade da trinca, de acordo com a figura 2.19(b), sendo maior para defeitos longos e pontiagudos.

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:  $\sigma_m$  = tensão máxima na extremidade da trinca;

$\sigma_0$  = tensão de tração nominal aplicada;

$\rho_e$  = raio de curvatura da extremidade da trinca;

$a$  = comprimento de uma trinca superficial ou metade do comprimento de uma trinca interna.

O termo  $\left(\frac{a}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}$  seria o fator de concentração de tensões (Kt). O valor de Kt é

listado para uma infinidade de geometrias de peças e ou defeito (ROOKE 1974 e ASME 1953).

Deve-se registrar que a amplificação da tensão não esta restrita a esses defeitos microscópicos, ela pode ocorrer em descontinuidades internas de dimensões macroscópicas, ou seja, em vazios, em arestas vivas e nos entalhes em grandes estruturas. O fator de concentração de tensões é mais significativo em materiais frágeis do que em materiais dúcteis.

O método de critério de Griffith é indicado para materiais frágeis, baseado num balanço de energias prevendo a força que deve ser aplicada em um corpo para propagar a trinca ou a fissura (ROSA 1997).

“Griffith propôs então que todos os materiais frágeis contêm uma população de pequenos defeitos e trincas que possuem uma variedade de tamanhos, geometrias e orientações. A fratura irá resultar quando, com a aplicação de uma tensão de tração, a resistência à tração teórica do material é excedida na extremidade de um desses defeitos. Isso leva à formação de uma trinca que então se propaga rapidamente. Se nenhum defeito estivesse presente, a resistência à fratura seria igual à resistência à tração do material. Foram desenvolvidos *whiskers* metálicos e cerâmicos muito pequenos e virtualmente livres de defeitos com resistências a fraturas que se aproximam de seus valores teóricos.” (CALLISTER 2002)

Griffith em seu estudo de propagação da trinca demonstrou que a tensão crítica  $\sigma_c$  exigida para a propagação da trinca em um material frágil é descrita pela equação 3

$$\sigma_c = \left(\frac{2.E_{ys}}{\pi.a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:  $\sigma_c$  = tensão crítica;  
 $E$  = módulo de elasticidade;  
 $\gamma_s$  = energia de superfície específica;  
 $a$  = metade do comprimento da trinca interna.

Este estudo se aplica somente a materiais completamente frágeis, para os quais não existe qualquer deformação plástica. Ao continuar a explorar o desenvolvimento da mecânica da fratura, é importante observar as distribuições de tensão na vizinhança da extremidade da trinca que está avançando.

Existem fundamentalmente três formas da trinca avançar, e cada uma irá afetar um deslocamento diferente da superfície da trinca. A figura 2.20 ilustra estas formas. No modo (a) ocorre uma abertura na trinca e nos modos (b) e (c) um deslizamento e arrastamento da trinca. Em materiais sólidos frágeis, a propagação das trincas ocorre conforme o modo (a) (CALLISTER 2007). Assim, serão abordados apenas os mecanismos relativos a este plano de fratura.

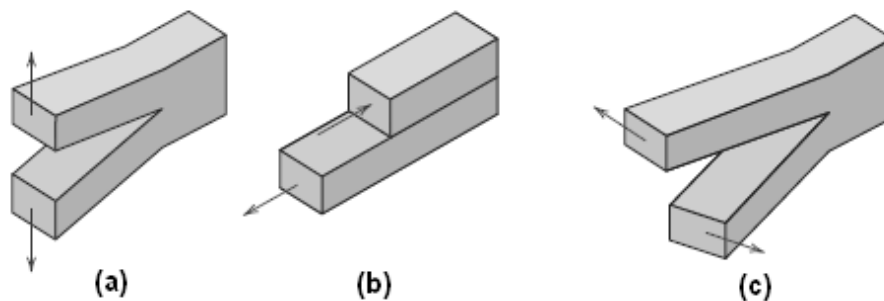


Figura 2.20 Modos de carregamentos básicos de uma trinca. (CALLISTER 2007)

O critério descrito para a propagação de trinca contendo um defeito num material frágil ocorre quando o nível de tensão excede o valor crítico de tensão aplicada ( $\sigma_c$  – conforme equação 3 já citada). Mas a medida da habilidade de um material cerâmico em resistir à fratura quando uma trinca esta presente é especificada em termos da tenacidade à fratura. Por definição, a tenacidade à fratura é uma propriedade que representa a medida da resistência de um material à fratura frágil quando existe uma trinca presente (CALLISTER 2002). A tenacidade a fratura em deformação plana,  $K_{IC}$ , é definido de acordo com a equação 4 e possui unidade no Sistema Internacional representada por  $\text{MPa}\sqrt{m}$ .

Sendo  $Y$  a representação de um parâmetro que depende tanto da amostra (largura da amostra –  $w$ ) como das geometrias da trinca (comprimento de uma trinca superficial ou metade do comprimento de uma trinca interna –  $a$ ), pois é a razão entre “ $w$ ” e “ $a$ ”, portanto um parâmetro adimensional.

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi.a} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:  $K_{Ic}$  = tenacidade à fratura;

$Y$  = parâmetro adimensional sendo  $Y = \frac{a}{w}$

$\sigma$  = tensão aplicada;

$a$  = comprimento de uma trinca superficial ou a metade do comprimento de uma trinca interna.

A tenacidade é o parâmetro que caracteriza a resistência a ruptura do material. Esta é definida com a energia específica absorvida durante o processo de ruptura. Assim uma fratura dúctil é caracterizada por uma grande absorção de energia, o que se traduz como uma tenacidade elevada. Uma fratura frágil possui uma baixa absorção de energia e logo baixa tenacidade (ROSA 1994).

A tenacidade a fratura em deformação plana  $K_{Ic}$  é uma propriedade fundamental dos materiais que depende de muitos fatores, como a temperatura, a taxa de deformação e a microestrutura. O valor de  $K_{Ic}$  normalmente aumenta com a redução do tamanho do grão, ou seja, quando a composição e outras propriedades micro estruturais não variam (CALLISTER 2002).

Numa peça, ao ser submetida a tensão de compressão, não ocorre ampliações de tensões associadas a defeito existente. Sendo assim, as cerâmicas frágeis possuem resistência muito maior na compressão do que na tração, sendo este valor aproximadamente dez vezes maior. Desta forma a utilização da cerâmica é mais indicada em carregamentos de compressão. Resistências representativas para os materiais cerâmicos são determinadas com a realização de ensaios de flexão transversal levados até a fratura do material, tema que será abordado posteriormente.

### 2.9.2 Resistência ao impacto

O estudo da resistência ao impacto de um material é uma análise qualitativa, que antecede o estudo da mecânica da fratura, conforme informado nesse trabalho. Os ensaios padronizados para determinação da resistência ao impacto são para materiais metálicos e poliméricos, tendo em vista que a cerâmica não possui resistência ao impacto apreciável para ser dimensionada. Na literatura, mesmo ao se referir a materiais frágeis, está se falando de metais e polímeros (SOUZA 1982 e CALLISTER 2002).

Para os materiais com comportamento frágil, os ensaios de impacto são muito úteis, pois indica ao menos, de forma orientativa, o grau de ductilidade. Materiais frágeis possuem um comportamento complexo de difícil previsão, estando sujeitos a uma transição de comportamento (ROSA 1994).

Dois são os ensaios padronizados pela Norma ASTM E23: o ensaio de Charpy e Izod (ROSA 1994 e CALLISTER 2002). São utilizados para medir a energia de impacto, algumas vezes denominados de “tenacidade ao entalhe”. A principal diferença entre as técnicas de Charpy e Izod está na forma como o corpo de prova é sustentado. Neste trabalho descreveremos só a técnica de Charpy. De uma forma resumida, o ensaio de Charpy vale como uma forma de indicação qualitativa a respeito do comportamento dúctil-frágil, falhando no processo quantitativo. As limitações que o ensaio Charpy apresenta podem ser listadas como: (ROSA 1994)

- a) Difícil de correlacionar com o comportamento real em serviço. É usado principalmente na comparação de diferentes tratamentos e materiais;
- b) Corpo de prova pequeno, não sendo dessa forma representativo de heterogeneidade que a estrutura real possui;
- c) Não é aplicável para aços de alta resistência e para ligas não ferrosas, pois apresentam um valor da energia absorvida muito baixo;
- d) O ensaio não separa a energia de nucleação e a energia de propagação, pois a trinca inicial já existe decorrente de um problema de fadiga, corrosão ou outros mecanismos metalúrgicos, ou mesmo devido a falhas no próprio processo de fabricação.

O resultado do ensaio é apenas uma medida da energia absorvida e não fornece indicações seguras sobre o comportamento do material (metal) ao choque em geral. Não

seria possível ensaiar uma peça nas reais condições de uso, pois o ensaio não permite. Outra limitação do ensaio de impacto é a impossibilidade de correlacionar às dimensões do corpo de prova. Expressar a energia absorvida por unidade de área no resultado do ensaio não tem significado prático, fato este que num ensaio de tração os resultados independem das dimensões do corpo de prova. O resultado do ensaio, isto é, a energia absorvida para romper o corpo de prova, pode ser utilizada como um controle de qualidade para o fabricante do produto (SOUZA 1985).

Para a realização do ensaio é utilizado um equipamento padronizado. A aplicação da carga de impacto é feita por um pêndulo que é deixado cair e, após a ruptura do corpo de prova, é determinada a energia absorvida na fratura do material. Essa energia, em joule [J], é a medida da tenacidade Charpy do material. A figura 2.21 indica o princípio do ensaio e a geometria do corpo de prova Charpy com o entalhe em V. (SOUZA 1985 e CALLISTER 2007)

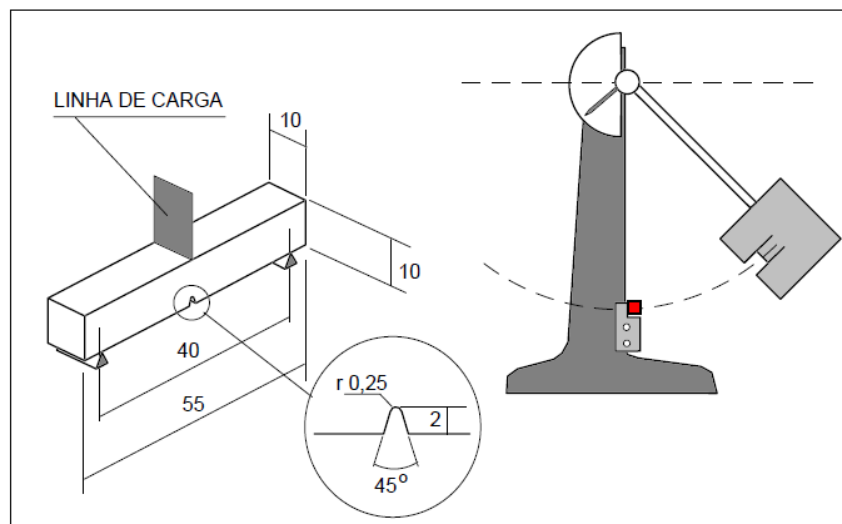


Figura 2.21 Corpo de prova Charpy com entalhe em V e princípio do ensaio (CALLISTER 2007)

Para avaliar o grau de fragilização que o material sofre em uma determinada temperatura, deve-se analisar além da energia absorvida na ruptura, como já citada, a aparência da fratura e a deformação plástica decorrente da fratura dúctil, que provoca uma contração lateral na região do entalhe. O ensaio de Charpy não permite prever diretamente o tipo de comportamento em serviço, se dúctil ou frágil. Os testes devem ser usados comparativamente.



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada para desenvolver esse trabalho seguiu o fluxograma representado na figura 3.1.

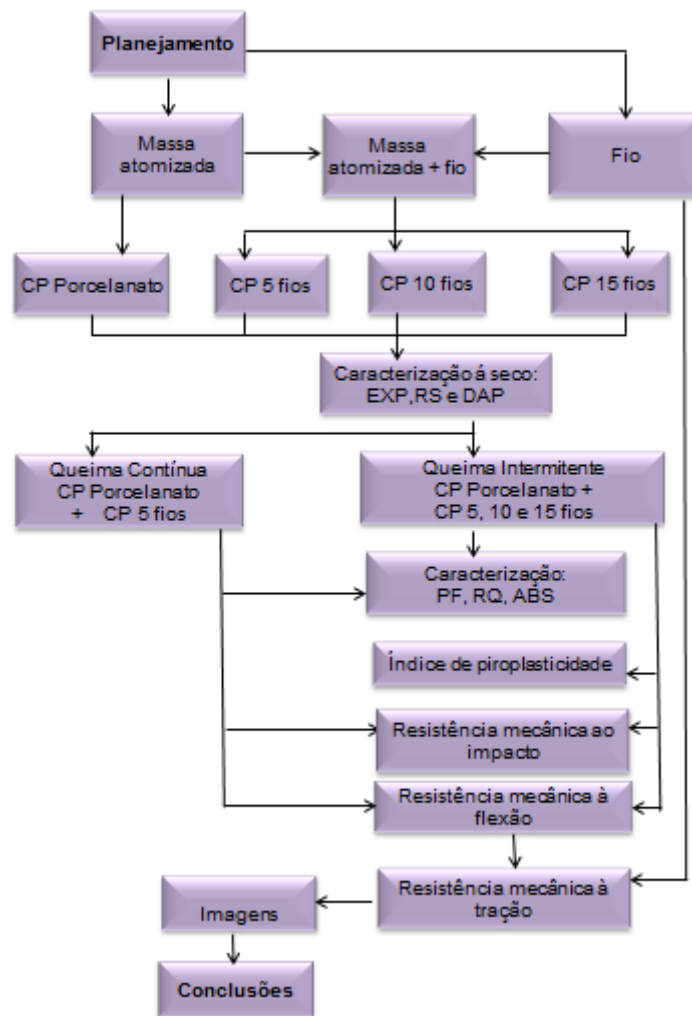


Figura 3.1 Fluxograma da metodologia para a realização desse trabalho

Após o planejamento, foram iniciados os testes experimentais. Todas as etapas executadas estão descritas a seguir em ordem cronológica.

