



M 2021

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS DE REFORÇO E DO REAPROVEITAMENTO DE CARAPAÇAS CERÂMICAS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

LUÍS ANTÓNIO GARCIA DE SOUSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR: Prof. Luís Filipe Malheiros

Porto, 5 de julho de 2021

CANDIDATO	Luís António Garcia de Sousa	Código	201606718
TÍTULO	<i>Estudo da incorporação de fibras de reforço e do reaproveitamento de carapaças cerâmicas no processo de fundição por cera perdida</i>		
DATA	__ de setembro de 2021		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala _____ - __:__h		
JÚRI	Presidente	DEMM/FEUP	
	Arguente	DEM/FEUP	
	Orientador	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros F. Ferreira	DEMM/FEUP

Resumo

A fundição com modelo de cera perdida moldado em carapaça cerâmica (*Investment Casting*) é um processo milenar de produção de peças, sendo um dos mais versáteis e transversais processos de fundição. Já foi utilizado para produzir desde as mais delicadas peças de joalheria até aos mais complexos componentes para a indústria de armamento ou aeroespacial. Há, no entanto, ainda um vasto campo para investigação neste mundo do *Investment Casting*, com o intuito de melhorar as potencialidades do processo, tornando-o mais viável, económico e rentável.

No corpo desta dissertação, são abordados os principais domínios do processo de *Investment Casting*, desde as matérias-primas utilizadas, até ao seu processamento e produção de fundidos. São focados os materiais e processos utilizados no fabrico das carapaças cerâmicas, bem como os métodos de regeneração dos refratários a elas associados.

Num mundo em que a preocupação ambiental está sempre patente, o conceito de Economia Circular ganha cada vez mais peso, sobretudo a nível industrial. Nesse sentido, pretende-se neste trabalho analisar o impacto da reutilização de areias resultantes do abate das carapaças cerâmicas na produção de novas moldações. Os retornos dessas carapaças apresentam algumas diferenças em termos de granulometria e composição química relativamente à matéria-prima de base utilizada. Existia a possibilidade da sua incorporação promover o aparecimento de algumas deficiências em termos do processo. Foram então analisados os efeitos da adição de fibras cerâmicas, como alternativa para colmatar os défices, principalmente em termos de resistência mecânica.

Verificou-se que as carapaças cerâmicas reforçadas com fibras apresentam um aumento significativo da sua resistência mecânica, sem qualquer deterioração de outras propriedades.

A incorporação de uma mistura de areia reciclada com matéria-prima revelou ser um sucesso, sem quaisquer efeitos negativos aparentes na qualidade e nas propriedades das carapaças cerâmicas.

Palavras-chave

Fundição com modelo de cera perdida; Carapaça cerâmica; Compósito de matriz cerâmica; Fibras cerâmicas; Reutilização de matérias-primas.

Abstract

Investment Casting is an ancient process to produce castings, being one of the most versatile and transversal processes in foundry. It has been used to produce any casting from the most delicate pieces of jewellery to the most complex components for the military or aerospace industry. There is, however, still a vast field for research and development in this world to improve the capacity of the process, making it more viable, economical, and profitable.

This Master thesis addresses the main domains of the Investment Casting process, from the materials used to their processing to obtain the castings. The materials and techniques used in the production of the ceramic shells and the recovery methods of the refractories involved are focused.

In a world where the environmental concern is always evident, the concept of Circular Economy is increasingly important, especially at the industrial level. In this sense, this work intends to analyse the effects of the use of sand resulting from the knockout of the ceramic shells recovered. The returns show some differences in particle size and chemical composition concerning the raw material used. There is a possibility of its incorporation promoting some deficiencies in terms of the process. The effects of the addition of ceramic fibres were analysed as an alternative to overcome these deficiencies, mainly in terms of mechanical strength.

It was found that fibre-reinforced ceramic shells significantly increase their mechanical strength without any deterioration of other properties. The incorporation of a mixture of recycled sand and raw material turned out to be a success, without any apparent adverse effects on the quality and properties of the ceramic shells.

Keywords

Investment casting; Ceramic shell; Ceramic matrix composite; Ceramic fibres; Reuse of raw materials.

Agradecimentos

Quero começar por dirigir um enorme obrigado à minha família, por todo o esforço, compreensão e disponibilidade que me foram dirigidos durante o meu percurso académico. Aos meus pais, por sempre me terem guiado e encorajado a seguir o meu interesse pela ciência. Aos meus avós, um obrigado por todo o carinho, pela sabedoria e perseverança que me ensinaram. Deixo uma dedicatória especial ao meu avô Alberto, que com certeza estaria orgulhoso de me acompanhar no fim da minha jornada.

De seguida, agradeço profundamente a todos os meus amigos, que timbraram esta viagem com os melhores momentos que podia pedir e que passaram a meu lado os bons e maus momentos. Um obrigado especial à minha namorada, que me apoiou de forma incondicional e demonstrou uma enorme paciência para comigo, que foi essencial para o sucesso deste trabalho.

Dirijo o meu agradecimento a todo o pessoal do MIEMM com que tive a oportunidade de cruzar caminho. De modo singular, quero deixar um forte agradecimento ao Prof. Luís Filipe Malheiros, orientador desta dissertação, a quem estarei permanentemente grato, não só pela dedicação, disponibilidade e apoio que demonstrou no decorrer dos seis meses, mas também pelo crescimento científico e pessoal que imprimiu em mim no decorrer da minha jornada académica.

Quero endereçar a minha gratidão a todo o pessoal da FERESPE, pela maneira como me receberam e se mostraram sempre prontos para me auxiliar. De destacar o Eng. Pedro Lacerda, coorientador desta dissertação, Eng. Joaquim Santos, Eng. José Moreira, Eng. Bártolo Paiva, Eng. Sandra Coimbra, Eduardo e Sr. Carlos.

Estendo um forte agradecimento à Prof. Ana Senos, da Universidade de Aveiro, pelo apoio e tempo despendido a auxiliar-me em alguns ensaios executados nesta dissertação.

Por mim, uma palavra de apreço ao Dr. Rui Rocha e à Dra. Daniela Silva, do CEMUP, pela assistência durante as análises em SEM.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Projeto e objetivos	1
1.3	Estrutura	2
2	A empresa	2
2.1	Processo produtivo	3
3	Revisão bibliográfica	4
3.1	Introdução ao Investment Casting	4
3.2	Modelos de cera	7
3.3	Carapaça cerâmica	7
3.3.1	Refratários	8
3.3.2	Ligantes	10
3.3.3	Outros componentes da barbotina	10
3.3.4	Viscosidade	11
3.3.5	Areia de reforço	11
3.4	Fibras	12
3.4.1	Fibras orgânicas	13
3.4.2	Fibras naturais	15
3.4.3	Serrim	17
3.4.4	Fibras cerâmicas	17
3.4.5	Sistema de fibras híbrido	19
3.4.6	Métodos de adição de fibras	21
3.4.7	Mecanismos de fratura	22
3.4.8	Influência do tamanho das fibras	24
3.5	Recuperação de carapaças cerâmicas	25
3.5.1	Contaminantes	25
3.5.2	Processo de recuperação	25
3.6	Descerificação e sinterização	26

3.7	Ensaio de permeabilidade, resistência mecânica e de dilatométrica de carapaças cerâmicas	27
3.7.1	Permeabilidade.....	28
3.7.2	Resistência à fratura	28
3.7.3	Adjusted Fracture Load	30
3.7.4	Dilatométrica	30
4	Trabalho experimental	31
4.1	Materiais Utilizados	31
4.1.1	Ceras	31
4.1.2	Carapaças cerâmicas.....	32
4.1.3	Fibras de reforço.....	33
4.2	Métodos experimentais.....	35
4.2.1	Produção de provetes	35
4.2.2	Ensaio de Flexão.....	37
4.2.3	Ensaio de permeabilidade	38
4.2.4	Ensaio dilatométrico	38
4.2.5	Determinação da densidade e porosidade aparente	39
4.2.6	Análise em Microscopia Eletrônica de Varrimento	39
5	Apresentação e discussão de resultados	39
5.1	Ensaio de determinação do módulo de rotura	39
5.1.1	Resistência à flexão.....	40
5.1.2	Adjusted Fracture Load	44
5.2	Permeabilidade	47
5.3	Análise da superfície de fratura das carapaças cerâmicas.....	49
5.4	Ensaio dilatométrico	52
6	Conclusões.....	54
7	Estudos futuros	55
8	Bibliografia	57

Índice de figuras

Figura 1 - Representação esquemática do processo IC [7].	5
Figura 2 - Vendas, por setor, de peças produzidas por IC [13].	6
Figura 3 - Modelo de cera após a sua imersão em barbotina [2].	9
Figura 4 - Secção longitudinal da parede de uma carapaça cerâmica [16].	10
Figura 5 - Resistência à fratura de uma carapaça cerâmica vs. distribuição granulométrica e número de camadas de areia de reforço [18].	12
Figura 6 - Permeabilidade vs. resistência à fratura de uma carapaça cerâmica para diferentes distribuições granulométricas da areia de reforço [18].	12
Figura 7 - Imagem obtida, em Microscopia Eletrônica de Varrimento, de fibras de nylon [20].	13
Figura 8 - Impacto da fração de fibras de nylon e de fibras cerâmicas na resistência em verde	14
Figura 9 - Impacto da fração de fibras de nylon e de fibras cerâmicas na resistência à flexão de carapaças cerâmicas [19].	15
Figura 10 - Permeabilidade, a 800 °C, de carapaças cerâmicas com e sem fibras de reforço [27].	15
Figura 11 - Imagem da typha em flor [31].	16
Figura 12 - Efeito da fração de fibras de typha sobre a resistência à flexão, em verde, 16	
Figura 13 - Impacto da fração de fibras de typha sobre a resistência à flexão numa carapaça cerâmica após sinterização [24].	17
Figura 14 - Impacto da fração de fibras cerâmicas sobre a resistência à tração de carapaças cerâmicas	18
Figura 15 - Impacto da fração de fibras de aluminossilicatos e da temperatura de sinterização sobre a resistência à tração de carapaças cerâmicas [33].	19
Figura 16 - Impacto da fração de fibras híbridas sobre a resistência em verde de carapaças cerâmicas [34].	20
Figura 17 - Impacto da adição de fibras híbridas na resistência à flexão de carapaças cerâmicas	20
Figura 18 - Permeabilidade de carapaças cerâmicas vs. fração de fibras de reforço híbridas e temperatura de sinterização [34].	21
Figura 19 - Influência do comprimento das fibras, e dos processos da sua incorporação, na resistência à flexão em verde de carapaças cerâmicas [36].	21

Figura 20 - Orientação das fibras incorporadas em: a) barbotina e solvente; b) areias de reforço [36].....	22
Figura 21 - Representação esquemática da propagação de microfissuras num compósito de matriz cerâmica reforçado com fibras [33].....	23
Figura 22 - Alterações provocadas pelo aumento da temperatura nas fibras cerâmicas de reforço de uma carapaça de IC: (a),(b) - reforço da carapaça; (c) - enfraquecimento da carapaça [29].	24
Figura 23 - Esquema do funcionamento de um moinho planetário [39].	25
Figura 24 - Esquema do funcionamento de um moinho de bolas numa operação de moagem [41].	26
Figura 25 - Corpo de teste para ensaios de permeabilidade de carapaças cerâmicas [42].	28
Figura 26 - Determinação da resistência à fratura de carapaças cerâmicas: a) ensaio de flexão em três pontos (EF3); b) ensaio de flexão em quatro pontos (EF4) [43].....	29
Figura 27 - Imagens, obtidas em SEM, das fibras inorgânicas de reforço das carapaças cerâmicas:	34
Figura 28 - Imagens, obtidas em SEM, das fibras NEG AR, com identificação da camada polimérica	35
Figura 29 - (a) Modelo de cera para produção dos provetes para os ensaios de permeabilidade;	35
Figura 30 - Representação esquemática da sequência da deposição das camadas de barbotina, e respetiva identificação (Tabelas 3 e 4), durante o ciclo de produção das carapaças cerâmicas.....	36
Figura 31 - Representação esquemática do circuito utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade.	38
Figura 32 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, vs. número de camadas de reforço.	40
Figura 33 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por seis	41
Figura 34 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por	41
Figura 35 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por	42