### 3.1 Materiais utilizados

#### 3.1.1 Massa atomizada

A matriz do compósito foi um elemento constante no estudo. Para a realização de todas as fases do trabalho foi utilizada uma massa atomizada para porcelanato técnico composta por uma mistura de argila, feldspatos e quartzo com uma umidade de 5,5 % processada industrialmente na empresa. Esta é a mesma utilizada industrialmente na empresa onde o estudo foi realizado. A escolha da massa foi baseada na necessidade de aproximar o máximo possível às condições dos testes laboratoriais com as condições de processamento fabril relacionadas às características de massa.

#### 3.1.2 Reforço

Entre as possíveis geometrias da fase dispersa, o estudo conduziu por escolher a fibra contínua por desenvolver uma melhoria significativa na resistência do compósito. A distribuição dos fios foi feita em sentido único e longitudinal em relação a maior dimensão (comprimento) do corpo de prova.

De acordo com a revisão bibliográfica iniciou-se a escolha do fio para reforço que possuísse uma pré-disposição de integração com a matriz do compósito, ou seja, ter indicativos de uma boa aderência entre “matriz – reforço” e condições de ser exposto ao ciclo de queima necessário para o compósito adquirir as características mecânicas desejadas. O produto final deveria manter as características de um porcelanato sem demonstrar externamente a presença de fios de reforço interno.

A facilidade de obter o fio com características mecânicas e dimensionais constantes direcionou a escolha para um fio existente no mercado. Optou-se por empregar como fios de reforços, fios utilizados como cordas de violão, que possuem condição de aplicação e alto valor de resistência à tração. Um “fio de música” de 0,10 mm de diâmetro pode atingir uma resistência à tração de 2550 MPa. O fator determinante na escolha do tipo de fio, foi a condição de estudo, por se tratar de testes laboratoriais.

A escolha do fio esbarra no elevado custo do mesmo, aumentando assim o valor do produto final. Sobre este fato Van Vlack (2000) afirma que mesmo o custo não sendo uma

propriedade intrínseca, é um fator determinante na escolha de um material. Conclui afirmando que em muitas ocasiões é mais vantajoso pagar mais por um elemento constituinte, se isso proporcionar um aumento da vida útil do produto e diminuir os custos com manutenção e substituição (VAN VLACK 2000). Portanto há de se considerar a relação custo x benefício na escolha de materiais.

Foram utilizados fios de aço, com diâmetro de 0,25 mm obtidas por trefilação. Suas principais características são: material com alta resistência mecânica e duro, secção transversal constante, superfície perfeita e polida. Para seguir a pesquisa com rigor, os fios são de um mesmo lote e de único fabricante.



Figura 3.2 Fios prontos para a preparação dos corpos de prova.

O comprimento do fio foi dimensionado em função da retração que o porcelanato sofre durante a etapa de secagem e queima. Neste caso o comprimento de 80 mm do corpo de prova passará a ser próximo de 73 mm após a queima dos mesmos. O comprimento dos fios de aço foi estabelecido em 65 mm de modo a permanecerem completamente internas no corpo de prova mesmo depois da etapa de queima (figura 3.2).

### 3.2 Método de conformação

Basicamente a operacionalidade de conformação por prensagem a seco é o preenchimento com o pó granulado, isto é, a massa atomizada, no interior da matriz. Uma pressão é aplicada compactando assim o corpo de prova. A matriz utilizada tem a forma da peça pretendida que adquiri um aspecto praticamente definitivo ao término da compactação.

A prensagem executada foi a uniaxial de ação simples, a pressão foi aplicada pelo punção superior, o qual foi introduzido na cavidade que contém a massa em pó. Após a compactação, o punção superior é removido, e a extração do corpo é efetuada pela subida do punção inferior. Este sistema é indicado para a obtenção de peças de espessura reduzida e formas geométricas simples. Após esse processo os corpos possuem uma resistência mecânica própria que suportam os tratamentos seguintes.

Neste estudo, o procedimento citado ocorreu em prensa laboratorial (figura 3.3) com estampo de  $(80 \times 20)$  mm<sup>2</sup> de dimensões do Colégio Maximiliano Gaidzinski, resultando em corpos de prova prismáticos. A espessura dos mesmos é dependente da quantidade do pó atomizado alimentado na prensa, nesse estudo ficou em torno de 5 mm.



Figura 3.3 (a) prensa hidráulica do colégio Maximiliano Gaidzinski (b) detalhe do compartimento para confecção do corpo de prova com o pó atomizado

A compactação ocorreu seguindo as etapas descritas a seguir: inicialmente depositou-se no estampo inferior a massa atomizada de porcelanato, a distribuição dos fios será especificada posteriormente; na sequência a massa foi submetida a pressão de compactação no interior do estampo de 5,7 MPa (58 kgf/cm<sup>2</sup>) e realizada a desareação; a

seguir foi realizada uma nova compactação a pressão de 13,1 MPa (134 kgf/cm<sup>2</sup>) e uma nova desaeração, por fim foi realizada a compactação propriamente dita a uma pressão específica de 43,3 MPa (442 kgf/cm<sup>2</sup>).

### 3.3 Método de aplicação dos fios

A distribuição do fio nos corpos de prova foi feita de forma longitudinal com 5 fios por camada. A figura 3.4 representa as vistas ortogonais de um corpo de prova com 5 fios. As medidas estão expressas em milímetros. Além do corpo de prova representado na figura com 5 fios foram confeccionados corpos de prova com 10 fios e 15 fios distribuídas em uma, duas e três camadas respectivamente. As respectivas secções transversais em corte estão representadas na figura 3.5. A distribuição ocorreu de forma constante em todo o estudo.

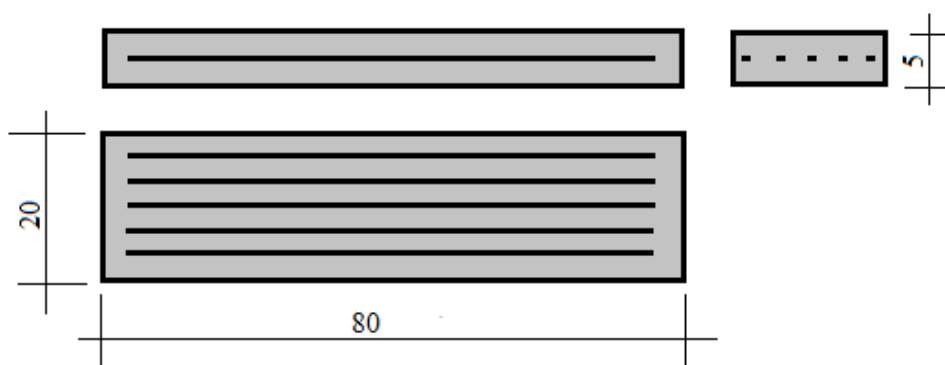


Figura 3.4 Esquema de distribuição longitudinal de 5 fios num corpo de prova com medidas expressas em mm.

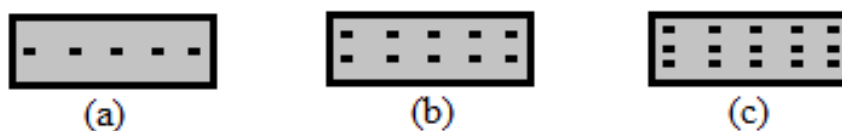


Figura 3.5 Representação da secção transversal dos corpos de prova. (a) com 5 fios, (b) com 10 fios e (c) com 15 fios

A distribuição dos fios foi realizada de forma manual, com o auxílio de uma pinça, distribuídas de maneira mais uniforme possível, em sentido longitudinal no corpo de prova conforme figura 3.6.

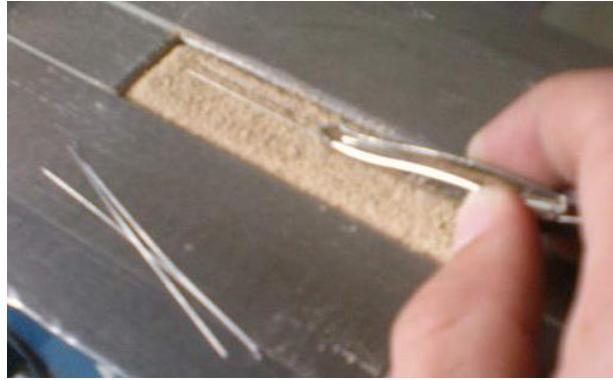


Figura 3.6 Aplicação dos fios na etapa de conformação

### 3.4 Preparação dos corpos de prova

Foram preparados quatro tipos de corpos de prova, um sem fios e os demais com 5, 10 e 15 fios. Todos com 20g de massa atomizada utilizando uma balança laboratorial com precisão de 0,01 g para aferição da massa. A quantidade de corpos de prova confeccionados foi de: 80 sem fios, 80 com 5 fios, 40 com 10 fios e 40 com 15 fios.

Primeiro foram preparados os corpos sem fios a partir do pó atomizado e conformado por compactação, cujo processo foi descrito anteriormente. No trabalho estes corpos também serão chamados de porcelanato.

Na sequência foram elaborados os corpos com os fios metálicos, nomeados também de cermetos. A quantidade de 20 g de pó atomizado foi separada em porções conforme a quantidade dos fios. Para corpos de 5 fios foram duas porções de 10 g cada. Para os corpos com 10 fios, três porções, sendo duas com 6,5 g e outra de 7 g utilizada como a camada interna. Para os corpos de 15 fios, foram quatro porções de 5 g. Os materiais foram depositados de forma alternada no estampo da prensa e manual. Iniciava-se com uma camada de pó atomizado, seguido pela deposição do fio e concluía-se com o restante do pó, conforme a quantidade de camadas dos fios. Realizava-se a compactação somente após ser verificado que todo o pó atomizado e os respectivos fios para cada modelo de corpo de prova, estavam sendo depositados no estampo da forma planejada.

A secagem dos corpos de prova foi realizada em estufa laboratorial a uma temperatura de aproximadamente 105 °C para total evaporação da água e por 24 h.

### 3.5 Processo de Queima

Foram realizados dois tipos de queima. Queima em forno intermitente para todos os tipos de corpos de prova e queima contínua para corpos sem fios e com cinco fios. A temperatura de queima foi determinada previamente por diagrama de gresificação com corpos de prova que continham fios.

Em estudos laboratoriais a queima dos corpos de prova pode ser executada em fornos intermitentes. Os corpos de prova são depositados no compartimento de queima do forno e este é fechado. Programa-se o ciclo de queima escolhido que compreende de uma taxa de aquecimento, um patamar de queima com a temperatura máxima do ciclo e posterior resfriamento. Neste estudo a queima intermitente ocorreu em forno laboratorial (figura 3.7), com taxa de aquecimento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até  $1210\text{ }^{\circ}\text{C}$  e patamar de 6 min na temperatura máxima, e resfriamento natural dentro do forno.



Figura 3.7 Forno laboratorial intermitente utilizado no estudo.

No processo industrial de cerâmica de revestimento, a queima é realizada em fornos industriais contínuos que possuem um túnel para o deslocamento das peças. Para estudos existem fornos contínuos laboratoriais que aproximam os testes em laboratório à realidade fabril. Os fornos contínuos possuem para os corpos um apoio formado por rolos girantes refratários que deslocam as peças do início do processo ao final. A entrada e saída dos

corpos são contínuas nesse túnel de queima. A queima contínua foi realizada no forno laboratorial do DETEC (Departamento de Engenharia e Tecnologia em Cerâmica) a uma temperatura de 1210 °C com tempo de ciclo de frio-a-frio de 60 min, A figura 3.8 mostra o forno utilizado.

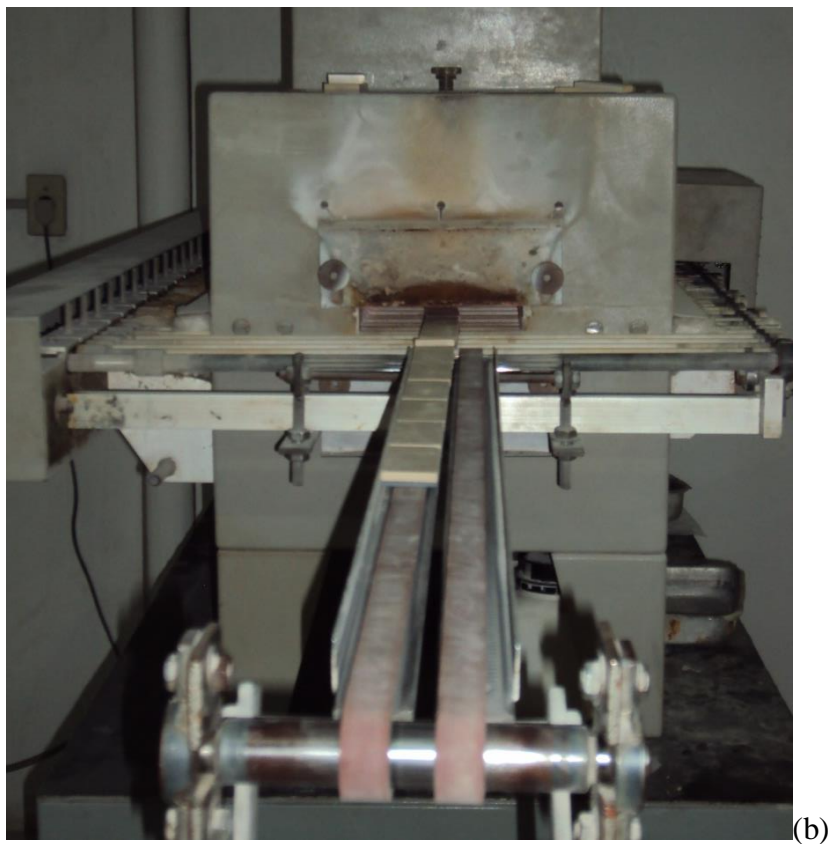


Figura 3.8 Forno a Rolo Laboratorial (DETEC). (a) vista geral (b) destaque da entrada dos corpos no túnel de queima.