Figura 36 -Novelo de fibras formado na barbotina 3, para uma adição de 0,2% de fibras FFX.	42
Figura 37 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com seis	43
Figura 38 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com sete	43
Figura 39 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com oito.....	44
Figura 40 - AFL de carapaças, em verde, vs. fração e tipo de fibras de reforço.....	45
Figura 41 - AFL de carapaças, após sinterização, vs. fração e tipo de fibras de reforço.	45
Figura 42 - AFL, em verde, de carapaças produzidas com 50% de areia reciclada, vs. fração e tipo de fibras de reforço.....	46
Figura 43 - AFL, após sinterização, de carapaças produzidas com 50% de areia reciclada, vs. fração e tipo	46
Figura 44 - Permeabilidade das carapaças cerâmicas vs. número de camadas de reforço.	47
Figura 45 - Porosidade aparente das carapaças cerâmicas vs. número de camadas de reforço.	48
Figura 46 - Permeabilidade das carapaças cerâmicas vs. fração e tipo de fibras de reforço.	49
Figura 47 - Imagens, obtidas em SEM, da superfície de fratura de carapaças sinterizadas: a) ISO0,2; b) FFX0,6;.....	50
Figura 48 - Imagens, obtidas em SEM, da superfície de fratura de carapaças sinterizadas:	51
Figura 49 - Dilatação, vs. Temperatura, das carapaças cerâmicas: a) FFX0,2; b) FFX0,6; c) FFX0,8; d) ISO0,2; e) ISO0,6; f) ISO0,8.....	53

Índice de tabelas

Tabela 1 - Espessura de carapaças cerâmicas, com e sem incorporação de fibras de reforço de nylon [27]	14
Tabela 2 - Composição química (% mássica) das farinhas refratárias utilizadas.....	32
Tabela 3 - Componentes das barbotinas utilizadas e respectivas frações (%)	32

Tabela 4 - Composição química (% mássica) das areias de reforço disponíveis na FERESPE	32
Tabela 5 - Composição química (% mássica) das fibras inorgânicas de reforço	33
Tabela 6 - Caracterização das carapaças produzidas sem incorporação de fibras de reforço	36
Tabela 7 - Caracterização das carapaças produzidas com adição de fibras e areia de reforço A3	36
Tabela 8 - Caracterização das carapaças produzidas com adição de fibras e areia de reforço reciclada	37
Tabela 9 - Espessura, em mm, das carapaças cerâmicas produzidas para os ensaios de flexão	44

Lista de Abreviaturas

AFL – *Adjusted Fracture Load*

EF3 – Ensaios de Flexão em três pontos

EF4 – Ensaios de Flexão em quatro pontos

IC – *Investment Casting*

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

MOR – Módulo de Rotura nos Ensaios de Flexão

SEM – Microscopia Eletrónica de Varrimento

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A presente dissertação foi desenvolvida em parceria com a FERESPE - Fundição de Ferro e Aço, Lda. com o intuito de caracterizar as carapaças cerâmicas utilizadas no setor de *Investment Casting* (IC) da empresa, e iniciar um estudo visando a melhoria das suas propriedades mecânicas. Pretende-se capacitar a FERESPE para vir a produzir, a breve trecho, fundidos de maiores dimensões e massividade por IC, nomeadamente através da melhoria das propriedades mecânicas das carapaças cerâmicas por incorporação de fibras de reforço. Analisou-se também a possibilidade da aplicação dos conceitos subjacentes à Economia Circular na produção das carapaças cerâmicas, através da reincorporação de areias resultantes da moagem de carapaças após o seu abate.

Neste estudo, foram analisadas condições de ensaio distintas de modo a seleccionar a que se afigurava mais adequada para as necessidades da empresa. Posteriormente, foram realizados vários ensaios sobre as propriedades das carapaças cerâmicas, bem como análises detalhadas do seu comportamento mecânico.

A FERESPE vinha vislumbrando, há já algum tempo, a possibilidade da incorporação de fibras para reforço das carapaças, pelo que as fibras cerâmicas testadas já se encontravam disponíveis em armazém. Além disso, também já havia a consciência de que a utilização de componentes de reforço poliméricos era benéfica em termos das propriedades das carapaças, encontrando-se assim já implementada no processo.

Partindo destas premissas, foram estabelecidas, com base em profunda pesquisa bibliográfica, as diferentes condições de produção de carapaças a serem testadas.

1.2 Projeto e objetivos

A elaboração desta dissertação de Mestrado envolveu a caracterização de centenas de carapaças, com a diversificação de alguns dos componentes utilizados no fabrico. O objetivo dessa análise incidiu sobre o impacto que diferentes composições, número de camadas de deposição e frações de fibras de reforço têm nas propriedades mecânicas, permeabilidade, comportamento à fratura e na dilatação térmica das carapaças.

Houve um claro foco no aprofundamento do conhecimento de todas as etapas do processo de fabrico de IC de modo a poder direccionar o trabalho experimental para as necessidades da empresa. A implementação dos reforços por meio de fibras é algo a salientar uma vez que representa uma grande tranche deste trabalho. A incorporação de fibras provoca um aumento das propriedades mecânicas das carapaças, o que, consequentemente, permite otimizar o espaço temporal que a produção das carapaças ocupa no processo fabril.

É de evidenciar a incorporação de carapaças recuperadas, que é de suma importância, não só em termos económicos, mas também a nível ambiental, uma vez que estes materiais não são recicláveis, diminuindo assim a produção de resíduos e a utilização de matéria-prima nova no processo.

1.3 Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em sete partes. As duas primeiras secções focam os objetivos e enquadramento desta dissertação, bem como uma apresentação sucinta da empresa, da sua posição no mercado e do seu processo de fabrico.

A terceira parte versa a revisão bibliográfica sobre o processo IC, sendo feita uma abordagem introdutória ao processo e às suas perspetivas de mercado. De seguida, evidenciam-se os materiais utilizados no fabrico dos modelos de cera e das carapaças cerâmicas, com especial atenção nestas últimas, havendo ainda uma abordagem mais pormenorizada ao seu processo de fabrico, às propriedades que devem apresentar e às variáveis que afetam de modo mais significativo a sua *performance*. É analisada a etapa de descerificação com alguma minúcia, já que é a etapa crítica para o desempenho das carapaças em todo o processo IC. São ainda apresentados alguns métodos de controlo das propriedades das carapaças.

Posteriormente, numa quarta parte do trabalho, são descritos os materiais utilizados na componente experimental da dissertação, bem como os métodos e condições de produção das carapaças que estão implementados na FERESPE e que foram utilizados neste trabalho, e uma exposição dos ensaios que foram levados a cabo na caracterização das mesmas.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos, havendo uma análise baseada nos objetivos da dissertação, sempre com atenção às bases bibliográficas.

Em fecho, são listadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho, colmatadas com alguns estudos de interesse científico a desenvolver no futuro.

2 A empresa

A FERESPE é uma empresa do setor da fundição, fundada em 1981 pelo Eng. Jorge Macedo Casais. Dedicada aos processos de fundição em areia e de precisão por modelo de cera perdida, tem o seu foco na produção de peças para aplicações de elevada exigência. A FERESPE garante soluções competitivas para a produção de peças de elevada complexidade técnica, comprometendo-se a cumprir os requisitos dimensionais e de acabamento superficial mais apertados. Entre as ligas produzidas, sobressaem os aços inoxidáveis duplex, super duplex e super austeníticos. Há também que realçar a produção de aços de média e baixa liga, bem como ferros fundidos de alta liga. Em operação desde 2018, existe também uma unidade de tratamentos térmicos destinada a suprir as exigências do mercado no que diz respeito à qualidade e prazos de entrega dos fundidos [1].

Há um claro posicionamento em nichos de mercado com necessidades de pequenas e médias séries de peças produzidas em ligas ferrosas, com elevados padrões de qualidade. Existe um forte compromisso por parte da FERESPE no cumprimento rigoroso dos prazos de entrega acordados com os clientes. São estes os fatores predominantes para a sua diferenciação no setor [1].

Cerca de 90% de toda a produção da empresa é destinada à exportação, compreendendo componentes para diversos setores industriais:

- Energia, petróleo e gás;
- Gás natural liquefeito e aplicações criogénicas;
- Água corrente e águas residuais;
- Refinaria e petroquímica;
- Química;
- Energia nuclear;
- Ferrovia;
- Construção e reparação naval;
- Pasta de papel;
- Mineira e extrativa.

Além disso, de modo a manter a sua posição num mercado que é cada vez mais competitivo, a FERESPE empenha-se em ter a qualidade dos seus produtos garantida, possuindo diversas certificações nesse sentido, concedidas por [1]:

- FRAMATOME, para a produção de componentes para válvulas e bombas para os mais diversos setores, incluindo o de aplicação nuclear;
- TUV NORD, para equipamentos de pressão;
- DB e TUV NORD, para a produção e soldadura de componentes para a indústria ferroviária;
- Bureau Veritas, ABS e DNV GL, para fundição de aços e produção de componentes para a indústria naval;
- DNV GL, para sistemas de gestão da qualidade e de gestão ambiental, segundo as normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015, respetivamente.

2.1 Processo produtivo

De modo a expandir a sua capacidade para produzir peças de elevada complexidade e com especificações dimensionais apertadas, a FERESPE investiu na criação de uma ala dedicada ao IC, com foco na produção de pequenas e médias séries de peças de pequena dimensão, com excelente precisão dimensional e acabamento superficial [2].

É assegurado aos clientes um serviço completo de acompanhamento durante todo o ciclo produtivo de uma peça, que começa com o projeto e fabrico do molde para a injeção de cera. Este molde pode ser produzido internamente por fabricação aditiva, pelo processo de prototipagem rápida SLA, ou num parceiro da empresa, por maquinaria de blocos de alumínio. Para isso, é recebido um modelo CAD da peça, sendo feito internamente o projeto do molde. Está também à disposição da empresa um sistema de digitalização fotométrica 3D, para controlo geométrico e dimensional. Uma vez produzido o molde, é injetada a cera, dando origem a um modelo da peça final, que é montado num sistema de gitagem, formando um cacho. Os modelos de cera não podem ter dimensões superiores a 400x400x250 mm, devido às limitações do equipamento [2].

O cacho é então utilizado para a produção da carapaça cerâmica em que o metal será vazado. Para a sua produção, o cacho em cera é mergulhado em várias camadas de

barbotinas e de reforços refratários, de forma a ganhar a integridade pretendida. Na FERESPE, há limites, em termos dimensionais, para as carapaças produzidas, não podendo estas ultrapassar os 500 mm de diâmetro e os 600 mm de altura. Antes da operação de descerificação, é removida a humidade das carapaças para evitar a sua fissuração, sendo esta etapa levada a cabo com um estágio numa câmara sob condições de temperatura e humidade controladas. Ulteriormente, as carapaças são submetidas a um ciclo térmico de descerificação, num forno elétrico de resistências, a 1000°C, seguindo posteriormente para um estágio, à mesma temperatura, durante aproximadamente 1 hora, de modo a promover a sinterização do refratário [2].

Para a fusão, o setor de IC dispõe de três fornos de indução de cadinho, dois com capacidade para 50 kg, e um para 150 kg de ligas ferrosas. Com o intuito de produzir peças com espessuras mais reduzidas e de atenuar o choque térmico e no vazamento do metal, as moldações são pré-aquecidas a 1000°C, dado que as temperaturas de vazamento podem atingir os 1700°C [2].

A FERESPE tem autonomia para efetuar etapas de pós-processamento e acabamento, com uma unidade de tratamentos térmicos, e capacidade para desbaste e granalhagem final das peças. Além disso, em termos de controlo de qualidade, tem competências para levar a cabo ensaios não destrutivos e realizar inspeção final. Acabamentos de maquinaria, revestimentos, tratamentos superficiais ou outros podem ser subcontratados a parceiros da empresa [2].

3 Revisão bibliográfica

3.1 Introdução ao Investment Casting

O processo *Investment Casting*, também conhecido por fundição com modelo de cera perdida moldado em carapaça cerâmica, é um processo de produção de peças metálicas através da fusão de um metal ou liga metálica e posterior vazamento numa moldação cerâmica. Descoberto há milhares de anos, era utilizado principalmente para produzir peças de arte e joalharia em ouro, utilizando modelos em cera de abelha que reproduziam a peça final. O seu nome vem precisamente deste modelo de cera, que é “perdido” no processo de produção da carapaça cerâmica [3].

Caiu em esquecimento durante alguns séculos até que ganhou uma nova vida durante a II Guerra Mundial, em que foi vastamente utilizado no fabrico de componentes para a indústria de armamento. Desde então, estendeu-se a novos ramos de aplicação em vários campos das indústrias aeronáutica, aeroespacial, máquinas-ferramentas, joalharia, sistemas hidráulicos e pneumáticos, sendo um processo que ainda apresenta grandes perspetivas de desenvolvimento científico e tecnológico [4, 5]. Para o sucesso do processo, é necessário respeitar uma sequência de etapas (Figura 1), que seguem um alto nível de controlo e inspeção pormenorizada, com o intuito de obter fundidos de elevada qualidade [3, 6].

Numa primeira fase, é necessário projetar e fabricar o molde para a injeção de cera. Este é um molde metálico, geralmente em alumínio, produzido por maquinaria ou por fabrico aditivo. No projeto do molde, há que ter em conta a elevada contração da

cera e, posteriormente, do metal. Irá ser produzido um modelo em cera que será uma réplica da peça final (1). Estes modelos são montados no sistema de gitagem e alimentação (2), formando uma “árvore” [7]. Este é um processo moroso, em muitos casos levado a cabo manualmente, podendo ser automatizado em algumas situações. As dimensões e o número de modelos do cacho são projetados, e o seu vazamento simulado antes do início do processo de modo a evitar problemas nas etapas a jusante e, consequentemente, a produção de peças não conformes. Os cachos são posteriormente limpos com o intuito de remover qualquer remanescente de cera ou desmoldante da superfície, sendo depois submetidos a um ataque químico de ativação e desengorduramento, que tem por intuito aumentar a molhabilidade dos cachos pelas barbotinas.

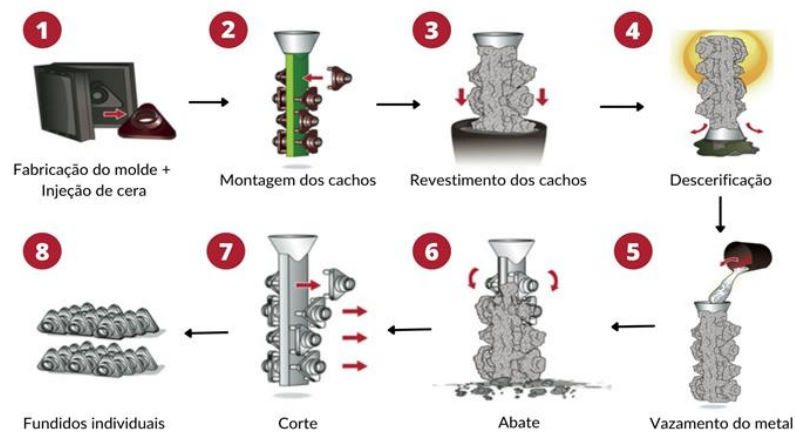


Figura 1 - Representação esquemática do processo IC [7].

Posteriormente (3), é feito um revestimento dessa “árvore” com várias camadas de barbotina e areia (material refratário) de reforço. Os cachos são então imersos numa suspensão cerâmica (barbotina) e pulverizados com um material refratário. Por cada ciclo de imersão e pulverização, há um período de secagem, de algumas horas, em que é removida a água presente [7]. Esta etapa é levada a cabo sob condições de humidade e temperatura controladas. De modo a remover a cera do seu interior (4), submete-se a carapaça a um ciclo térmico de descerificação [6, 7]. As ceras utilizadas apresentam um coeficiente de expansão dez vezes superior ao da carapaça cerâmica [6, 8-10]. Por isso, há a necessidade de atentar à etapa de descerificação com alguma precaução de modo a evitar que sejam geradas microfissuras na carapaça, e, em casos extremos, a sua fratura. Para contornar esta problemática, são criados furos de drenagem nas carapaças de modo a facilitar o escoamento da cera durante a descerificação. Os sistemas de gitagem são revestidos com parafina de modo a criar mais espaço para a expansão da cera. Durante esta etapa, além da cera, são removidos quaisquer voláteis que estejam presentes e que são inerentes ao processo. A cera é recolhida para recuperação. No seguimento do ciclo térmico de descerificação, a temperatura do forno é elevada de modo a promover a sinterização das carapaças. Esta etapa tem a finalidade de remover qualquer remanescente de cera, bem como conferir resistência mecânica, por sinterização do material refratário [6].

Para finalizar o processo, a carapaça é pré-aquecida, a fim de atenuar o choque térmico a que irá ser sujeita, e o metal é então vazado (5) [6, 7].

Posteriormente ao vazamento, procede-se ao abate da carapaça para remover o cacho metálico (6). As peças são removidas e submetidas a processos de corte e granalhagem (7, 8). Por fim, efetua-se um controlo de qualidade das peças produzidas [6, 7].

O IC é um processo com um grande leque de valências e potencialidades. No entanto, e tal como todos os processos de fundição, apresenta algumas limitações.

As suas principais vantagens assentam na grande versatilidade de produção, mormente na sua aplicabilidade a qualquer liga metálica [3, 6]. É assegurada uma elevada precisão dimensional do fundido, com tolerâncias de até 10 μm , sendo possível produzir peças de geometria bastante complexa, dentro de uma grande gama em termos dimensionais, e que apresentem detalhes de pequenas dimensões ou paredes muito finas [4, 6, 11, 12]. Além disso, é um processo que permite eliminar várias etapas de maquinaria e acabamento já que proporciona um excelente acabamento superficial do fundido, com uma rugosidade média (R_a) da ordem dos 3,2 μm , sendo mesmo possível atingirem-se valores inferiores a 1,6 μm [11].

Entre os fatores mais críticos, incluem-se a elevada morosidade do processo e os seus custos. O IC implica várias etapas complexas e morosas, como a produção dos cachos e das carapaças cerâmicas, que reduzem a capacidade produtiva, tendo um impacto considerável nos custos do processo. Para além disso, há alguma limitação em termos das dimensões e peso dos fundidos a produzir.

Devido à versatilidade deste processo, as peças produzidas têm aplicações quase ilimitadas em todos os campos da indústria. Entre as indústrias que mais utilizam componentes produzidos por IC destacam-se: a automóvel, aeroespacial, aeronáutica, armamento, militar e petrolífera e energética. Como se pode analisar na Figura 2, há uma predominância das peças de alto valor acrescentado, com especificações dimensionais apertadas e geometrias frequentemente bastante complexas, principalmente para aplicações militares e aeronáuticas. A título exemplificativo, podem ser referidas as pás das turbinas de motores para a indústria aeroespacial, que são produzidas unicamente por IC, válvulas de alívio de pressão para a indústria petrolífera, próteses, implantes e gatilhos para armas de fogo [13].

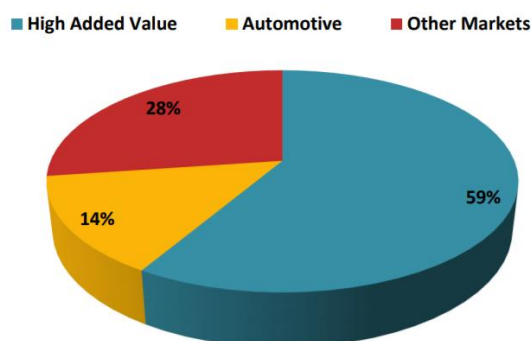


Figura 2 - Vendas, por setor, de peças produzidas por IC [13].

3.2 Modelos de cera

O processo de IC inicia-se com a concepção do modelo, em que são utilizados materiais poliméricos, ceras ou plásticos. As ceras são o material base de uso preferencial uma vez que são economicamente acessíveis relativamente a outros materiais com propriedades equivalentes. São fáceis de misturar com outros materiais de modo a potenciar as propriedades (é rara a utilização de apenas um tipo de cera), apresentam baixo ponto de fusão, baixa viscosidade e abrasividade, o que facilita bastante o processo de injeção e de colagem, bem como o processo de descerificação sem danificar a carapaça [3, 6].

A mistura utilizada consiste em ceras parafínicas e microcristalinas uma vez que as suas propriedades se complementam. Além disso, são incorporados aditivos, tais como o polietileno ou o *nylon*, que contribuem para o aumento da resistência dos modelos e a redução da contração da cera, com o intuito de aumentar o controlo dimensional. Estes materiais são muito viscosos à temperatura de utilização das ceras pelo que as frações utilizadas são limitadas [3, 6].

Os sistemas de gitagem, alimentação e os ataques são normalmente produzidos separadamente, e posteriormente montados num cacho. Os sistemas de gitagem e os alimentadores, devido à sua massividade, são submetidos a uma etapa de parafinação, que consiste numa imersão em parafina, para criar um revestimento. A parafina tem um ponto de fusão bastante inferior ao da restante cera, o que faz com que, no processo de descerificação, esta funda primeiro, deixando espaço para que os componentes massivos possam expandir-se sem danificar as carapaças [3, 6].

Na montagem e colagem dos modelos é utilizado um ferro previamente aquecido de modo a promover a rápida fusão da cera nas superfícies de contacto. É importante ter atenção à pressão utilizada durante o processo, até à solidificação da cera, de modo a assegurar que os modelos ficam devidamente colados ao gito [3, 6].

Alguns dos cuidados a ter envolvem o manuseamento dos componentes, evitando a danificação dos modelos ou salpicos de cera para a sua superfície, e garantindo que as zonas de ligação são resistentes e se apresentam isentas de fissuras e bem seladas [6].

3.3 Carapaça cerâmica

A carapaça cerâmica, ou moldação cerâmica, é produzida por aplicação, sobre o modelo de cera, de camadas sucessivas de barbotinas, intercaladas com camadas de areia de material refratário de reforço. As barbotinas são compostas por um refratário e ligantes, podendo conter antiespumantes, agentes molhantes e materiais de reforço, normalmente fibras, que têm o intuito de aumentar a resistência mecânica e a permeabilidade da carapaça [6].

O processo de produção da carapaça cerâmica inicia-se normalmente com uma lavagem dos cachos numa solução desengordurante de modo a remover lubrificantes e outras sujidades presentes na superfície. Este banho tem também o objetivo de aumentar a molhabilidade da cera de modo a aumentar a aderência da primeira camada de barbotina [3, 6].