### 3.6 Caracterização dos corpos de prova

#### 3.6.1 Expansão após prensagem

O objetivo deste ensaio é determinar o aumento dimensional que o corpo experimenta em função do alívio da tensão provocada pela compactação. Para sua determinação o corpo foi retirado da prensa e submetido à limpeza de rebarbas com uma flanela macia. Efetuou-se a medição na maior longitude com um paquímetro de 0,05 mm de resolução. O cálculo da expansão segue na equação 5.

$$EXP = \frac{Lb - Lc}{Lc} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: EXP: Expansão pós-prensagem (%)

Lb: medida da peça (mm)

Lc: medida da cavidade (mm)

#### 3.6.2 Retração de secagem

O objetivo é determinar o quanto o corpo reduz de tamanho após a secagem. É determinada conforme descrito na sequência. Os corpos de prova ficaram na estufa, por no mínimo 24 h ou até obter massa constante. Após a redução da temperatura dos corpos de prova são determinadas suas dimensões com paquímetro com resolução de 0,05 mm. O valor da retração de secagem foi calculado pela equação 6.

$$RS = \frac{Li - Lf}{Li} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 6}$$

Sendo: Li: comprimento inicial pós-prensagem (mm)

Lf: comprimento final pós-secagem (mm)

RS: retração de secagem (%)

#### 3.6.3 Densidade aparente a seco

O ensaio determina a densidade do corpo conformado e seco em estufa. Para a determinação da densidade aparente das peças cerâmicas foi utilizado um aparelho (figura 3.9) e cujo método se baseia no empuxo que a peça experimenta quando imersa em mercúrio. O aparelho consiste em um recipiente contendo mercúrio, uma balança digital

com incremento de 0,01 g e um conjunto de hastes metálicas com função de imergir a peça. Primeiro obtém-se a massa dos corpos de prova. Depois o recipiente contendo o mercúrio foi colocado sobre a balança, e descontado sua massa (tarando a balança). Então os corpos de prova foram colocados dentro deste recipiente e com o auxílio das hastes metálicas, foram forçados a imergir no mercúrio, o que gerou uma massa, devidamente anotado. Com a equação 7 calculou-se a densidade aparente dos corpo de prova. O valor da densidade do mercúrio no cálculo foi de acordo com a temperatura em que o ensaio foi realizado.



Figura 3.9 Equipamento utilizado para a realização da densidade aparente.

$$d_{Ap} = \frac{m_{CP}}{m_E} \cdot d_{Hg} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:  $d_{Ap}$  : densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

$m_{CP}$  : massa do corpo de prova (g)

$m_E$  : massa do corpo sob imersão (empuxo) (g)

$d_{Hg}$  : densidade do mercúrio ( $\text{g/cm}^3$ )

#### 3.6.4 Perda ao fogo

O objetivo desse ensaio é determinar a perda de massa de material sob a forma de gás durante as etapas de aquecimento e queima. Utiliza-se uma balança de resolução mínima 0,01 g. Com o corpo de prova ao término da etapa de secagem se obtém a massa.

O corpo segue para a queima e após esfriarem se obtém a nova massa. O valor em porcentagem é obtido pela equação 8.

$$PF = \frac{Pi - Pf}{Pi} .100\% \quad \text{Equação 8}$$

Sendo: PF: perda ao fogo (%)

Pi: massa inicial (g)

Pf: massa final (g)

### 3.6.5 Absorção de água

A capacidade de absorção de água de um revestimento cerâmico fornece um indicativo da porosidade aberta do produto; ou seja, o volume total de poros comunicados com o exterior e susceptíveis de serem preenchidos com um fluido a pressão atmosférica. Um alto valor de absorção de água corresponde a uma estrutura porosa, enquanto que um corpo compacto possui uma baixa absorção de água. O valor de absorção de água é expresso em porcentagem. Expressa o aumento de massa do produto em relação a sua massa seca quando submetido a um processo normalizado de imersão em água fervente por duas horas. A absorção de água (ABS) é expressa percentualmente pela equação 9

$$ABS = \frac{m_2 - m_1}{m_1} .100 \quad \text{Equação 9}$$

Sendo: ABS: absorção de água (%)

$m_1$ : massa do corpo de prova seco (g)

$m_2$ : massa do corpo de prova úmido ou umedecido (g)

De acordo com o valor obtido da absorção de água, o produto é classificado em cinco categorias conforme a norma ABNT NBR 13817, os quais estão indicados na tabela 3.1. Todo o porcelanato deve estar no grupo Ia.

Tabela 3.1 Classificação de cerâmica em relação à absorção de água (NBR 13817).

<b>GRUPOS</b>	<b>ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)</b>
Ia	$0 < ABS \leq 0,5$
Ib	$ABS \leq 3,0$
IIa	$3,0 < ABS \leq 6,0$
IIb	$6,0 < ABS \leq 10,0$
III	$ABS > 10,0$

### 3.6.6 Índice de deformação pirolástica

Piroplasticidade ou deformação pirolástica é uma característica física e química das matérias-primas do corpo em análise. Este ensaio visa determinar o índice de deformação sofrida pelo corpo de prova pela ação da força da gravidade durante o processo de queima. Essa informação é muito importante porque a deformação sofrida pelo corpo é irreversível.

Este ensaio é realizado com o corpo de prova repousando longitudinalmente sobre dois cutelos de material refratário e submetido à queima. As dimensões e carregamento do corpo sobre os apoios dependem da necessidade a ser avaliada. Neste estudo foram utilizados os corpos de prova prismáticos padrão do estudo (80x20x5) mm<sup>3</sup>. O valor da deformação é medido através do índice de deformação pirolástica, que é obtido pela equação 10. As medidas “L”, “h” e “s” estão identificadas na figura 3.10 e obtidas por paquímetro com resolução de 0,05 mm.

$$IP = \frac{(4h^2 \cdot s)}{(3L^4)} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo: IP: Índice de deformação pirolástica (cm<sup>-1</sup>)

h: espessura do corpo de prova (cm)

s: flecha de deformação (cm)

L: distância entre os apoios, maior dimensão do corpo de prova (cm)

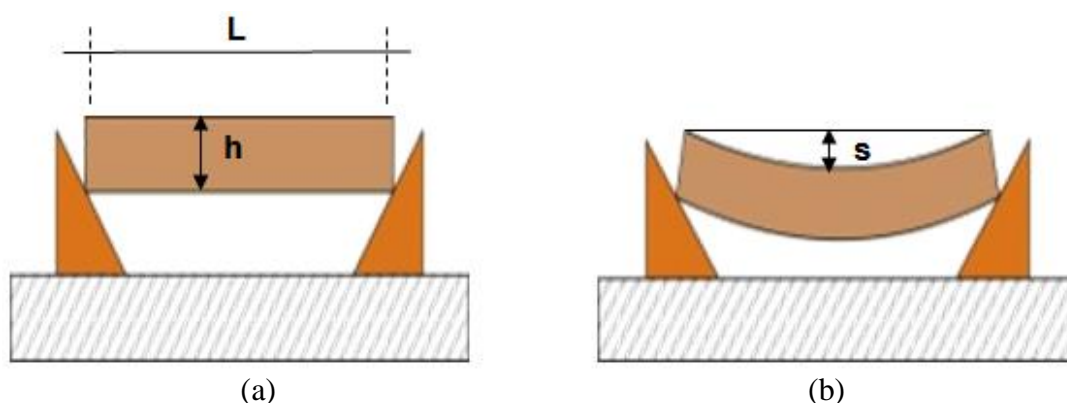


Figura 3.10 Demonstração do CP sobre os cutelos durante o Ensaio de Deformação Pirolástica (a) Antes da queima e (b) Depois da queima

### 3.6.7 Resistência mecânica à flexão

Este ensaio é realizado após a queima dos corpos de prova. O resultado encontrado é uma característica do material e não da placa cerâmica. O valor obtido propicia a medida da coesão interna do material. O procedimento foi realizado conforme a norma ABNT-NBR 13818 que descreve o ensaio de flexão em três pontos para avaliar a resistência mecânica das placas cerâmicas. Para a execução utilizou-se o equipamento Crômetro Gabrielli. Para determinação do valor da resistência mecânica à flexão do material, utilizou-se a equação 11.

$$RMF = \frac{3.F.L}{2b.(e_{\min})^2} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo: RMF = Resistência Mecânica à Flexão (MPa)

F = Força de ruptura (N)

$e_{\min}$  = mínima espessura do corpo de prova, medida na seção ruptura (mm)

L = distância entre as barras de apoio (mm)

b = largura do corpo de prova ao longo da ruptura após ensaio (mm)

### 3.6.8 Resistência mecânica ao impacto

Ensaio baseado na norma ABNT- NBR 9564 – Plásticos Rígidos, Determinação da resistência ao Impacto Charpy, utilizando o equipamento de Impacto Charpy AIC – 3. O ensaio foi assim realizado por não existir padronização específica para a cerâmica e neste caso a análise dos resultados foi feita por comparação. O valor obtido representa a energia gravitacional do pêndulo em queda absorvido pelo corpo em teste por metro. O sentido do impacto no corpo de prova está representado na figura 3.11.

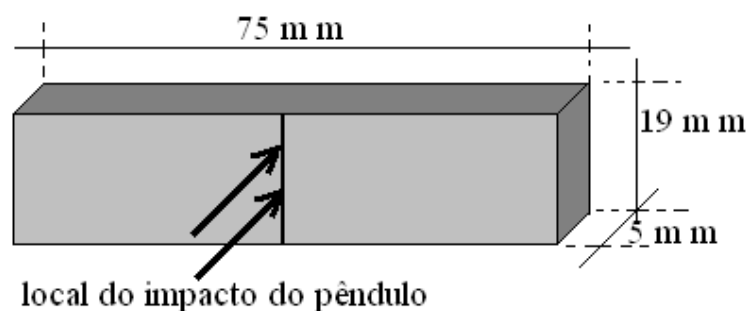


Figura 3.11 Representa o CP e as setas identificam o local onde o pêndulo colide.

Este ensaio foi realizado no SENAI-Criciúma/SC sob a responsabilidade de técnico habilitado a função. A escolha da energia do pêndulo foi de 1 J e ocorreu após pré-testes. A figura 3.12 mostra um CP posicionado para a realização do ensaio.



Figura 3.12 Equipamento utilizado para o ensaio

### 3.6.9 Resistência mecânica à tração

A facilidade de realizar e interpretar os resultados de resistência mecânica à tração faz do ensaio de tração o mais importante para se conhecer o comportamento dos metais. O ensaio consiste em aplicar uma força de tração normal a seção transversal do corpo de prova e coincidente com o seu eixo longitudinal. A tensão média de tração produzida no corpo de prova é dada pela equação 12. (SOUZA-1982)

$$\sigma = \frac{Q}{S_0} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:  $\sigma$  = Tensão de tração (Pa)

$Q$  = Força de tração aplicada ao corpo (N)

$S_0$  = área da seção transversal do corpo ( $m^2$ )

Neste estudo foram realizados dois tipos de ensaio de tração. Primeiro com os fios que seriam utilizados como reforço. Esse foi realizado no SENAI – Criciúma/SC, na máquina Emic DL2000 utilizando o método de tração para metais de secção transversal circular com 10 mm/min de velocidade. As amostras, que são “cordas de violão” possuem diâmetro de 0,27 mm medidas em micrômetro com precisão de  $\pm 0,01$  mm. Foi necessária a utilização de um dispositivo para fixação da corda no equipamento. O ensaio foi realizado até a ruptura. Segundo com os corpos de cermetos que, após a ruptura no ensaio de resistência a flexão, ficou unido pelos fios. O último ensaio foi realizado com o propósito de verificar o comportamento do fio após o processo de queima, se o fio iria se romper ou ser arrancado do corpo de prova.

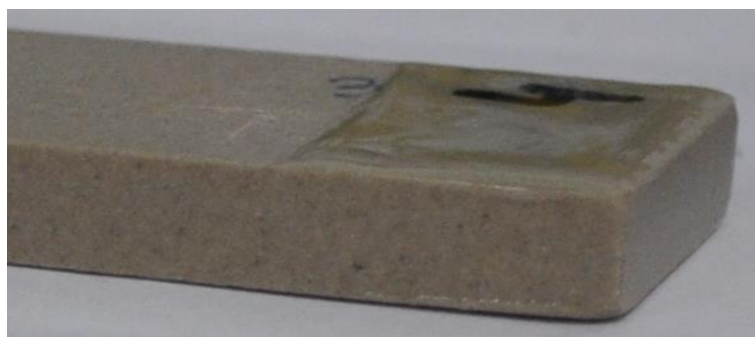


Figura 3.13 Corpo de prova com capa nas extremidades para o ensaio de tração

Num pré-teste a garra da máquina não conseguia prender os corpos de cermetos, pois por falta de atrito deslizava. Para solucionar o problema as extremidades foram cobertas por uma camada de material colante (figura 3.13). O pré-teste foi refeito e aprovado pelo laboratorista.

#### 3.6.10 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A técnica de caracterização mais comum para determinar a morfologia da superfície das amostras é a microscopia eletrônica de varredura (SHAN 2010). Ela permite a observação e a caracterização de materiais heterogêneos, orgânicos e inorgânicos, numa escala nanométrica ou micrométrica. As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitem observar a granulometria e a morfologia dos pós, possibilitando estimar sua área superficial específica. De acordo com a bibliografia (LACEY 2008 e MOURÃO 2009) a atividade fotocatalítica de um pó é tanto mais elevada quanto maior for a sua área superficial específica. Foi preparado um corpo de cada tipo de

cermetos para a realização do MEV no equipamento PHILIPS modelo XL 30. Os corpos foram cortados transversalmente expondo todos os fios de reforço com o intuito de analisar a cerâmica, os fios e a superfície entre os dois materiais. As amostras foram revestidas com ouro.