Existem quatro tipos de camadas: primária, intermédia, de reforço e selante. A primeira camada é fulcral para o processo; deve reproduzir cada detalhe do modelo de cera, sendo diretamente responsável pelo ótimo acabamento superficial obtido em IC. O modelo de cera é imerso na barbotina selecionada, rodando continuamente, em torno do seu eixo vertical e segundo uma certa inclinação, de modo a obter um revestimento uniforme e a remover os excessos. Posteriormente, é depositada uma camada de areia (material refratário) de reforço, que cai sob a forma de “chuveiro”, ou por submersão num leito fluidizado destas partículas. As camadas intermédias são obtidas com uma barbotina de composição semelhante à primeira, e têm como objetivo colmatar quaisquer pequenas falhas de revestimento que possam ter ocorrido. As camadas subsequentes são consideradas de reforço, sendo utilizados refratários diferentes e de granulometria superior à das camadas precedentes de modo a conferir integridade e resistência à carapaça. O número de camadas depende da peça a produzir e do material a ser vazado. Cada camada endurece ao ar, durante várias horas, numa atmosfera com humidade controlada. A secagem pode ser forçada, apenas no caso das camadas de reforço, com recurso a ventilação mecânica. O número de camadas varia tendo em conta a peça a produzir e a liga a vazar, e está diretamente relacionado com a resistência e permeabilidade da carapaça. O processo termina com o banho selante, que consiste numa imersão apenas na barbotina de reforço, e que tem a função de agregar a última camada de areia. Depois desta camada, a carapaça passa por um estágio de secagem em condições de temperatura e humidade controladas, que pode variar entre as 24 e as 72 horas [3, 6].

Os cerâmicos refratários utilizados têm de conferir diversas propriedades à carapaça: elevada resistência à flexão, em verde, para aguentar o manuseamento e a descerificação, e sobretudo após sinterização, para suportar a pressão metalostática; estabilidade química, de modo a evitar a sua reação com as ligas vazadas; refratariedade suficiente para resistir às elevadas temperaturas de sinterização e vazamento; resistência a choques térmicos, para prevenir distorções e a sua fissuração durante o vazamento; permeabilidade adequada de modo a impedir o aprisionamento de ar durante o vazamento, o que iria provocar falhas de enchimento e defeitos superficiais; baixo coeficiente de expansão térmica, visando uma grande estabilidade dimensional; e facilidade de abate de modo a proporcionar uma remoção fácil do fundido após a sua solidificação [6, 14].

Entende-se assim que a barbotina utilizada tem impacto direto no sucesso de todo o processo de fundição IC. Por esta razão, a sua composição e o processo da sua produção e armazenamento devem ser cuidados de modo a obter uma barbotina estável e com as propriedades desejadas. Para ser considerada estável, a barbotina deve estar em constante agitação de modo a manter uma viscosidade uniforme. Esta estabilidade depende principalmente da agitação e das adições efetuadas [15].

3.3.1 Refratários

A nível industrial, os materiais refratários mais comumente utilizados nas barbotinas, para a produção de carapaças cerâmicas no processo de IC, são o zircão (ZrSiO_4), a sílica vítrea (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e vários tipos de aluminossilicatos.

Também são utilizadas zircônia (ZrO_2) e ítria (Y_2O_3) para o vazamento de algumas ligas mais reativas, como as de titânio [3]. A dimensão das partículas refratárias para a concessão das barbotinas é por norma inferior a 200 mesh [15].

Como já referido anteriormente, a primeira camada tem uma importância fulcral sobre o fundido produzido, sendo muito importante a escolha do refratário que a compõe. O zircão é o refratário utilizado pela grande maioria das fundições de IC na preparação desta camada. É o refratário de eleição para esta fase devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmica, que lhe confere grande estabilidade dimensional, baixa molhabilidade pelos metais fundidos, e à morfologia arredondada dos seus grãos, o que permite a reprodução de geometrias mais complexas. Atendendo à sua elevada densidade, é necessária uma maior massa de zircão comparativamente à de outros refratários [6].

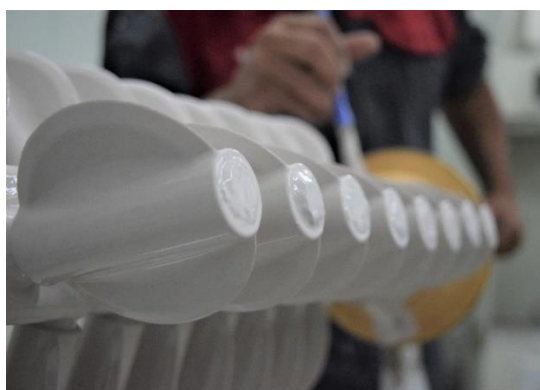


Figura 3 - Modelo de cera após a sua imersão em barbotina [2].

A sílica fundida utilizada apresenta-se normalmente no estado vítreo, sendo obtida por fusão de areia de quartzo, daí resultando um vidro que é posteriormente moído. Apresenta uma boa resistência ao choque térmico, sendo necessário ter em atenção a transformação alotrópica ($\beta \rightarrow \alpha$) que ocorre aos $573^\circ C$ na sílica quartzítica e que provoca uma expansão abrupta, que pode causar fissuração da carapaça. Esta transformação pode ser benéfica após o vazamento uma vez que faz com que a carapaça “estale” lentamente, facilitando o seu abate. Tem ainda a particularidade de ser facilmente solubilizável em soluções cáusticas, o que facilita a sua remoção em peças de geometria complexa, compreendendo zonas de difícil acesso [3, 6].

Os aluminossilicatos são uma mistura de sílica e alumina, sendo a mulite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) o mais utilizado a nível industrial. O teor de Al_2O_3 pode variar entre os 42 e os 72%. A única composição estável a temperaturas elevadas é a da mulite ($Al_2O_3 \approx 72\%$); teores de Al_2O_3 inferiores criam um défice de ligações para a sílica, passando a existir sílica vítrea livre. A refratariedade, bem como o seu preço, aumentam com o teor de Al_2O_3 . São muito utilizados no vazamento de ligas específicas, como as superligas, devido à sua elevada estabilidade e inércia química [3, 6].

A alumina é significativamente mais refratária que a sílica ou os aluminossilicatos, sendo também menos reativa relativamente aos metais a vazar. Devido ao seu elevado custo, apenas é utilizada no vazamento de superligas de níquel [3, 6].

3.3.2 Ligantes

Há três ligantes que são frequentemente utilizados na produção das barbotinas: a sílica coloidal, o silicato de etilo hidrolisado e o silicato de sódio.

A sílica coloidal é indubitavelmente o ligante mais utilizado, consistindo numa suspensão aquosa de partículas nanométricas de sílica vítrea. Apresenta um ótimo desempenho como ligante, sendo a sua maior desvantagem o facto de demorar bastante tempo a secar por se tratar de uma suspensão aquosa [3, 15].

O silicato de etilo tem como principal vantagem o tempo de secagem, que é bastante inferior ao da sílica coloidal, por se tratar de um ligante à base de álcool. Tem de ser hidrolisado a fim de conferir-lhe propriedades ligantes. Está a cair em desuso por ser um composto dispendioso, inflamável, representando um perigo em termos de higiene e segurança, e com algum impacto em termos ambientais [3, 6].

Quando se impõe utilizar um ligante de custo muito baixo, pode optar-se pelo silicato de sódio; no entanto, apresenta muitas limitações.

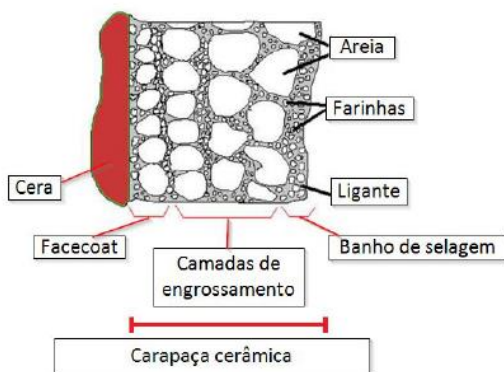


Figura 4 - Secção longitudinal da parede de uma carapaça cerâmica [16].

3.3.3 Outros componentes da barbotina

Além dos já listados, é comum a incorporação de outros componentes com o intuito de ajustar as propriedades das suspensões ao processo de IC:

- Agentes molhantes - são normalmente adicionados na primeira camada para promover a molhabilidade do modelo de cera pelas barbotinas devido à diminuição da tensão superficial. São exemplos de agentes molhantes o sulfato e o sulfonato de sódio. Quando adicionados em excesso, podem promover uma redução da durabilidade da barbotina [6, 15];
- Agentes antiespumantes - são utilizados em conjunto com os agentes molhantes. Têm a função de suprimir a formação de espuma durante a agitação da barbotina. Os álcoois gordurosos são um exemplo desses agentes [3, 6];
- Polímeros - o mais aplicado é o látex, em suspensões estabilizadas. Podem ser utilizados em todas as camadas. Têm como principais vantagens aumentar a aderência ao modelo de cera, a resistência em verde, a aderência das areias de reforço, a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade da carapaça, reduzindo também o risco da sua fissuração [6, 15].

3.3.4 Viscosidade

A viscosidade é uma medida das características de fluxo da barbotina, sendo um dos testes de controlo mais utilizados na indústria. O controlo da viscosidade é crucial na produção da camada primária e das camadas de reforço. Na fundição de IC, a viscosidade é medida usando um copo de viscosidade Zahn 4 [15].

Os viscosímetros utilizados para medir esta propriedade dos líquidos podem ser agrupados em sete categorias: capilares, de orifício, de alta temperatura, rotativos, de esfera descendente, vibracionais e ultrassónicos. Também existem vários viscosímetros que combinam as características de dois ou três tipos de viscosímetros anteriormente referidos. Alguns instrumentos são também automatizados para a medição contínua da viscosidade e para o controlo do processo [17].

Os viscosímetros de orifício são largamente utilizados na indústria devido à facilidade do ensaio e rapidez de obtenção de resultados. Um dos métodos mais simples de efetuar este ensaio é com o viscosímetro ou copo Zahn. Pode ser usado para determinar a viscosidade de tintas, vernizes, lacas e líquidos relacionados, como as barbotinas. Para medir a viscosidade, o copo é completamente imerso no líquido, e posteriormente retirado, sendo então medido o tempo de escoamento de todo o líquido através do orifício existente na sua parte inferior. Embora este equipamento possa ser usado para medir a viscosidade diretamente em tanques ou contentores, a medição ainda é aproximada. Os copos de viscosidade Zahn estão disponíveis em cinco tamanhos, de acordo com o diâmetro do orifício. A medição da viscosidade usando copos de viscosidade Zahn é geralmente feita à temperatura de 25°C. Para a monitorização da viscosidade a outra temperatura, é necessário determinar uma curva de correlação de temperatura ou fator de correção para cada líquido [17].

3.3.5 Areia de reforço

Não há grande variação no que diz respeito à composição e granulometria das areias de reforço de eleição usadas a nível industrial; é maioritariamente utilizada areia de zircão ou de aluminossilicatos, não havendo uma granulometria *standard*.

As areias de reforço têm um grande impacto sobre as propriedades da carapaça cerâmica. São utilizadas areias finas (125 µm) normalmente após a primeira camada de barbotina uma vez que as partículas de granulometria elevada poderiam penetrar esta camada e afetar a qualidade da superfície interna da carapaça. Nas camadas restantes, utilizam-se areias de calibre superior, entre os 0,25 e os 0,5 mm para a segunda camada e 0,5 e 1 mm para as camadas de reforço, que promovem um aumento da espessura da carapaça e, conseqüentemente, da sua resistência. Promovem também um aumento da fração de espaços livres entre os grãos, aumentando significativamente a permeabilidade da carapaça [3, 18].

Como se pode ver na Figura 5, a utilização de areias de maior calibre permite obter a mesma resistência, para um número de camadas bastante inferior. A título de exemplo, utilizando areias com granulometria entre os 30 e 50 *mesh*, Kline [18] obteve, com cinco camadas, uma carapaça cerâmica com uma resistência mecânica próxima da atingida com oito camadas de areia, com granulometria compreendida entre os 100 e 200 *mesh* [18].

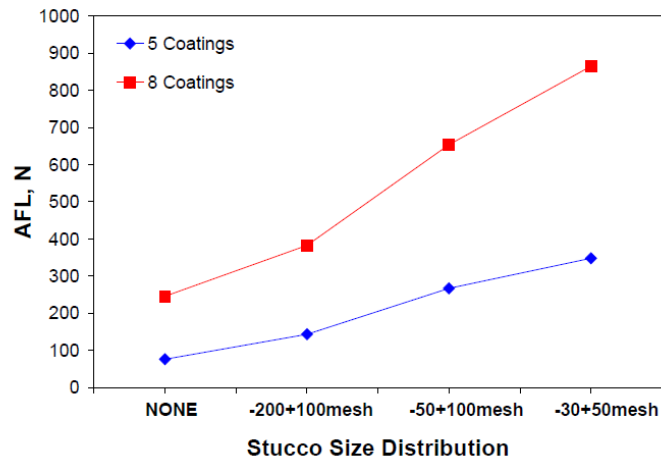


Figura 5 - Resistência à fratura de uma carapaça cerâmica vs. distribuição granulométrica e número de camadas de areia de reforço [18].

Além disso, pode ver-se na Figura 6 que a permeabilidade da carapaça aumenta significativamente com o calibre das partículas refratárias. Assim, o seu desempenho, em termos de resistência e de permeabilidade, será tanto melhor quanto maior o calibre dos grãos de refratário [18].

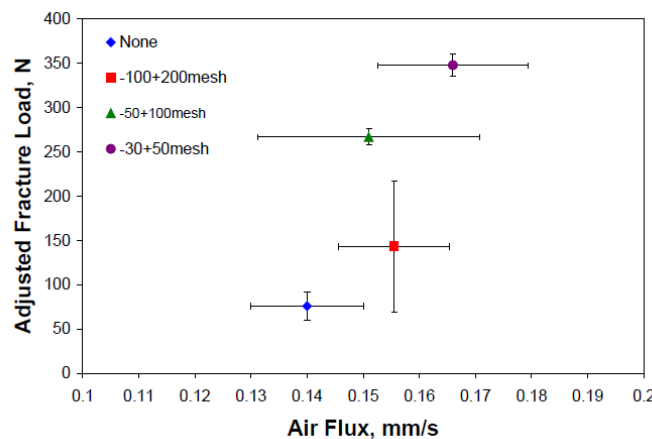


Figura 6 - Permeabilidade vs. resistência à fratura de uma carapaça cerâmica para diferentes distribuições granulométricas da areia de reforço [18].

Assim sendo, pode-se prever o efeito que a incorporação de finos de retornos, resultantes do abate das carapaças cerâmicas, irá ter nas carapaças: verificar-se-á uma diminuição significativa da sua resistência à fratura e, sobretudo, da sua permeabilidade. É, portanto, de capital importância encontrar uma solução para reverter, tanto quanto possível, esta situação, aumentando, de forma economicamente viável, ambas as propriedades da carapaça produzida.

3.4 Fibras

Vários estudos apontam para a utilização de fibras como reforço da barbotina, e, conseqüentemente, das carapaças cerâmicas usadas em IC. São maioritariamente fibras cerâmicas ou poliméricas, apresentando estas últimas um custo mais elevado [19-21]. Há

ainda vários estudos desenvolvidos sobre a utilização de fibras naturais, com resultados bastante promissores [19, 22, 23].

A utilização de fibras para promover uma melhoria das propriedades das carapaças cerâmicas tem impacto sobre vários parâmetros. Os materiais obtidos passam a comportar-se como compósitos, com as fibras a promoverem um aumento da resistência mecânica da carapaça, principalmente porque atuam como uma barreira bastante eficaz à propagação de fissuras. Isto ocorre uma vez que se dispõem segundo uma orientação paralela à dos revestimentos produzidos.

Além disso, as fibras aumentam consideravelmente a viscosidade da barbotina, obtendo-se assim carapaças mais espessas e menos porosas, comprometendo a sua permeabilidade e colapsabilidade, o que não é de todo desejável. A utilização de fibras poliméricas, ou qualquer outro componente orgânico, atenua o déficit de permeabilidade devido à combustão destes componentes na sinterização [4, 20, 24].

Fatores importantes, como a molhabilidade e aderência da barbotina às fibras, a superfície das fibras, o seu comprimento e espessura, bem como a sua distribuição, devem ser analisados e tidos em conta uma vez que determinam os seus efeitos sobre as propriedades mecânicas da carapaça cerâmica. Uma boa dispersão das fibras também é fulcral para que o seu efeito seja maximizado [20, 25].

3.4.1 *Fibras orgânicas*

A adição de fibras orgânicas é uma das possíveis soluções quando se pretende aumentar a resistência mecânica de uma carapaça cerâmica em verde. Tais fibras apresentam, logo à partida, vantagem sobre as fibras inorgânicas já que são mais compatíveis com o solvente da barbotina e mais fáceis de dispersar.

Analisando as fibras de *nylon* patentes na imagem da Figura 7, obtida em Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM), denota-se que as fibras de *nylon* apresentam uma superfície polida e lisa.

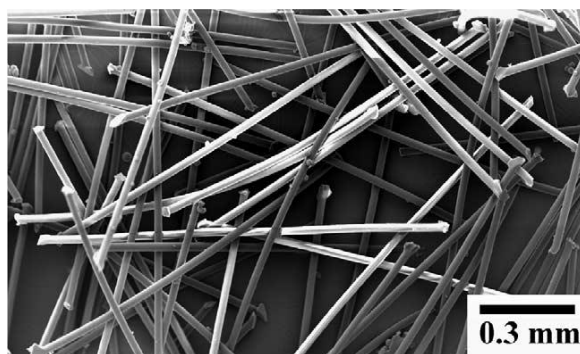


Figura 7 - Imagem obtida, em Microscopia Eletrónica de Varrimento, de fibras de nylon [20].

Na Tabela 1 pode-se verificar que as carapaças produzidas com barbotinas reforçadas com fibras de *nylon* apresentam maior espessura. Isto deve-se ao facto de as fibras reterem maior quantidade de barbotina aquando da secagem das várias camadas, aumentando assim o rendimento do processo ao permitir reduzir o número de camadas necessário para atingir uma determinada espessura, encurtando assim o tempo necessário para a produção de uma carapaça [20, 26].

Tabela 1 - Espessura de carapaças cerâmicas, com e sem incorporação de fibras de reforço de nylon [27]

Amostra	Estado	Espessura (mm)
Sem fibras	Verde	4,6
Com fibras de nylon	Verde	5,31

Na Figura 8 são apresentados os resultados obtidos por Huang *et al.* [19] nos ensaios de flexão de amostras de carapaças cerâmicas em verde, reforçadas com fibras de *nylon* e, a título comparativo, com fibras cerâmicas.

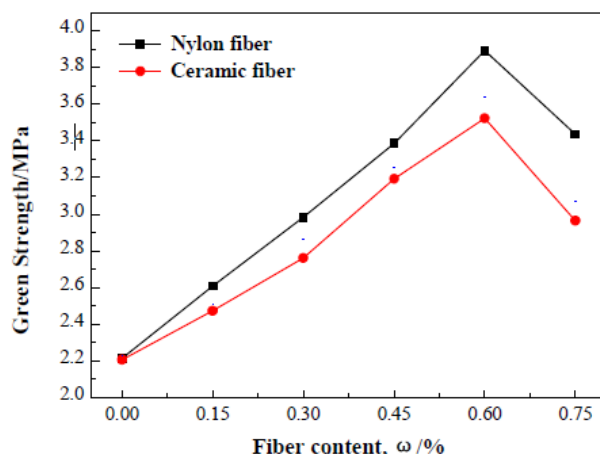


Figura 8 - Impacto da fração de fibras de nylon e de fibras cerâmicas na resistência em verde de carapaças cerâmicas [19].

Estes resultados vão de encontro ao expectável, *i.e.*, um aumento da resistência mecânica da carapaça cerâmica com a fração de fibras de *nylon*, sendo atingido um máximo para uma fração mássica de 0,6%; observa-se ainda um efeito mais pronunciado deste tipo de fibras relativamente ao das fibras cerâmicas. Este efeito deve-se a uma maior interação superficial entre as fibras e a matriz cerâmica provocada pelo maior diâmetro das fibras de *nylon*, em relação às cerâmicas. Como consequência, há uma maior área afetada pela presença das fibras, e menos locais para promover o crescimento de fissuras [28]. Após análise das superfícies de fratura, os autores observaram que as fibras tinham sido arrancadas da matriz cerâmica, o que é o esperado nestes sistemas [19].

Após sinterização, é de prever que a resistência das carapaças reforçadas com fibras de *nylon* decresça ligeiramente, devido à sua combustão. No entanto, no seu lugar, ficam micróporos que atuam como obstáculos à propagação das fissuras, levando a um aumento da resistência mecânica da carapaça para baixas frações de fibras de *nylon* [27, 29]. À medida que aumenta a fração mássica de fibras poliméricas, aumenta a quantidade de poros na matriz cerâmica após a sinterização, o que provoca uma diminuição acentuada da resistência à flexão (Figura 9), para valores inferiores aos obtidos em carapaças não contendo fibras de reforço [19].

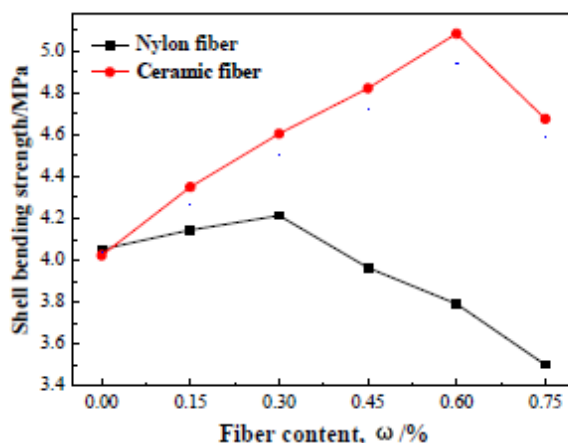


Figura 9 - Impacto da fração de fibras de nylon e de fibras cerâmicas na resistência à flexão de carapaças cerâmicas sinterizadas [19].

Quanto à permeabilidade, durante a sinterização da carapaça cerâmica, ocorre a combustão das fibras, criando-se assim uma rede de canais abertos. Esta porosidade promove um aumento da permeabilidade das carapaças (quase que triplica) relativamente à das carapaças sem fibras (Figura 10) [27].

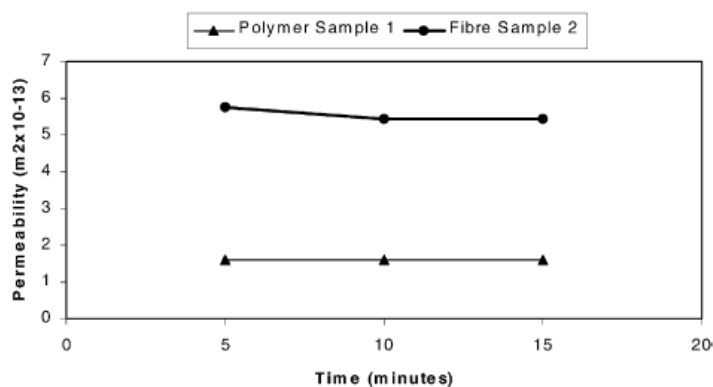


Figura 10 - Permeabilidade, a 800°C, de carapaças cerâmicas com e sem fibras de reforço [27].

Convém salientar que, no grupo das fibras orgânicas, existem outras alternativas às fibras de *nylon*, com resultados semelhantes em termos da resistência e permeabilidade das carapaças cerâmicas, nomeadamente fibras de polietileno, polipropileno e PVA [21, 30].

3.4.2 Fibras naturais

Como alternativa à utilização de fibras orgânicas sintéticas, foram desenvolvidos diversos estudos utilizando fibras naturais como, por exemplo, fibras de *typha*. É uma planta muito comum no hemisfério norte, também denominada de fogueteiro ou taboa.



Figura 11 - Imagem da typha em flor [31].

O interesse neste tipo de fibras surgiu no sentido de reduzir os custos relativamente às fibras orgânicas.