#### 3.6.11 Metalografia

A análise foi realizada em dois laboratórios, um pertencente a uma Siderúrgica e outro a uma faculdade. A amostra foi atacada com nital 2% por 24 horas não ocorrendo a reação. Nital é uma solução de álcool e ácido nítrico utilizado para a rotina de caracterização de metais. É o reagente apropriado para revelar a microestrutura de aços de carbono. O resultado ocorreu atacando a amostra com vilella durante 12 segundos.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do porcelanato

Foram analisados 12 corpos-de-prova de porcelanato para cada ensaio citado abaixo. Os resultados estão expostos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultados de caracterizações para CP de porcelanato

	<b>Expansão após prensagem (%)</b>	<b>Retração após secagem (%)</b>	<b>Retração de queima (%)</b>	<b>Perda ao fogo (%)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Média	0,75	0,80	7,10	6,10	0,1800
Desvio padrão	0,04	0,06	0,10	0,15	0,0012

Todos os resultados estão dentro do esperado para uma massa de porcelanato. O resultado de retração de queima confirmou que o dimensionamento dos fios para que ficassem internas no corpo de prova de cermeto foi satisfatório.

### 4.2 Caracterização dos cermetos

Foram utilizados 12 corpos de prova com 5 fios para analisar a expansão após prensagem, retração de queima, absorção de água e perda ao fogo. Os resultados estão na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Resultados de caracterização para CP com 5 fios

	<b>Expansão após prensagem (%)</b>	<b>Retração após secagem (%)</b>	<b>Retração de queima (%)</b>	<b>Perda ao fogo (%)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Média	0,66	0,01	3,76	5,35	0,30
Desvio padrão	0,03	0,01	0,24	0,16	0,01

Observa-se que a expansão após prensagem ficou com valores inferiores, mas próximos dos corpos de porcelanato. A redução pode ser resultado da aderência do pó atomizado ao redor do fio após a conformação impedindo sua expansão.

A retração após a secagem foi inferior ao comparado aos corpos de porcelanato. Como ocorreu uma pequena expansão após a prensagem, por consequência os corpos retraíram menos ao término da secagem. Nessas etapas iniciais de preparação dos corpos de prova, já se percebe a interferência do fio nas variações de dimensões e de massa.

Sobre a retração de queima os valores obtidos foram menores em relação os corpos de porcelanato. Neste caso, pode-se avaliar que os fios durante a queima mantiveram seus comprimentos fazendo com que a massa de porcelanato depositada ao redor deles mantivesse o formato reduzindo as variações dimensionais dos corpos-de-prova.

Em relação a perda ao fogo houve uma redução de 0,75% dos corpos de porcelanato para os corpos com os fios. Significa que a matriz do compósito (porcelanato) perde mais massa que os fios durante a queima, assim o reforço diminuiu a perda de massa durante a queima.

A absorção de água aumentou, valor que pode ser atribuído ao comportamento diferente dos dois materiais durante a queima, podendo ter gerado pequenos vazios entre os fios e a cerâmica. Mas o valor ficou inferior a 0,5%, necessário para que a cerâmica, matriz desse compósito, continuasse a receber a classificação de porcelanato. Essa vantagem agrega maior valor comercial ao produto que é reconhecido por sua baixa absorção de água se igualando as pedras naturais.

#### 4.3 Densidade aparente a seco

A Figura 4.1 apresenta os resultados de densidade aparente a seco em função do número de fios. Observa-se um aumento na densidade aparente proporcional ao número de fios. Este comportamento é esperado, uma vez que a densidade dos fios é de  $7847 \text{ kg/m}^3$  enquanto a densidade do material cerâmico compactado foi de  $1938 \text{ kg/m}^3$ . A linha de tendência mostrada no gráfico corresponde a estimativa teórica dos valores de densidade aparente. Observa-se que a presença dos fios não alterou a compactação da matriz cerâmica, caso contrário os resultados não se comportariam conforme a previsão.

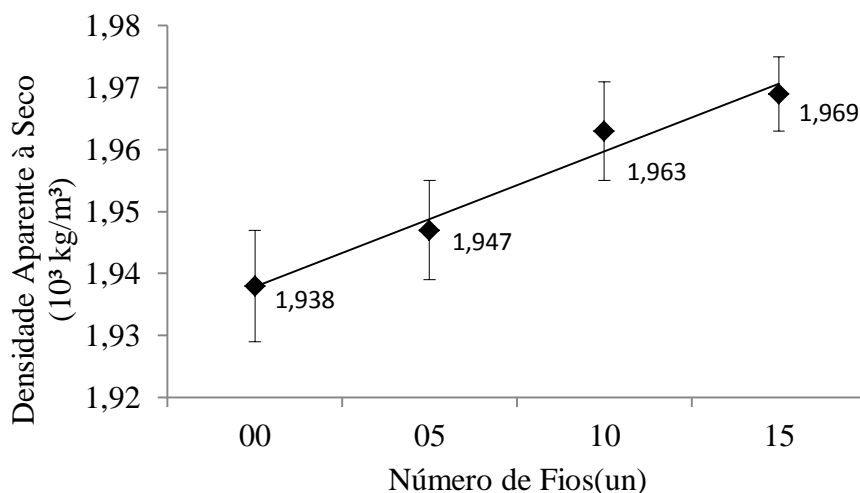


Figura 4.1 Densidade Aparente a Seco em função da quantidade de fios.

#### 4.4 Índice de Deformação Piroplástica

A Figura 4.2 apresenta os resultados de índice de deformação piroplástica em função do número de fios. Observa-se uma redução significativa na deformação piroplástica proporcional à quantidade de fios. A redução obtida em relação ao porcelanato foi de: 16,22% para os corpos com 5 fios, 47,61% para os corpos de 10 fios e de 61,07% para os corpos de 15 fios. Era esperada uma redução, mas os resultados foram satisfatórios, superando as expectativas. Isso significa que durante o ciclo da queima os fios mantiveram seu formato e certa rigidez, o suficiente para dar sustentabilidade para o porcelanato.

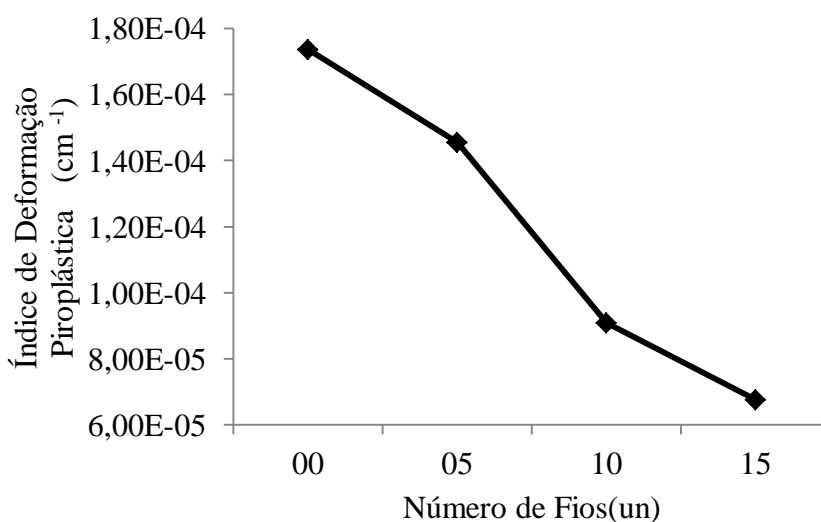


Figura 4.2 Resultados do Índice de Deformação Piroplástica.

Fotografias dos corpos de prova ilustram o resultado visual na Figura 4.3. Durante o ensaio o corpo de prova se comporta como uma viga bi apoiada de secção transversal retangular e seu peso próprio atua como uma carga distribuída. A linha longitudinal inferior é alongada se submetendo ao esforço de tração e a linha longitudinal superior é diminuída se submetendo ao esforço de compressão. A linha neutra é a região que separa a região tracionada da comprimida que neste caso fica na metade da altura. O ganho mais significativo foi observado nas montagens onde os fios não estavam posicionados na linha neutra da flexão, corpos com 10 fios. Havia fios para suportar os esforços de tração e de compressão.

O ganho observado de 0 para 5 fios foi semelhante ao observado de 10 para 15 fios, provavelmente por que em ambos os casos fios adicionais estavam posicionadas na altura da linha neutra da flexão.

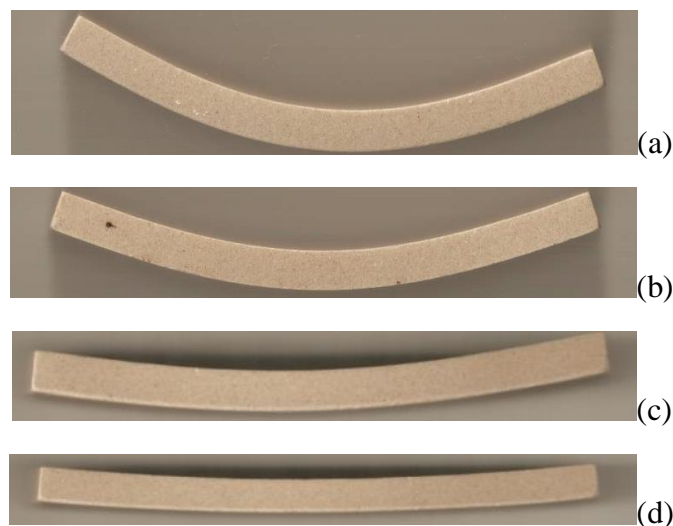


Figura 4.3 Corpos de prova após o ensaio de Deformação Piroplástica, (a) 0 fios, (b) 5 fios, (c) 10 fios, (d) 15 fios.

Esse resultado pode ser considerado um benefício ao porcelanato, pois possibilita a produção de peças grandes com espessura reduzida e conseqüentemente uma redução da massa das peças.

#### 4.5 Resistência mecânica à flexão

Os resultados de resistência mecânica à flexão em função do número de fios estão representados na figura 4.4 para os dois ciclos de queima. Os valores obtidos estão todos conforme o esperado. Na queima realizada no forno contínuo os resultados foram

melhores, que provavelmente é justificado por ter sido submetido a resfriamento rápido. O porcelanato desenvolve tensões residuais macroscópicas durante resfriamentos rápidos, típicos em processos industriais. Ao se aumentar o nível de tensões residuais macroscópicas de compressão na superfície, como consequência de resfriamento mais rápido na zona de comportamento viscoso da fase vítrea ( $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), aumenta-se a resistência mecânica do porcelanato, assim como ocorre em um processo de têmpera para vidros (DE NONI 2007).

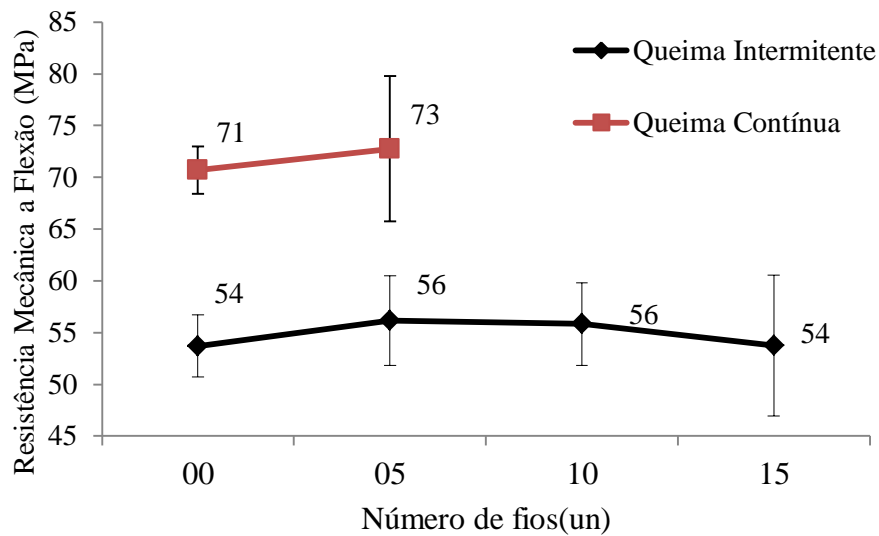


Figura 4.4 Resistência Mecânica à Flexão em função do número de fios.

Não se observou variação significativa em função da presença dos fios nos resultados. No ensaio de flexão, a carga máxima de tração, ocorre na superfície inferior do corpo de prova, local onde não há fios para eventualmente interferir no resultado. Para um incremento na resistência mecânica à flexão os fios deveriam ser dispostos em outra posição.

Todos os corpos com fios após o ensaio à flexão mantiveram o formato prismático original. Ao término do ensaio foi necessária uma avaliação minuciosa para encontrar a fissura da matriz do compósito (Figura 4.5). Resultado que demonstra a capacidade dos fios de inibir a propagação da fratura mantendo os fragmentos da matriz unidos. Os corpos de prova com fios após este ensaio foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica à tração.

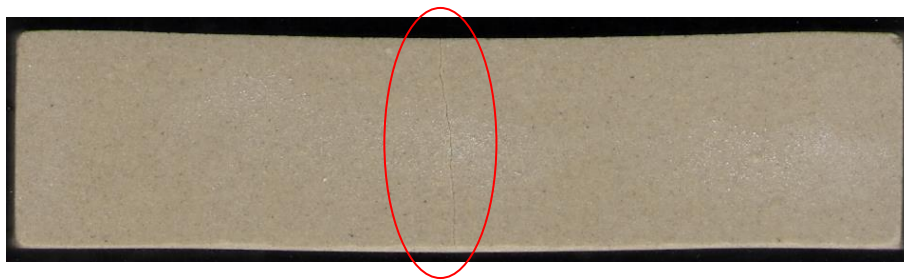


Figura 4.5 Corpo de prova após o ensaio de resistência mecânica à flexão com a fratura identificada.