É de salientar que a incorporação destas fibras teve um efeito muito semelhante ao das fibras orgânicas: um aumento significativo da resistência em verde com a sua fração (Figura 12). As fibras desempenham um papel importante ao impedir a propagação das microfissuras, para além da sua capacidade de suportar cargas superiores. Foi também analisada a superfície de fratura, tendo Lü *et al.* [24] constatado que esta ocorre segundo o mesmo mecanismo que o das carapaças reforçadas com fibras de *nylon*

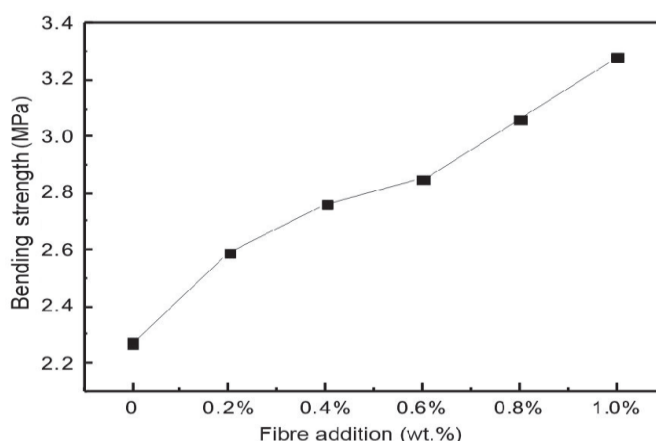


Figura 12 - Efeito da fração de fibras de typha sobre a resistência à flexão, em verde, de uma carapaça cerâmica [24].

Registaram igualmente um aumento significativo da resistência após sinterização, até uma fração mássica de 0,6% de fibras, sendo esse efeito atribuído ao bloqueio da propagação de fissuras promovido pelos poros resultantes da combustão das fibras durante a sinterização. Entretanto, como se pode observar na Figura 13, para frações mais elevadas, regista-se um decréscimo da resistência à flexão [24]. Isto deve-se a uma aglomeração de fibras que provoca, após sinterização, o aparecimento de vazios, de dimensões consideráveis, que resultam num decréscimo considerável da secção efetiva da carapaça. Ademais, existe a possibilidade desses vazios tomarem o papel de criadores e propagadores de fissuras.

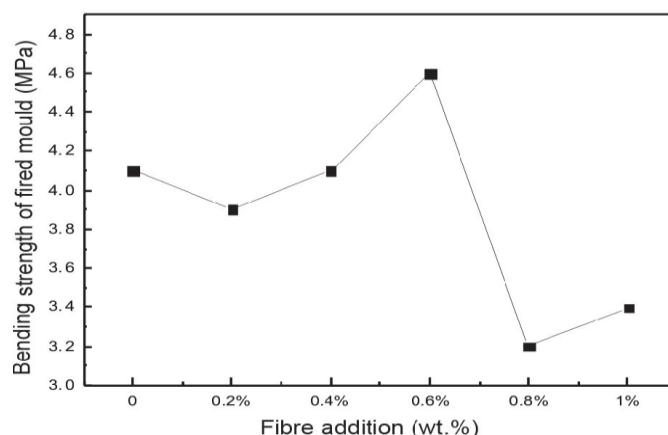


Figura 13 - Impacto da fração de fibras de *typha* sobre a resistência à flexão numa carapaça cerâmica após sinterização [24].

Relativamente à permeabilidade, as fibras de *typha* têm o mesmo efeito que as orgânicas; após a sua combustão, na sinterização, ficam canais abertos, registando-se um aumento significativo da permeabilidade da carapaça cerâmica.

Há ainda alguns estudos, com resultados interessantes, sobre compósitos cerâmicos cujo reforço são cinzas de casca de arroz e fibras de caniço [22, 32].

A incorporação de cinzas de casca de arroz, muito ricas em sílica, tem efeitos significativos sobre a resistência à fratura das carapaças cerâmicas [22].

3.4.3 Serrim

O serrim é um resíduo produzido pela indústria da madeira, e pode ser considerado uma variante de fibras naturais. A adição de serrim como reforço revelou ser bastante promissora. O serrim promove um aumento da retenção da barbotina, encurtando os ciclos de produção das carapaças [23].

Em relação à resistência em verde, há um acréscimo substancial nas amostras reforçadas com serrim. Analisando mais a fundo o compósito, o autor constatou que as partículas de serrim aderiam totalmente à barbotina, promovendo a formação de uma interface bastante forte e de difícil remoção. Além disso, como o serrim tem uma densidade bastante inferior à das fibras, será possível aumentar o volume de adição para a mesma fração mássica.

Durante a sinterização da carapaça, a grande maioria do serrim é combustada, deixando no seu lugar poros, alguns deles de dimensões indesejáveis. Isto promove um decréscimo da resistência após sinterização da carapaça em relação à das carapaças que não contêm serrim [23].

No entanto, há um aumento bastante interessante da permeabilidade, tendo Pattnaik [23] registado aumentos de 74% no volume de poros e de 20% na permeabilidade

3.4.4 Fibras cerâmicas

Atendendo à sua fácil combustão, as fibras naturais e orgânicas geram um problema: a libertação de gases poluentes durante a sua combustão. Com a crescente preocupação ambiental, é pertinente considerar a adição de fibras inorgânicas à barbotina de modo a analisar o seu efeito na resistência da carapaça [33].

As fibras de aluminossilicatos (75% Al_2O_3 e 25% SiO_2) são um exemplo de fibras inorgânicas que apresentam uma composição muito semelhante, ou até mesmo igual, à da barbotina e, conseqüentemente, elevada compatibilidade química e molhabilidade, para além de baixo custo [33].

Analisando os gráficos das Figuras 14 (a) e (b), é evidente que a adição destas fibras tem um claro impacto sobre as propriedades da carapaça. É perceptível o aumento da resistência à tensão mecânica com o aumento da fração mássica de fibras adicionadas. Na Figura 14 (b) há que realçar o desempenho das fibras cerâmicas, relativamente às fibras poliméricas de *nylon*, no comportamento da carapaça após a sinterização. Denota-se ainda um decréscimo na resistência a partir dos 0,6%. Este decréscimo não é exclusivo das fibras cerâmicas, e já foi observado em vários estudos sobre esta temática [19, 20, 24, 34]. É normalmente atribuído a uma maior dificuldade na dispersão uniforme das fibras a partir dos 0,6%, criando aglomerados. No entanto, a resistência da carapaça, para frações de fibras cerâmicas superiores a 0,6%, continua a ser superior à de uma carapaça não contendo fibras [19].

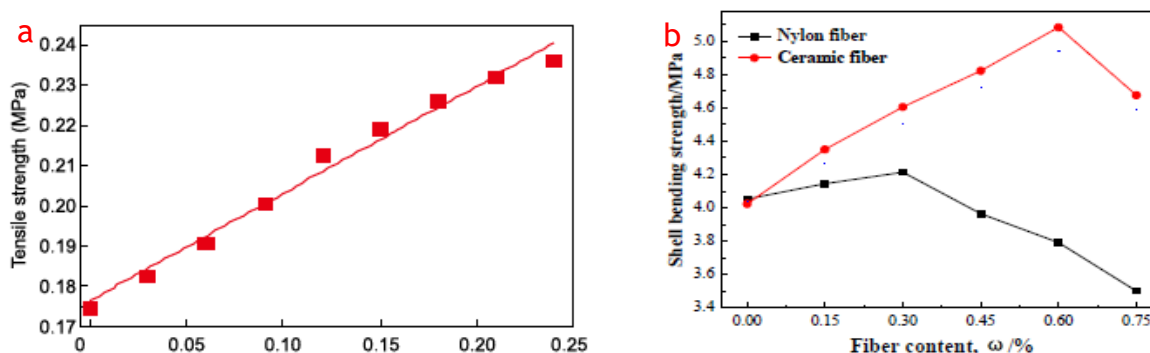


Figura 14 - Impacto da fração de fibras cerâmicas sobre a resistência à flexão de carapaças cerâmicas sinterizadas [19, 33]

O incremento da resistência é ainda função da temperatura de sinterização das carapaças, não sendo exclusivo das carapaças contendo fibras. Pode então inferir-se que este se deve ao aumento da coesão das ligações entre os grãos de refratário previamente desagregados e o ligante coloidal, proporcionado pela sinterização a uma temperatura mais elevada.

É também notório (Figura 15) o aumento da resistência à tração relativamente à de uma carapaça não contendo fibras [33]. As duas quedas abruptas de resistência patentes no gráfico são explicadas, respetivamente: pela evaporação da água remanescente na carapaça (200°C), levando ao decréscimo da sua plasticidade e conseqüentemente da resistência, e pela transformação alotrópica ($\beta \rightarrow \alpha$) que a sílica sofre a 573°C [33].

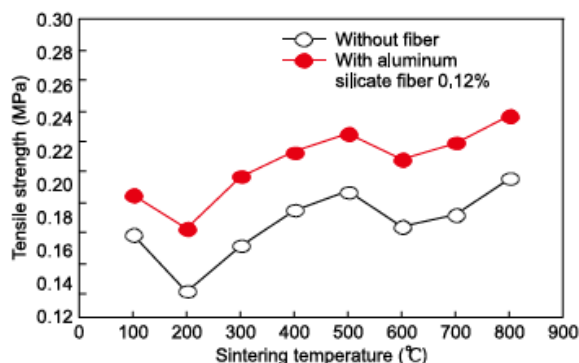


Figura 15 - Impacto da fração de fibras de aluminossilicatos e da temperatura de sinterização sobre a resistência à tração de carapaças cerâmicas [33].

Quanto à permeabilidade, visto que as fibras inorgânicas não combustam, permanecendo inalteráveis na carapaça mesmo após a sinterização, é de esperar que não haja nenhum efeito benéfico sobre essa propriedade visto que não vão ser criados os canais porosos como os resultantes da combustão das outras fibras. Pode até acontecer exatamente o contrário, devido ao aumento da viscosidade da barbotina, e consequente aumento da espessura da carapaça.

Há ainda a possibilidade de a resistência da carapaça, após sinterização, se tornar demasiado elevada, comprometendo a sua colapsabilidade [34].

Como alternativa, podem ser utilizadas fibras de vidro. No entanto, devido ao seu elevado teor de SiO_2 , a diminuição de resistência associada à sua transformação alotrópica é muito mais significativa do que com as fibras de aluminossilicatos, continuando a não haver nenhum benefício em termos de permeabilidade. Há, no entanto, uma diminuição da contração da carapaça durante a sinterização [35].

3.4.5 Sistema de fibras híbrido

Atentando aos dados bibliográficos recolhidos sobre a utilização de fibras orgânicas/naturais e inorgânicas no reforço das carapaças cerâmicas, é perceptível que as inconveniências de umas correspondem às vantagens das outras. As fibras orgânicas são combustadas durante a sinterização, deixando no seu lugar poros que aumentam bastante a permeabilidade da carapaça; poderá verificar-se uma diminuição da sua resistência mecânica. Com as fibras inorgânicas, verifica-se exatamente o oposto: não se verifica a combustão dessas fibras, e a carapaça mantém a sua resistência, havendo até o seu aumento após sinterização; não se regista qualquer benefício em termos de permeabilidade. É então pertinente considerar a utilização de um sistema de fibras híbrido, em que se utilizem fibras orgânicas e inorgânicas.

Analise-se então um sistema em que foram adicionadas à barbotina fibras orgânicas de polipropileno e inorgânicas de aluminossilicatos, num rácio (mássico) de 1:1. Verifica-se, da análise do gráfico da Figura 16, que a adição das fibras teve um efeito semelhante ao dos outros sistemas já abordados; no que toca à resistência em verde, regista-se o seu aumento, superior a 30%, com a fração de fibras [34].