#### 4.6 Resistência mecânica ao impacto

Os resultados da resistência ao impacto estão representados na figura 4.6 para os dois ciclos de queima realizados. Verifica-se que conforme aumenta o número de fios, há um aumento gradativo em sua resistência mecânica ao impacto. No entanto esse ganho não é linear como poderia ser esperado. A razão entre o incremento da resistência ao impacto pelo número de fios diminui com o aumento do seu número na matriz. Os fios se oxidaram durante a queima proporcionando este resultado. Quanto maior a quantidade de fios no corpo de prova, maior a sua proximidade com o meio externo se expondo a oxidação.

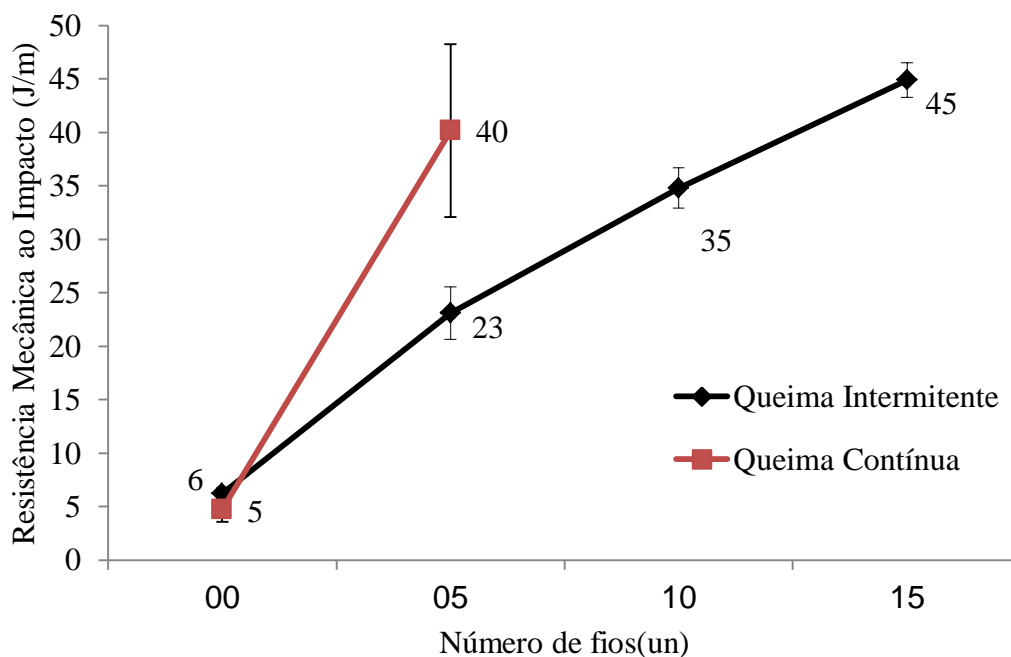


Figura 4.6 Resistência Mecânica ao Impacto em função do número de fios

O resultado obtido para os corpos de prova com 5 fios queimados em forno contínuo é superior ao resultado obtido com a queima intermitente. Comparando-se os dois casos, o incremento de resistência ao impacto por unidade de fio foi de 3,4 J/m, para a queima intermitente e 7,0 J/m para a queima rápida. Neste estudo os valores obtidos com a queima contínua demonstraram um ganho de aproximadamente 8 vezes.

A figura 4.7 exibe um corpo de prova em duas posições após esse ensaio. Percebe-se que próximo à fratura principal existe outra fratura da matriz do compósito e o fio manteve os fragmentos unidos. A propagação da fratura principal foi dificultada pelos fios que teve que procurar outros pontos para propagar. Na mesma figura é possível ver que os fios se rompem aleatoriamente das duas extremidades e não são arrancadas.

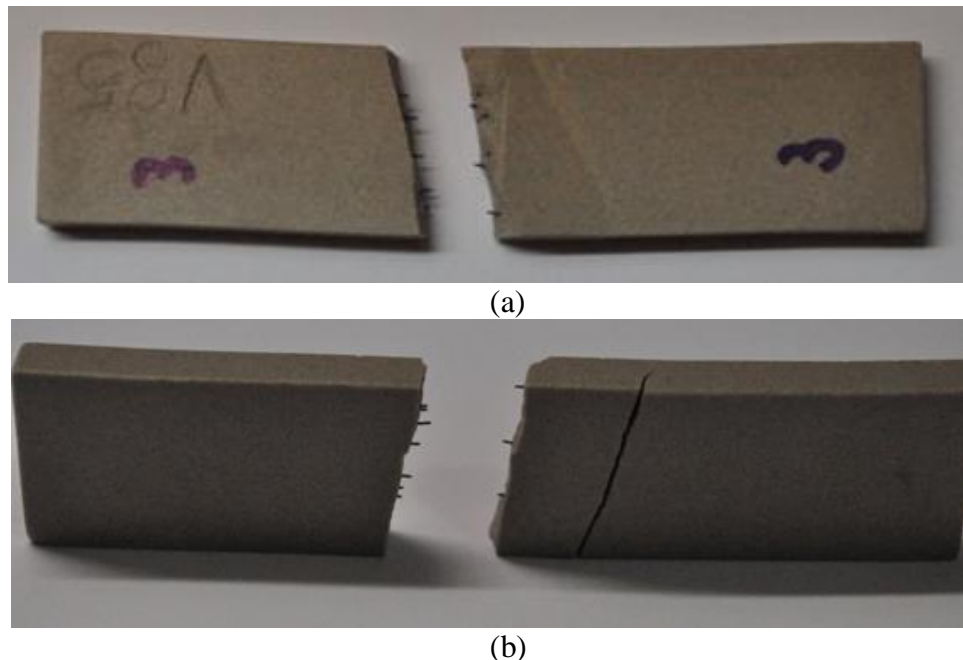


Figura 4.7 Imagem do corpo de prova após o ensaio de impacto. (a) vista superior, (b) vista inferior

#### 4.7 Resistência mecânica à tração do fio

A corda suportou: força máxima média de 124,61 N, tensão máxima média de 2024 MPa, tensão no escoamento média de 1453,17 MPa e módulo de elasticidade de 227,6 GPa. A curva tensão *versus* deformação obtida, para cada corpo de prova do fio considerado, está representada na figura 4.8 com os valores sobrepostos para melhor análise.

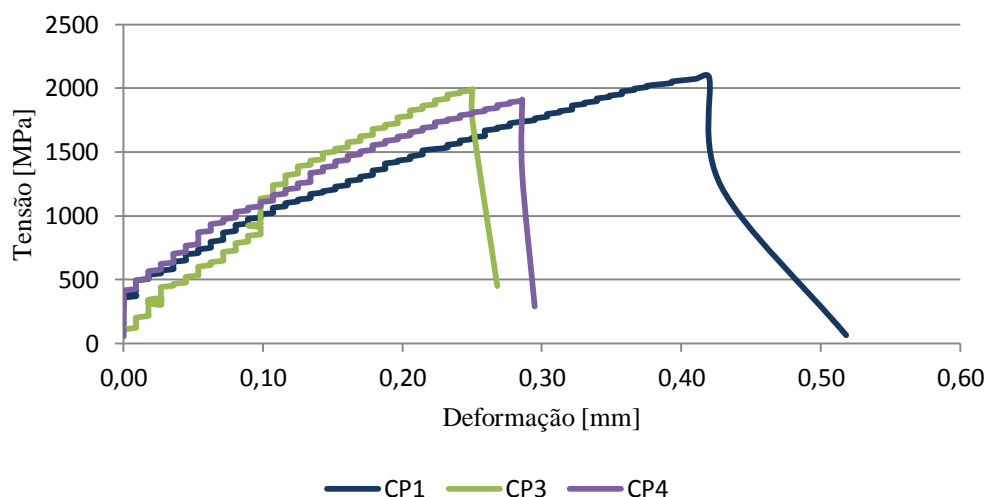


Figura 4.8 Curva tensão *versus* deformação do ensaio de tração dos fios utilizadas como reforço.

A curva obtida do ensaio demonstra que o fio possui alta resistência à tração, ao mesmo tempo indica um metal pouco dúctil, fato verificado por não apresentar uma região de escoamento característica de materiais dúcteis. Foram valores esperados por se tratar de “fio de música”. A característica de pouca deformação antes da ruptura é uma exigência para a utilização projetada desse tipo de fio.

#### 4.8 Resistência mecânica à tração dos corpos de prova de cermetos

Os corpos de prova que foram ensaiados a flexão a três pontos foram submetidos à tração. Como a matriz do compósito estava fraturada, esta análise foi só dos fios. A figura 4.9 mostra um corpo de prova no equipamento durante o ensaio de tração dos cermetos.

Foram submetidos ao ensaio quatro corpos de prova de cada configuração de fios (5, 10 e 15 fios). Durante o ensaio foi possível ver o rompimento de cada fio com nitidez para os corpos com 5 fios e 10 fios. Nos corpos com 15 fios o intervalo de tempo entre o rompimento de um e outro fio foi muito pequeno diminuindo a nitidez para a visualização do observador. Em todos eles o rompimento do fio foi aleatório, como resultado em cada parte do corpo de prova observaram-se pontas de fio e furos. Este fato demonstra que não ocorreu uma tendência em particular.



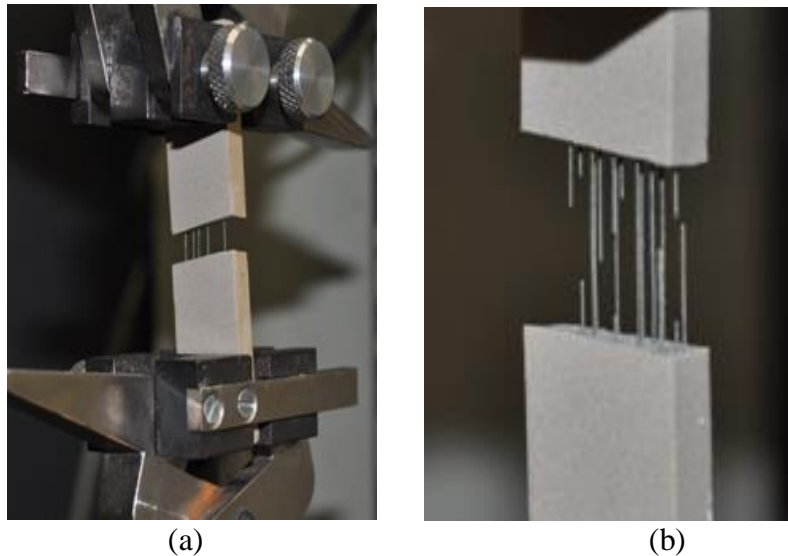


Figura 4.9 CP de cermetos durante o ensaio de tração. (a) CP de 5 fios, (b) CP de 15 fios.

Para o cálculo da tensão foi utilizada a área do fio antes da preparação dos corpos de prova. Com os dados agrupados obteve-se o diagrama tensão *versus* deformação dos corpos de cermetos para cada configuração.

A figura 4.10 exhibe as curvas obtidas para os corpos com 5 fios. Esse resultado possibilita ver que os corpos de prova 2 e 4 expressaram de forma nítidas o rompimento de cada fio e as variações de alturas dos patamares possuem valores próximos. Significa que cada fio precisou valores de força próximos entre si para o rompimento. Os corpos 1 e 3 atingiram uma tensão última maior, no entanto, foi identificado só o rompimento do primeiro fio. Nesse caso ocorreu uma mistura de deslizamento dos fios em relação a matriz de porcelanato com posterior rompimento de cada fio.

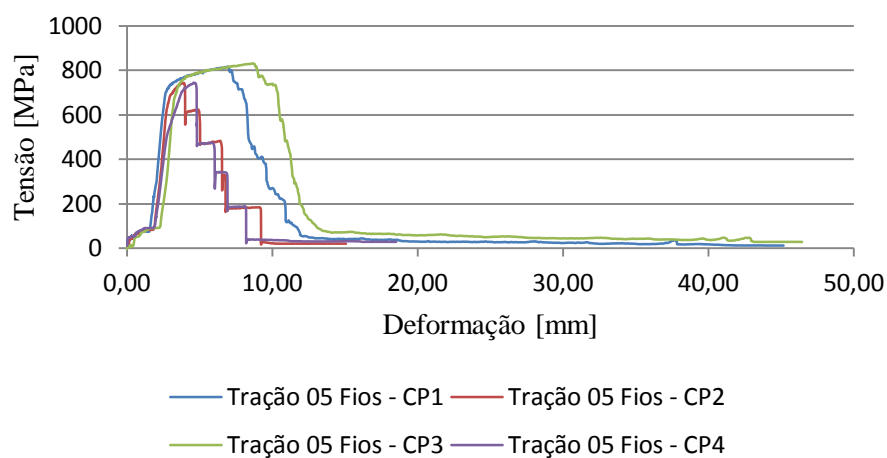


Figura 4.10 Curva tensão x deformação dos corpos de prova com 5 fios

A curva tensão *versus* deformação para os corpos com 10 fios está apresentada na figura 4.11. Neste caso ainda é possível identificar o rompimento individual de fios e em algumas situações o rompimento simultâneo de dois fios. A curva dos corpos 1 e 3 permite verificar que ocorrem alguns deslizamentos do fio antes do seu rompimento.