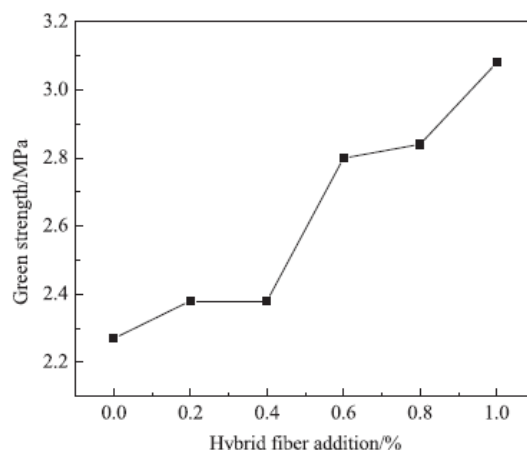


Figura 16 - Impacto da fração de fibras híbridas sobre a resistência em verde de carapaças cerâmicas [34].

É na resistência após sinterização e na permeabilidade que pode haver um maior impacto desta hibridização uma vez que as fibras de polipropileno irão combuster-se, originando porosidade aberta, o que não se verificará com as fibras de aluminossilicatos. No gráfico da Figura 17 é bem patente o aumento de aproximadamente de 20% na resistência à flexão, após sinterização, até uma fração de fibras de 0,6% (% em peso) [34]. Isto deve-se ao sistema híbrido de reforço: as fibras de aluminossilicato ainda se encontram na matriz cerâmica, mantendo o seu papel de travão à propagação das fissuras. Quanto às fibras de polipropileno, apesar de terem sido combustadas, deixam no seu lugar micróporos que retardam a propagação de fissuras. Há, no entanto, uma queda abrupta da resistência para frações superiores 0,6%, em consequência da aglomeração das fibras.

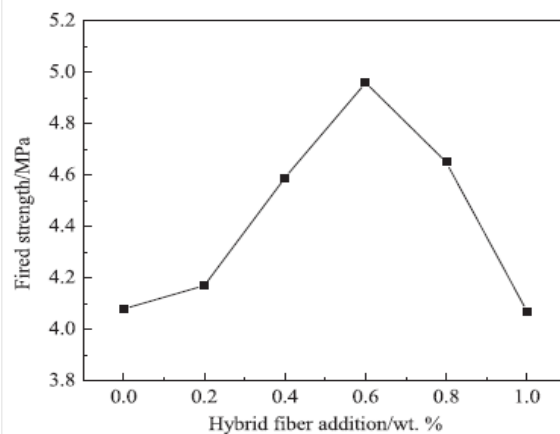


Figura 17 - Impacto da adição de fibras híbridas na resistência à flexão de carapaças cerâmicas após sinterização [34].

Foi também avaliada a resistência da carapaça ao amolecimento a alta temperatura (1200°C), tendo sido constatado por Lü *et al.* [34] que a adição de fibras híbridas se revelou benéfica até frações de 0,4% (% em peso), com um decréscimo da deformação de 0,8 para 0,6%, relativamente à das carapaças sem fibras de reforço. Para frações superiores a 0,4%, os vazios gerados pela combustão das fibras de polipropileno são demasiado grandes, provocando um aumento abrupto da deformação para 1,4%.

No que concerne à permeabilidade, os resultados obtidos assemelham-se aos dos sistemas contendo fibras orgânicas ou naturais: regista-se o seu aumento consubstancial

com a fração de fibras. Em contrapartida, num sistema híbrido, não se verifica o comprometimento da resistência, que está associado à combustão das fibras orgânicas. Há sim manutenção a integridade da carapaça, provocada pela presença de fibras inorgânicas, inertes às variações térmicas.

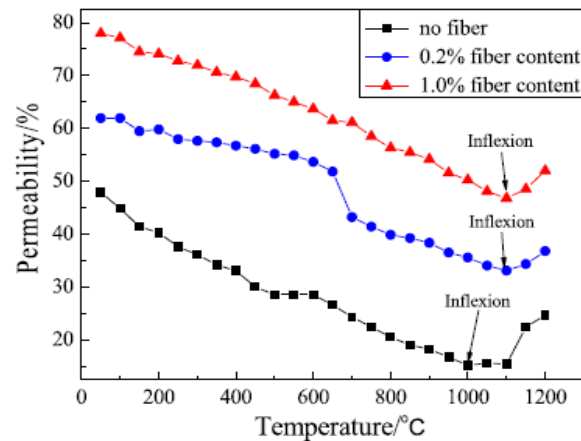


Figura 18 - Permeabilidade de carapaças cerâmicas vs. fração de fibras de reforço híbridas e temperatura de sinterização [34].

3.4.6 Métodos de adição de fibras

A orientação e distribuição das fibras na matriz dependem do processo utilizado para a sua incorporação na carapaça cerâmica.

Na Figura 19 estão patentes os resultados de análises aos efeitos de três processos distintos. O primeiro consiste na adição das fibras diretamente na barbotina, promovendo-se a sua mistura por agitação mecânica. No segundo método, as fibras foram adicionadas ao ligante de sílica coloidal, e misturadas por agitação ultrassônica. Este ligante foi posteriormente utilizado para produzir a barbotina. No terceiro método, as fibras foram misturadas com a areia refratária de reforço, tendo a mistura sido posteriormente adicionada, através de “chuveiro”, entre deposições de camadas de barbotina [36].

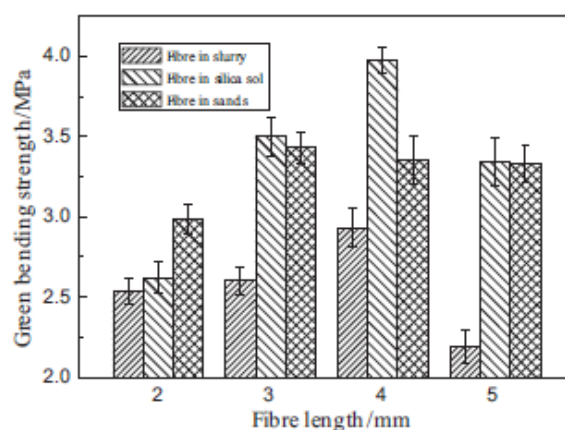


Figura 19 - Influência do comprimento das fibras, e dos processos da sua incorporação, na resistência à flexão em verde de carapaças cerâmicas [36].

Quando as fibras são adicionadas à barbotina ou ao ligante, todas apresentam a mesma orientação (Figura 20), sendo essa orientação a que oferece maior resistência à

propagação de fissuras. No caso das fibras serem adicionadas às areias de reforço, registra-se uma maior dispersão e aleatoriedade em termos da sua orientação [36].

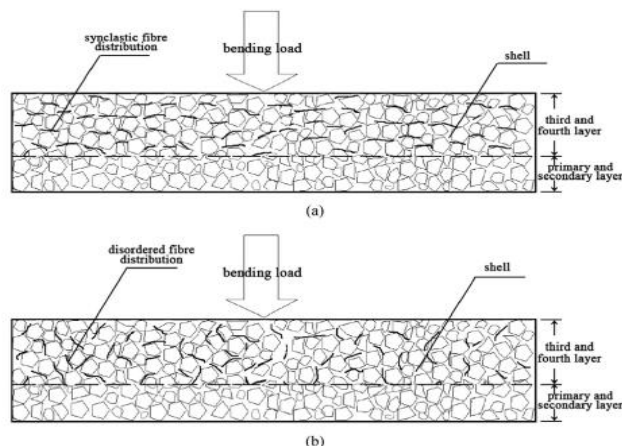


Figura 20 - Orientação das fibras incorporadas em: a) barbotina e ligante; b) areias de reforço [36].

De acordo com alguns estudos, os resultados obtidos com as carapaças em que as fibras foram adicionadas à barbotina ficaram muito aquém do esperado devido ao método de mistura utilizado. A mistura mecânica das fibras promove a sua fratura devido ao impacto, tornando-as bastante mais pequenas, comprometendo assim a resistência mecânica da carapaça. É possível concluir que, idealmente, as fibras devem ser adicionadas ao ligante e misturadas através de agitação ultrassónica [25].

3.4.7 Mecanismos de fratura

Atendendo ao processo de fabrico das carapaças cerâmicas, as fibras tendem a distribuir-se pela matriz segundo uma direção perpendicular à da propagação das fissuras [29]. Quando a carapaça é sujeita a esforços mecânicos (Figura 21), geram-se inúmeras microfissuras na matriz cerâmica (a). As microfissuras crescem até encontrarem resistência, oferecida pelas fibras (b). Com o aumento progressivo da carga, as microfissuras atingem a interface matriz-fibra (c). Como não conseguem atravessar as fibras, devido à sua elevada resistência, as fissuras propagam-se ao longo da interface (d), que apresenta menor resistência, até que a fissura atinge dimensão suficiente para comprometer a integridade do sistema fibra-matriz; assiste-se então ao arrancamento da fibra [33]. É comum ocorrer a fratura de fibras em consequência dos esforços mecânicos

da carapaça. Este fenómeno ocorre devido ao aumento contínuo da carga externa, e, quase concomitantemente, ao arrancamento da fibra da carapaça [29].

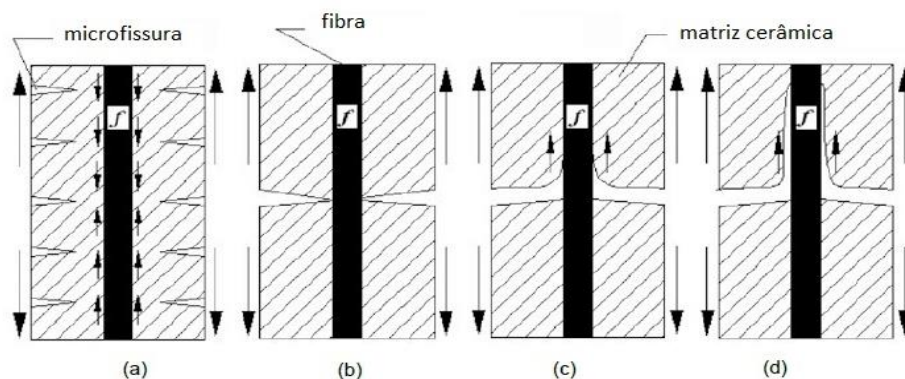


Figura 21 - Representação esquemática da propagação de microfissuras num compósito de matriz cerâmica reforçado com fibras [33].

O desempenho da carapaça cerâmica está diretamente relacionado com a aderência entre as fibras e a matriz, e a resistência mecânica deste compósito [29]. É importante compreender de que maneira se pode tirar proveito destas características. Quanto melhor for a afinidade das fibras relativamente à carapaça, melhor será a ligação mecânica que existe entre elas. Uma ligação mais coesa torna bastante mais difícil o arrancamento das fibras da matriz cerâmica, pelo que a resistência mecânica da carapaça será superior. Quanto maior for a energia despendida a quebrar ou a arrancar as fibras da matriz, menor será a energia disponível para a criação, propagação e crescimento de fissuras [20, 27]. A orientação das fibras na matriz desempenha igualmente um papel importante, sendo crucial que se disponham segundo uma direção perpendicular à da propagação das fissuras [29].

No caso das fibras inorgânicas, como as fibras de aluminossilicatos ou de vidro, o seu comportamento pode ser bastante diferente após a sinterização da carapaça cerâmica pois ocorre a sua fusão, parcial ou total, alterando-se assim a sua morfologia e interação com o sistema. Em geral, as consequências da fusão dessas fibras são benéficas em termos de resistência mecânica da carapaça. No entanto, caso não haja uma distribuição regular das fibras, assistindo-se à sua aglomeração, regista-se um decréscimo da resistência à fratura das carapaças cerâmicas [29].