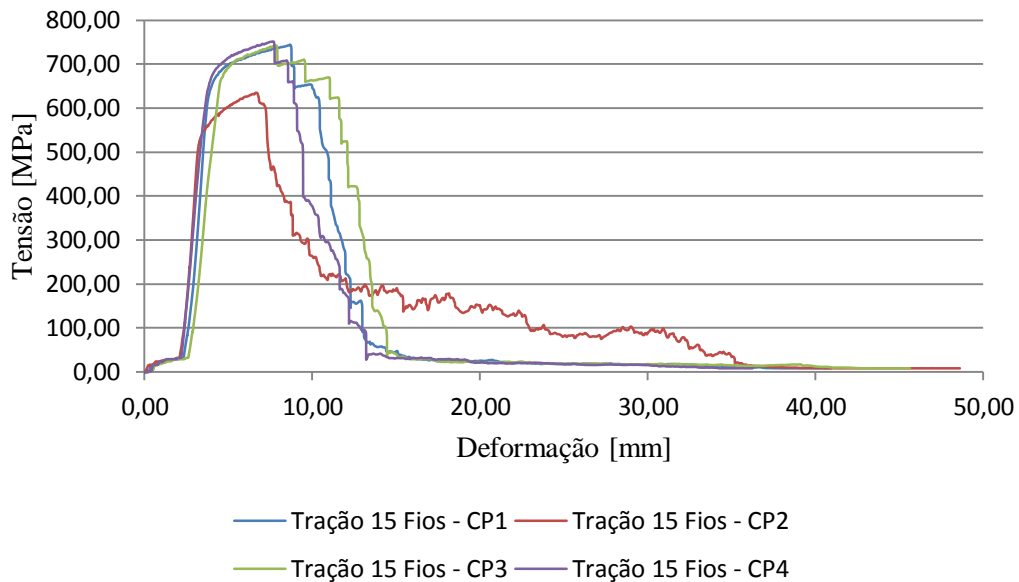


Figura 4.11 Curva tensão x deformação dos corpos de prova com 10 fios

A figura 4.12 mostra a curva tensão *versus* deformação para os corpos de prova com 15 fios. O rompimento do primeiro fio ficou bem definido, no entanto prevaleceu à indeterminação entre rompimento e deslizamento dos fios seguintes. A quantidade maior de fios contribuiu para esse comportamento.

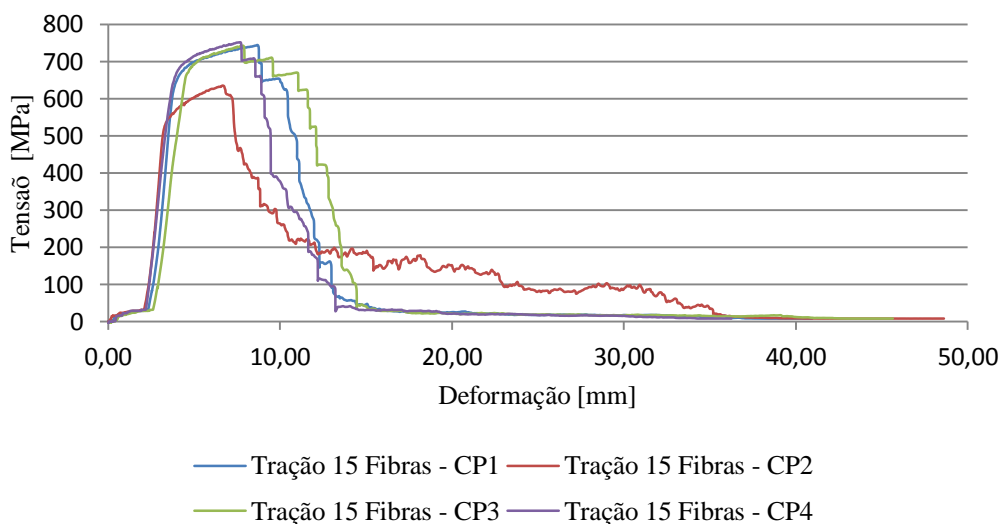


Figura 4.12 Curva tensão x deformação dos corpos-de-prova com 15 fios.

A comparação da força aplicada para as três situações descrita evidência que: a força média obtida para os corpos de 5 fios em uma camada foi de 224,44 N, para os corpos de 10 fios em duas camadas de 432,55 N e para os corpos de 15 fios em três camadas de 616,91 N. Verifica-se que comparativamente corpos de prova de uma camada para duas camadas, o número de fios aumentaram em 100 % e a força aumenta em 92,3% e de duas camadas para três camadas o número de fios aumentaram em 50% e a força em 42,6%. Percebe-se que o aumento da força foi proporcional a quantidade dos fios. Quanto mais próxima da superfície os fios estavam no interior da matriz, mais eles ficavam expostos a atmosfera interna do forno, provocando danos as suas propriedades mecânicas. Esse fato pode explicar a pequena redução na proporcionalidade entre número de fios e força verificada.

Tabela 4.3 Média das forças máximas por fio

<b>Condições do fio</b>	<b>Força média por fio [N]</b>	<b>%</b>
Antes da queima	124,61	100,00
CP com 5 fios	44,888	36,02
CP com 10 fios	43,255	34,71
CP com 15 fios	42,620	34,20

A análise comparativa das curvas de tensão *versus* deformação entre o fio e os corpos de prova com fios, evidencia um comportamento de mais frágil para dúctil. Na queima o fio sofreu um amolecimento e conseqüentemente uma recristalização do material o que justifica a alteração. A recristalização é um processo de crescimento de novos cristais a partir de cristais previamente existentes.

#### 4.9 Análise da superfície da fratura

A fratura dos corpos após o ensaio de resistência mecânica ao impacto foi analisada em microscópio. Tem-se imagem de corpos com 5, 10 e 15 fios na figura 4.13. Entre o reforço e a matriz do compósito surgiu uma pequena folga, que pode ser atribuída como conseqüência do impacto sofrido durante o ensaio de Charpy. A matriz do compósito manteve a aparência do porcelanato sem interferência do fio exceto na superfície de contato entre o fio e o porcelanato, que apresentou certa oxidação, situação já esperada. O

comportamento dúctil do fio pode ser verificado pela forma da região fraturada em copocone, confirmando a alteração que o fio sofreu.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13 Imagens da superfície de fratura. (a) CP de 5 fios, (b) CP de 10 fios e (c) CP de 15 fios.

Na imagem longitudinal do fio (figura 4.14) também se visualiza a fratura dúctil. A superfície da cerâmica se apresenta conforme esperada em relação a sua microestrutura.

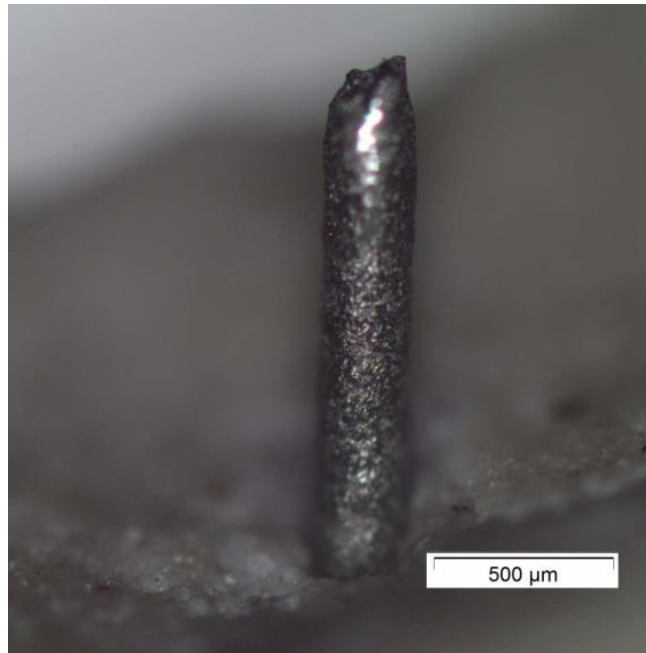


Figura 4.14 Imagem do fio no sentido longitudinal

#### 4.10 Microscopia Eletrônica de Varredura

Este ensaio foi realizado no SENAI – Criciúma/SC. Foram analisadas as seções transversais cortadas dos compósitos com 5, 10 e 15 fios. Optou-se por analisar também uma superfície transversal da fratura obtida após o ensaio de impacto. Com as amostras limpas, as mesmas são preparadas para a análise. Por se tratar de um material compósito com as duas fases bem distintas, durante o ensaio foi necessário optar em obter imagem para cerâmica e posteriormente para o aço.

As imagens dos corpos de prova na seção após o corte estão na figura 4.15. Essas imagens permitem analisar que a distribuição dos fios na altura do corpo de prova ficou praticamente simétrica, o mesmo não ocorreu no sentido transversal. As camadas do pó foram depositadas por quantidade de massa. A distribuição transversal foi manual e ao receber a camada de pó se verifica que ocorreu deslocamento dos fios.

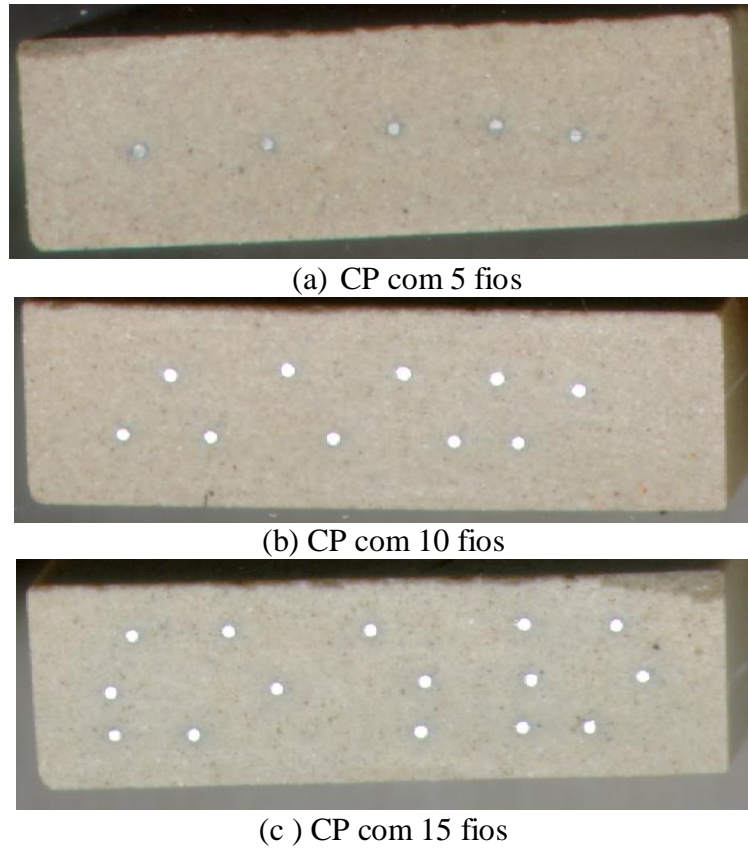


Figura 4.15 CP cortados na seção transversal

Através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi possível observar a microestrutura transversal das amostras. A figura 4.16 detalha uma sequência de micrografia. Em todas as imagens o fio possui ranhuras paralelas causadas pelo corte de preparação da amostra para essa análise. A superfície do porcelanato encontra-se uniforme e com alguns defeitos aceitáveis para esse tipo de produto. Na região das vizinhanças do reforço e matriz do compósito, o fio teve mais interferência na sua microestrutura apresentando pequenos vazios gerados pelos gases liberados durante a queima. Evidencia também, que o fio a sofreu uma recristalização na superfície e por consequência demonstrou que alterou sua característica para dúctil.

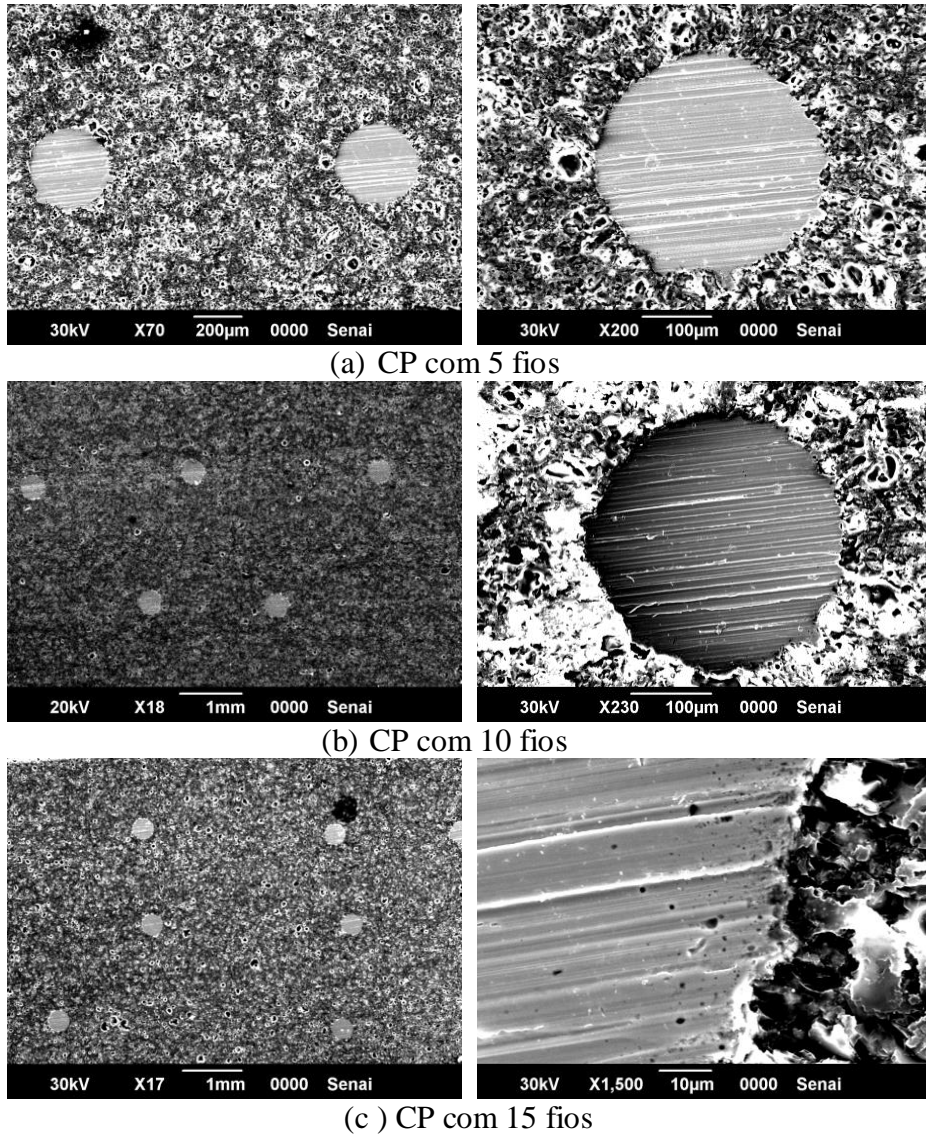


Figura 4.16 Imagens Obtidas por MEV

Também foi analisado por MEV uma das superfícies da fratura por Charpy conforme a figura 4.17. Essa imagem mostra detalhes do porcelanato evidenciando uma superfície de textura contínua. A ondulação da superfície é decorrente da fratura sofrida pelo pêndulo no ensaio de impacto, não apresentando nenhum indício de defeitos que possa ter direcionado a propagação da trinca.

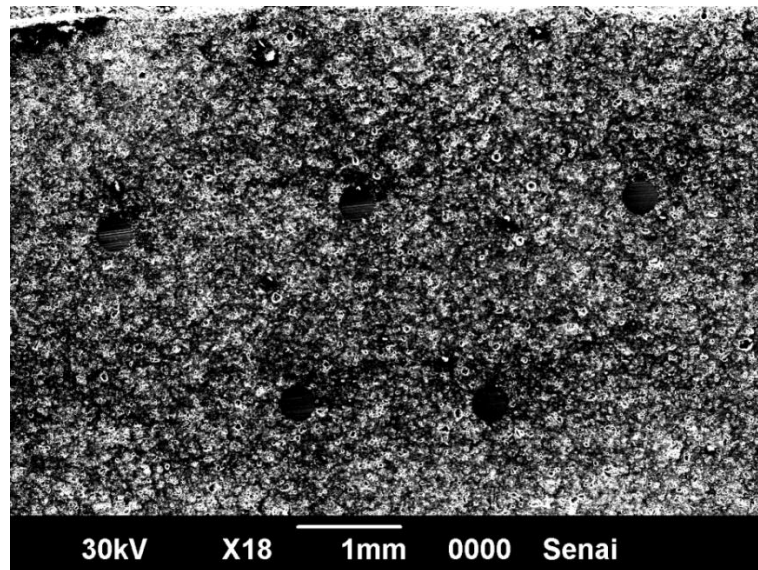


Figura 4.17 Imagem da superfície de fratura obtida por MEV

#### 4.11 Análise do fio

Foi realizada uma análise dos componentes químicos do fio durante o MEV. A região analisada foi o centro de um dos fios (figura 4.18).

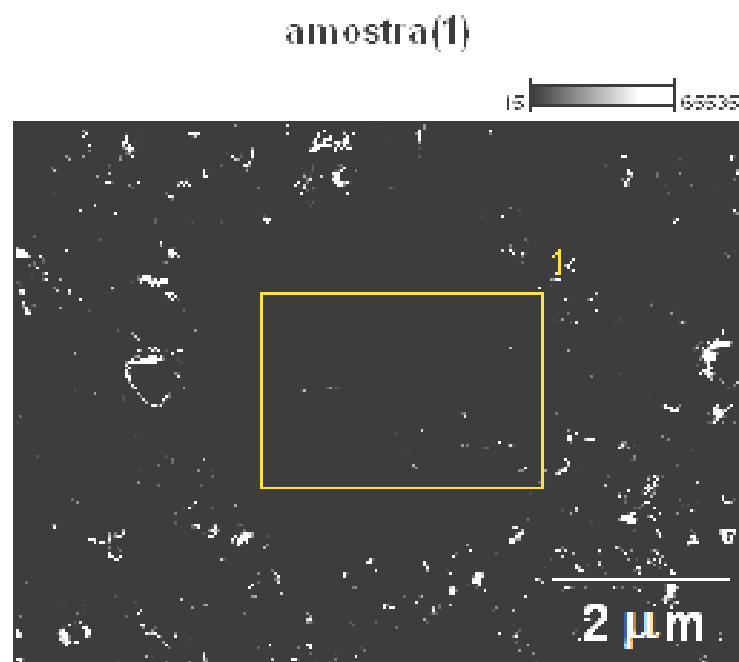


Figura 4.18 Imagem obtida por MEV do centro do fio



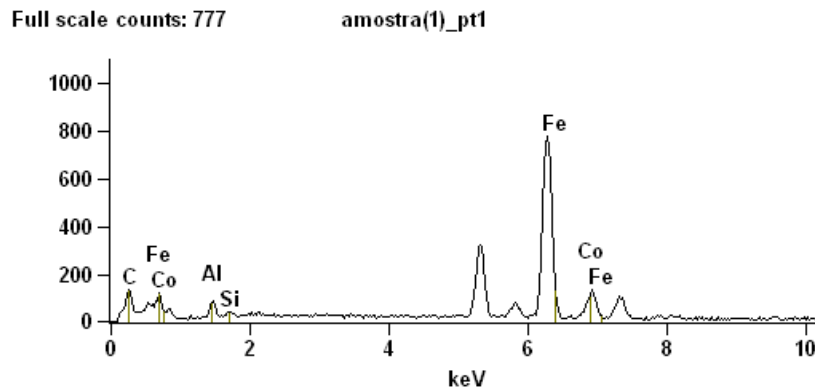


Figura 4.19 Difratoograma do fio.

A figura 4.19 representa o difratograma da composição química na amostra do fio. Os elementos encontrados foram: 27,58 % de Carbono, 1,46 % de alumínio, 0,29% silício, 54,52% de ferro e 15,85% de cobalto. A porcentagem elevada de carbono encontrada na amostra é resultado da queima a 1210 °C a que se submeteu o fio envolta no porcelanato.

#### 4.12 Metalografia

Revelou um contorno do grão poligonal indicando ser aço inoxidável austenítico. A figura 4.20 são as imagens obtidas nos testes realizados na siderúrgica SICAL e a figura 4.21 são as imagens dos testes realizados da faculdade SATC.

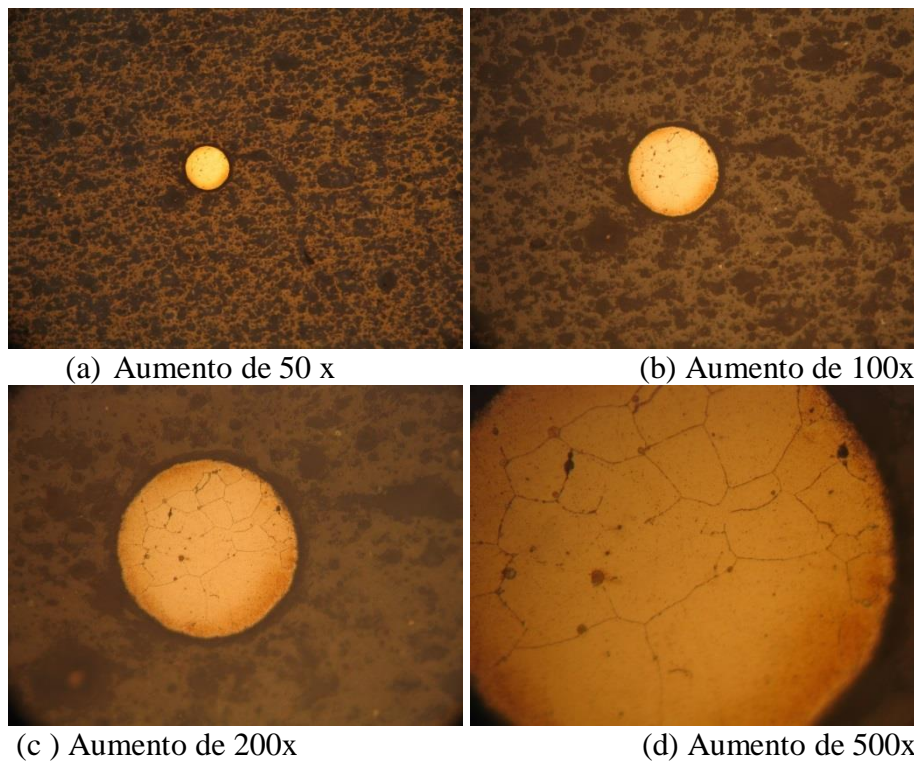


Figura 4.20 Metalografia obtida na siderúrgica SICAL

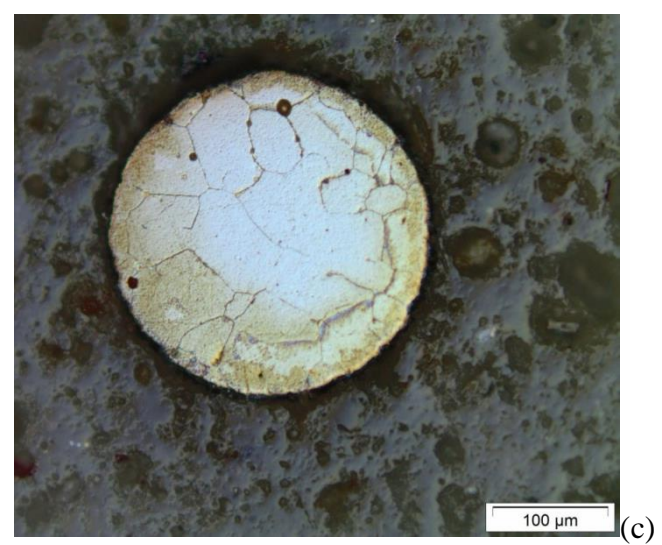
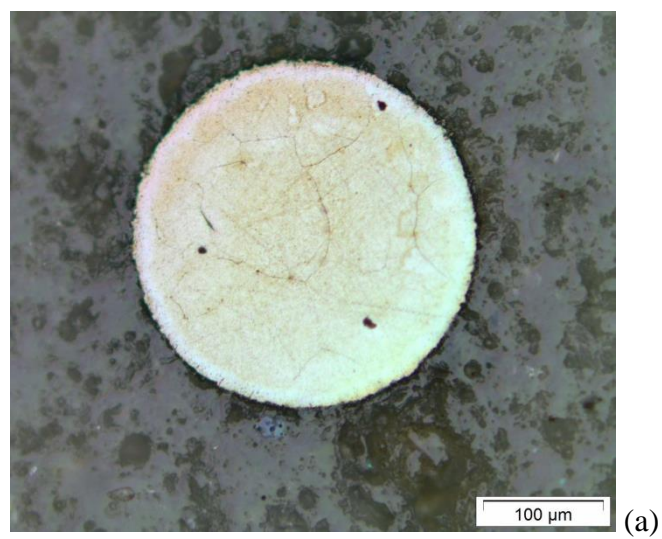


Figura 4.21 Metalografia obtida na faculdade SATC

A imagem 4.20(d) e a imagem 4.21(c) mostram com nitidez a forma poligonal do grão, característica de aço inoxidável austenítico. É possível verificar que entre o fio e a cerâmica aconteceram interações superficiais. A aderência do fio com a cerâmica demonstrada nos ensaios de impacto, resistência mecânica à flexão e resistência mecânica à tração é consequência das transformações ocorrida na face dos fios. Os dois materiais se entrelaçaram e criaram uma região de interação.

## 5. DISCUSSÃO GERAL

A matriz do compósito foi avaliada com as técnicas indicadas para porcelanato. Esses resultados serviram para fazer o comparativo entre as características necessárias de um porcelanato com as que foram desejadas para os cermetos.

As características dos corpos com fios a seco, mostrou que o fio impediu as flutuações de dimensões que ocorrem com a cerâmica após a prensagem e a secagem. Esse resultado indica uma aderência da massa atomizada com o fio e evidencia que não ocorreram vazios entre os elementos que constituem o material compósito. Esse resultado é confirmado com a densidade aparente dos corpos de prova a seco, porque o crescimento dos valores foi proporcional à quantidade de fios adicionados.

Após as queimas realizadas a 1210 °C os corpos de cermetos retraíram menos e perderam menos massa. Na queima, a matriz de cerâmica atingiu a fase vítrea perdendo mais massa e dimensões que os fios metálicos. A absorção de água dos cermetos aumentou um pouco mais, mas com valores que permanecem na classificação de porcelanato, reconhecidos por baixa absorção com valores inferiores a 0,5%. O aumento da absorção indica que surgiram vazios na interface do fio e da cerâmica após a queima.

Análise da deformação pirolástica resultou em bons resultados. Demonstrou que durante o processo de queima o fio se comportou como se fosse um esqueleto do corpo de prova, fornecendo sustentabilidade e inibindo uma deformação.

A resistência mecânica à flexão do cermeto manteve os valores esperados para um porcelanato. Essa é uma análise do material e não do formato do corpo de prova, portanto significa que o fio não diminuiu essa característica nobre do porcelanato. Outro dado relevante foi que o fio impediu a separação das partes do corpo após o ensaio.

Na análise da resistência ao impacto foram encontrados valores proporcionais à quantidade de fios. Considerando o corpo de porcelanato como referência (100%), o ganho

foi de 373%, 563% e 727% na resistência ao impacto para os corpos de prova com 5, 10 e 15 fios respectivamente. Esses valores na queima intermitente.

Foi realizado dois tipos de queima, uma contínua e outra intermitente. Na queima contínua os resultados quanto à resistência mecânica à flexão e ao impacto foram melhores. Provavelmente em função de ter sido submetido a resfriamento rápido, o que deve contribuir para a geração de tensões residuais de compressão na superfície do corpo, formando como se fosse uma casca envolta ao corpo (DE NONI 2007).

Na análise de resistência mecânica à tração os valores obtidos também foram proporcionais à quantidade de fios. Desta forma, nesse trabalho pode-se afirmar que as características de suportar o esforço de tração dos fios, se mantiveram nas três configurações. Já em relação ao fio antes da utilização no cermeto, ocorreu redução de 65% na capacidade de absorver o esforço de tração. Fato creditado a queima que foi submetida, numa temperatura de 1210 °C, provocando um amolecimento do material seguido de uma possível recristalização.

O fio confirmou a mudanças em suas características ao analisar a curva obtida por ensaio de tração, tensão *versus* deformação, comparando seus resultados antes e após a sua utilização. A curva representava uma fratura frágil e alterou para dúctil. Fato que também foi registrado nas imagens que evidência o rompimento do fio exibindo o formato copocone.

Nas imagens obtidas por metalografia é possível visualizar o contorno do grão do fio em forma poligonal. A superfície entre a matriz e o reforço do compósito demonstra interações entre os dois materiais. Fato que pode ser responsável também pela aderência entre matriz e fio. Essa aderência foi demonstrada no ensaio de tração, que mesmo que tenham ocorrido pequenos deslizamentos, terminava com o rompimento do fio.

## 6. CONCLUSÕES

Avaliou-se o comportamento das propriedades mecânicas dos corpos de prova de porcelanato sem fios e com 5, 10 e 15 fios de aço distribuídos em camadas. Com os resultados obtidos, comprovou-se por meio de avaliação e comparação que os fios metálicos são viáveis para incrementar algumas de suas propriedades físicas.

A presença dos fios manteve a característica do porcelanato quanto à absorção de água. A redução do índice de deformação piropelástica proporciona uma melhora substancial no desempenho do produto, inibindo a deformação na queima causada pela vitrificação do material cerâmico. Assim, a distribuição dos fios acima e abaixo da linha neutra de flexão da peça é a que proporciona menor deformação de 47,61 %. Os fios que ficaram mais internos ao corpo de prova sofreram menor oxidação, pois ficaram mais protegidas, pela camada de cerâmica, dos gases liberados durante a queima.

A existência dos fios modificou o comportamento da cerâmica analisada nos ensaios de flexão e impacto. No ensaio de flexão houve o rompimento da matriz do compósito, mas o fio uniu os fragmentos, mantendo a forma geométrica dos corpos de prova e o ensaio de impacto registrou a inibição da propagação da fratura. Esses dois fatos são importantes para a aplicação desse produto em fachadas e em outros locais expostos a fraturas acidentais que coloquem a uma situação de risco.

Com a queima realizada no ciclo rápido obteve-se melhores resultados quanto à resistência mecânica à flexão e a resistência mecânica ao impacto. A queima rápida oxidou menos os fios metálicos, proporcionando menores danos às suas propriedades mecânicas originais, mantendo uma fratura mais dúctil. Ocorreu um ganho de aproximadamente de 8 vezes na resistência ao impacto entre corpos sem fios e com 15 fios. Condição desejada neste trabalho, pois numa produção industrial a queima num ciclo rápido é mais prática e econômica.

O fio desempenhou a função do objetivo do estudo. Aconteceu interação com a matriz do compósito proporcionando certa aderência, que foi suficiente para reduzir seu deslizamento num esforço de tração. A distribuição escolhida para os fios foi eficiente para desempenhar seu principal papel, impedir a continuidade da fratura da matriz do compósito.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC - **Anuário brasileiro de cerâmica**, jun 1997.

ABCERAM – **Associação Brasileira de Cerâmica**. Disponível em: <http://www.abceram.org.br> acessado em: outubro de 2013.

ABNT NBR 15463:2007. **Placas Cerâmicas para Revestimento – Porcelanato**. 2007.

ANFACER. **Produção e consumo mundiais**. Disponível em: <<http://www.anfacer.com.br>> Acessado em: abril 2012.

AMORÓS ALBERO, J. L. **A operação de prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação industrial – Parte III: Variáveis do Processo de Compactação**. Cerâmica Industrial, v.6, n.1, Janeiro/fevereiro 2001

ASME, Handbook. **Metals Engineering Design** McGraw Hill, New York, 1953.

A.Y. Shan, T.I.M. Ghazi, S.A. Rashid. **Applied Catalysis A: General** 389 (2010) 1.

Barsa, Nova Enciclopédia. Volume 4. São Paulo: Encyclopaedia Britannica de Brasil Publicações, 1999.

BIFFI, Giovanni. **O grês porcelanato: Manual de fabricação e técnicas de emprego**. Faenza Editrice do Brasil Ltda. 1ª Edição em Português 2002

BEER, Ferdin and Pierre; JOHNSTON Jr, E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3ªEd. São Paulo: Makron Books, 1995. 1255p.

BERTO, Arnaldo Moreno. **Ceramic tiles: above and beyond traditional applications**. Instituto de Tecnología Cerámica. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas. UniversitatJaume I. Campus Universitario Riu Sec. 2006 Castellón. Spain

BOTTINO, M.C.; PAGANI, C.; MIRANDA, C.B. **Avaliação da tenacidade: A fratura de diferentes sistemas cerâmicos**. J. Appl. Oral Sei; 11(1), p. 69-75, jan/mar. 2003.

BRESCIANI A., RICCI C. **Compactación Continua De Placas Cerámicas Reforzadas Con Fios Altamente Resistentes**. Qualicer, 2006.

BRISTOT, V.M.; 1996. **“Máquinas e Equipamentos para Cerâmica”**. 1. ed. Criciúma, Santa Catarina: Editora Luana.

CALLISTER Jr, William D., **Ciência e Engenharia de Materiais**: 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.

CALLISTER Jr, William D., **Materials Science and engineering: an introduction**: 7 ed. Printed in the United States of America, 2007.



CAMPOS, Karina Felisbino. **Desenvolvimento de sistema de fixação de fachada ventilada com porcelanato fina espessura**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. UFSC – 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferro Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2005. 599p.

CLAUSSEN, N. **Mechanische eigenschaften keramischer werkstoffe**. Technische Universität Hamburg-Harburg, 1995.

DE NONI, A Junior.; **Estudo das Propriedades Mecânicas de Porcelanato através da Avaliação de Tensões Residuais Microscópicas e Macroscópicas Originadas Durante a Etapa de Resfriamento do Ciclo de Queima**. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC; Florianópolis – Julho 2007.

DOWLING, N. E. Fracture of cracked members. In: \_\_\_\_\_. **Mechanical behavior of materials**. 3rd. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007, cap. 8, p. 312-390.

E.B.M. Rego, **Fotodegradação De Soluções De Laranja II e Efluentes Da Indústria Têxtil Por Camadas De TiO<sub>2</sub> e ZnO, Serigrafadas Em Peças Cerâmicas**, Aveiro, 2008.

FREITAS, Cesarina S., et al... **Influência de diferentes Processos de Conformação nas Características Finais de Produtos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial. Volume 14, n.3, 2009.

FUJISHIMA, A., Hashimoto, K. & Watanabe, T. **TiO<sub>2</sub> photocatalysis: fundamentals and applications**. BKC, Tokyo, 1999.

GARCIA-SAINZ, J. et al. **O Processo de Coloração a Seco de Porcelanato. Parte 1: Variáveis Envolvidas e Influência Sobre as Propriedades das Peças**. Cerâmica Industrial, v 13, n. 4, p. 7 – 11, 2008.

GILBERTONI, C.; P. I. PAULIN F.; M. R. MORELLI – **Caracterização de cerâmica sinterizadas por fluxo viscoso**, Revista Cerâmica, 51, pag. 331 – 335, 2005.

ECK, C. **Grês Porcelanato**, Cerâmica. Industrial, v. 1, n. 4/5, p. 21-24, 1996.

ISO 13006:1998(E). **Ceramic Tiles – Definitions, Classification, Characteristics and Marking**. 1998.

KINGERY, W.D.; 1998. **“La Transición de la Cerámica desde el Oficio Artesanal a la Industria basada em la Ciência”**. V Congresso Mundial de la Calidad de Azulejo y del Pavimento Cerámico, (Mar. 1998 : Castellón, España). Anais Qualicer 98, p.3-17.

KINGERY, W. D., et al. **Introduction to ceramics**. 2 ed New York. John Wiley & sons, 1976.

LACEY, M.E.Q, SCHIRMER, W.N. **Ambiência 4**. (2008) 309.

LANGE, L. L. **Stresses and crack extension in multi-layered ceramic composites**. Summer school of SICMAC - Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, p. 11-27, 2006.

LUBE, T. **Mechanical properties of ceramic laminates**. Summer school of SICMAC - Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, 151-160, 2006.

MANFREDINI, T.; PELLACANI, G.C.; ROMAGNOLI, M. **Porcelainized Stoneware Tile**. American Ceramic Society Bulletin, v. 74, p. 76-79, 1995.

MARTINS, R.R.; PIRES, A.T.N.; AL-QURESHI, H.A.; BARRA, G.M.O.; **Estudo da viabilidade de fios naturais curtas em matrizes de resina epóxi**. Revista Matéria, v. 13, n. 4, pp.605 – 610, 2008.

MENEGAZZO, A. P. M.; PASCHOAL, J. O. A.; ANDRADE, O. M.; CARVALHO, J. C.; GÔUVEA, D. – **Avaliação da Resistência Mecânica e Módulo de Weibull de Produtos Tipo Grês Porcelanato e Granito**. Cerâmica Industrial, V7, 2002.

MORAES, J.c.s., SOSTENA, M.M.D.S.,e GRANDINI, C.R. Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses. **The Glass Transition Temperature in Dental Composites** P. 669- 684.

MORAIS, J.L. **Estudo Da Potencialidade De Processos Oxidativos Avançados, Isolados e Integrados Com Processos Biológicos Tradicionais, Para Tratamento De Chorume De Aterro Sanitário**, UFPR, 2005.

MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W. **Psychrometry, evaporative cooling and solids drying**. In: PERRY, R. H.; GEEN, D. W. Perry's chemical engineer's handbook. 7nd. ed. New York: McGraw-Hill ,cap. 12, p. 25-33, 1997.

MOURÃO, Hajl, MENDONÇA, V.R. de, MALAGUTTI, A.R., RIBEIRO, C., **Nanoestruturas em fotocatalise: uma revisão sobre estratégias de síntese de fotocatalisadores em tamanho nanométrico**. Química Nova 32 (2009) 2181-2190.

NBR 13817 **Placas Cerâmica para revestimentos – Especificações e métodos de ensaios**. 1997

NORTON, F.H. **Elements of Ceramics**. Ed. Addison-Wesley, Massachussets, UK, 1975.

NOVA ENCICLOPÈDIA BARSA, **Encyclopaedia Britannica do Brasil**, 1999 – V 4 – p.86.

OLIVEIRA, A.P.N. **Grês Porcelanato: Aspectos Mercadológicos e Tecnológicos**, **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998.

PELLICELLI, G., ESPOSITO, L., RAMBALDI, E. e Tucci, ANTONELA. **Trayectorias de la Trayectorias de la grieta y Mecanismos de Fortalecimiento em Materiales Compuestos de Acero-Matriz Porcelánico**. Qualicer, 2008, P.BC 85-94.

PORTU, G. M. L. **Lamination process to obtain structure with tailored residual stress distribution**. Summer school of SICMAC -Layered, functional gradient ceramics and thermal barrier coatings: design, fabrication and application, Minorca Island, Spain, p. 39-49, 2006.

PRADO, A. C. A.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T. & MENEGAZZO, A. P. M. **Redução da susceptibilidade à deformação piropástica das argilas do pólo cerâmico de Santa Gertrudes através da adição de matérias primas**. Cerâmica 54 (2008) 7-20.

REZIC, Iva, CURKOVIC, Lidija e UJEVIC, Magdalena. **Metal ion release from electricguitar strigs in artificial sweat.** *Corrosion Science*. P. 1985 – 1989, 2009.

ROOKE, D. P. and CARTWRIGHT, D. J., “**Stress Intensity Factors**”, Her Majesty’s Stationery Office, Londres, 1974.

ROSA, Edson. **Análise de Resistência Mecânica, Modos de Falha e Confiabilidade.** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1994.

SACMI; 1996. “**Catálogo :EssicatoioVerticaleAutomatico EVA 140**”. Ímola - Italy.

SACMI; 2008. “**Catálogo Geral: Equipamentos**”. Itália. Disponível em: <http://www.sacmi.com>. Acessado em junho de 2010.

SALVINI, V. R. **Propriedades termomecânicas de refratários no sistema  $Al_2O_3 - 3Al_2O_3.2SiO_2 - ZrO_2$ .** 1995. 184f. Dissertação (Mestrado na Área Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

SÁNCHEZ, E. **Consideraciones Técnicas Sobre el Producto y el Proceso de Fabricación Del gresporcelánico.** *Cerámica Información*, n. 285, p. 73-91, 2002.

SANTANA, Jerusa Góes Aragão. **Desenvolvimento de Cerâmicas Multi Camadas de Carbetto de Silício Destinadas a Aplicações Térmicas.** Tese de Doutorado, 2010.

SERRALHEIRO, W.A.O. **O Processo de Adaptação Estratégica das Empresas Eliane sob a Ótica da Teoria Institucional Baseada em Recursos (RBV).** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, (2004).

SHAN, A.Y, T.I.M. Ghazi, S.A. Rashid. **Applied Catalysis A: General** 389 (2010)

SHREVE, R. N.; JR. Joseph A. B. **Indústrias de processos químicos**, 4. ed., Rio de Janeiro-RJ, 1980. Editora: Guanabara Dois S.A. p. 787.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos.** São Paulo. Edgar Bhucher , 1982

TUCCIA, Antonela, NANETTIB, Ana, MALMUSIC, Luca e TIMELLINIA, Giorgio. **Superfícies Cerâmicas com Ação Microbiológica para Ambientes Hospitalares.** Trabalho publicado na Ceramic Forum International (CFI) 84 n° 3 – pg E47. (2007)

VAN VLAK, L. H. **Princípio de ciência dos Materiais.** São Paulo: Edgard Blucher. 13<sup>0</sup> reimpressão. 2000.