Na Figura 22 (a) e (b) está esquematizado o efeito benéfico do aumento da temperatura sobre o reforço da resistência mecânica das carapaças cerâmicas promovido pelas fibras inorgânicas. O aumento da temperatura provoca o amolecimento das fibras, daí resultando alterações da sua morfologia e diâmetro, criando uma estrutura semelhante à representada na Figura 22 (a). Para além disso, fibras que estejam de algum modo sobrepostas acabam por interconectar-se, resultando numa estrutura em rede, semelhante à patente na Figura 22 (b). Em ambos os casos, a alteração na morfologia das fibras provoca um aumento da interação superficial com a carapaça, que aumenta a resistência oferecida pelas fibras ao arrancamento, *i.e.*, a energia necessária para a propagação de fissuras durante a solicitação mecânica.

Por sua vez, a Figura 22 (c) esquematiza a aglomeração das fibras, provocada pelo aumento da temperatura, aliada a uma distribuição irregular pela matriz cerâmica. Esta

problemática cria descontinuidades na malha de fibras devido à sua aglomeração, tornando a carapaça heterogênea em termos de resistência, resultando em zonas de maior fragilidade que comprometem o seu desempenho [29].

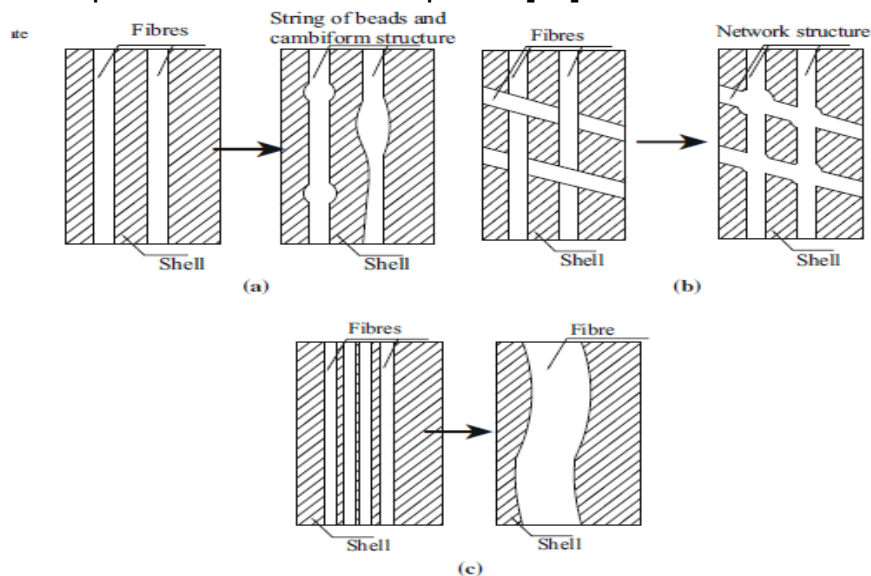


Figura 22 - Alterações provocadas pelo aumento da temperatura nas fibras cerâmicas de reforço de uma carapaça de IC: (a),(b) - reforço da carapaça; (c) - enfraquecimento da carapaça [29].

3.4.8 *Influência do tamanho das fibras*

Um método simples para fazer frente ao sistema de falha anteriormente enunciado, assenta no aumento do comprimento das fibras de reforço. Fibras de maiores dimensões têm uma maior superfície de aderência com a matriz, oferecendo maior resistência ao seu arrancamento. Há, no entanto, limites uma vez que a utilização de fibras demasiado grandes se torna prejudicial [36].

Tal como analisado anteriormente (Figura 19), é evidente o efeito que o comprimento das fibras tem sobre a resistência à flexão em verde de carapaças cerâmicas.

As carapaças foram produzidas de modo idêntico, tendo sido adicionadas fibras com 2, 3, 4 e 5 mm de comprimento, para as mesmas frações mássicas. É bem evidente o aumento da resistência com o comprimento das fibras. Denota-se um decréscimo da resistência no caso da incorporação de fibras com 5 mm de comprimento devido a uma maior dificuldade em distribuí-las pela matriz. Efetivamente, quanto maiores forem as fibras, mais fácil é a sua aglomeração. A utilização de fibras de maiores dimensões também faz com que a quantidade de fibras presentes num determinado volume seja menor, comparativamente a fibras mais pequenas, havendo menor concentração de fibras na matriz e, conseqüentemente, um aumento significativamente menor da resistência mecânica das carapaças cerâmicas[36].

A superfície das fibras pode ser alterada mediante a utilização de reagentes químicos, como, por exemplo, o silano, promovendo-se assim um aumento da sua molhabilidade [19].

3.5 Recuperação de carapaças cerâmicas

Devido ao constante aumento populacional, há cada vez maior demanda dos recursos naturais. O aumento da pressão exercida sobre o nosso planeta é não só insustentável do ponto de vista ecológico, como do ponto de vista económico, uma vez que a inevitável escassez dos recursos provoca um aumento do seu custo. Mesmo a reciclagem de alguns materiais tem muitas vezes associadas emissões poluentes. Estes fatores tornam cada vez mais urgente a recuperação e reutilização de matérias-primas, no contexto da Economia Circular [37, 38].

Neste trabalho, foi implementada a reutilização de areias provenientes da recuperação de carapaças cerâmicas de IC. As carapaças, após o seu abate, podem ser desprovidas de quaisquer contaminantes e moídas até à granulometria desejada.

3.5.1 Contaminantes

Uma das características dos refratários utilizados nas primeiras camadas das carapaças cerâmicas de IC é a sua baixa reatividade relativamente ao metal vazado. Por este motivo, a fração de contaminantes metálicos nestes resíduos é ínfima, praticamente nula, podendo ser desprezada.

Relativamente aos componentes orgânicos da cera, todos são removidos na sua totalidade no processo de descerificação, e os resíduos remanescentes são eliminados durante a sinterização a alta temperatura, ou no pré-aquecimento da carapaça.

3.5.2 Processo de recuperação

O processo de recuperação das carapaças é bastante simples, e passa apenas por etapas de moagem e crivagem, até à granulometria pretendida. Há dois tipos de moinhos predominantes: planetário, e de bolas.

O moinho planetário consiste num disco em rotação, com dois cilindros ocos girando em sentido oposto ao do disco (Figura 23). Dentro dos cilindros, além do material a moer, são colocadas esferas de material duro (aço, alumina, WC) conforme o material a moer. Neste processo, a velocidade e o ângulo de impacto das partículas são um fator importante em termos da energia transferida e, consequentemente, da moagem. A velocidade angular do disco tem um impacto direto nestes parâmetros [39, 40].

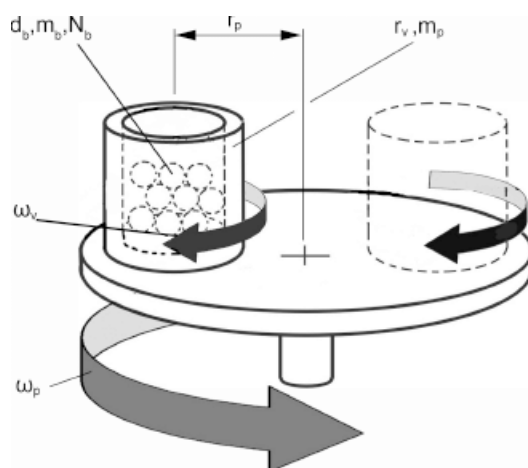


Figura 23 - Esquema do funcionamento de um moinho planetário [39].

O moinho de bolas consiste num cilindro em rotação em torno do seu eixo horizontal. No seu interior coloca-se o material a moer, as bolas de material duro (agente de moagem) e, em alguns casos, um líquido de refrigeração. O rácio entre os agentes de moagem e o material a moer pode ser alterado de modo a regular a granulometria pretendida; quanto maior for esse rácio, menor a granulometria do produto final. A velocidade de rotação também tem um papel importante no processo de moagem uma vez que, quanto maior for o seu valor, maior o impacto entre as partículas. Há, no entanto, um limite para essa velocidade, denominado velocidade crítica, correspondente a 70-80% (para partículas cerâmicas) da velocidade necessária para as bolas ficarem “agarradas” às paredes do tambor por ação da força centrífuga. É um processo bastante simples e universal [41].

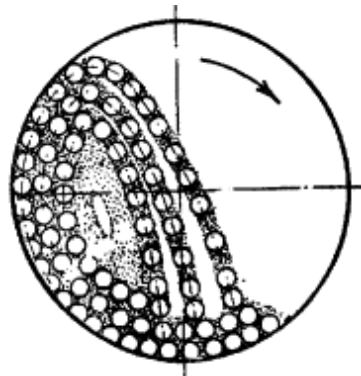


Figura 24 - Esquema do funcionamento de um moinho de bolas numa operação de moagem [41].

3.6 Descerificação e sinterização

É nesta etapa que a cera é removida do interior da carapaça cerâmica. Este é o estágio do processo em que a carapaça cerâmica está sujeita a maiores tensões já que, com o aumento da temperatura, necessária para a fusão e escoamento da cera, regista-se uma expansão acentuada da cera, bastante superior à da carapaça cerâmica. Esta diferença entre coeficientes de dilatação térmica, que pode atingir uma ordem de grandeza, é responsável por uma enorme pressão, que pode promover a fissuração e até mesmo a fratura da carapaça cerâmica [3, 6].

A solução para este problema passa pelo aquecimento rápido da superfície da carapaça, promovendo a fusão da superfície do cacho de cera, sem que o seu interior aqueça demasiado, diminuindo assim a sua expansão e as tensões daí resultantes. Ainda assim, as tensões associadas são muito elevadas, pelo que a carapaça deve ser o mais resistente possível. Existem vários meios de descerificação, com processos e equipamentos distintos, sendo os mais utilizados o *flash-fire* e a autoclave [3, 6].

O método de descerificação por autoclave é o mais utilizado a nível industrial, tendo surgido inicialmente como alternativa mais ecológica ao *flash-fire*, reduzindo as emissões gasosas poluentes. O processo desenrola-se numa câmara de vapor de água a alta pressão. A pressão atua de forma favorável, balanceando as forças que atuam sobre a carapaça, e no sentido contrário ao da expansão da cera. O rápido aumento da temperatura, para valores entre os 160 e 190°C, e da pressão, até aproximadamente 9 bar, permite o aquecimento célere da superfície da carapaça e a rápida remoção da cera.

Com a aplicação de um sistema de escoamento, é possível a recuperação da cera para ser reutilizada no fabrico de sistemas de gitagem e alimentação [3, 6].

Na descerificação por *flash-fire*, as carapaças sofrem um choque térmico, sendo colocadas num forno pré-aquecido a temperaturas entre os 1000 e os 1100°C. É utilizado um forno elétrico com aquecimento por resistências, que está equipado com um sistema para escoamento da cera. Devido à elevada temperatura, alguma da cera é combustada, fazendo com que haja uma deterioração mais acentuada do que no processo em autoclave. No entanto, a cera remanescente ainda pode ser reutilizada de forma satisfatória. O forno tem de estar equipado com filtros ou sistemas de purificação dos gases (altamente poluentes) que são emitidos. A remoção da cera pode demorar entre os 15 e os 30 minutos [3, 6].

Em ambos os processos, podem ser abertos pequenos furos em zonas críticas da carapaça, em que a massividade do modelo de cera seja muito elevada, para facilitar a saída da cera sem fissuração ou fratura.

Posteriormente à descerificação, é necessário submeter as carapaças a um ciclo térmico de sinterização, que tem como objetivo promover uma melhor aderência e agregação da cerâmica, a remoção da humidade e de quaisquer voláteis remanescentes (no caso da descerificação ter sido realizada em autoclave). Pequenas fissuras ou furos existentes na superfície da carapaça podem ser reparados com pasta cerâmica antes desta etapa. A sinterização ocorre a temperaturas entre os 900 e os 1100°C. No caso da descerificação por *flash-fire*, a sinterização pode ocorrer no mesmo ciclo térmico uma vez que a gama de temperaturas é semelhante, bastando para isso aumentar a duração do ciclo. No caso da descerificação em autoclave, o ciclo de sinterização é feito separadamente [3, 6].

Imediatamente antes do vazamento, há necessidade de promover o pré-aquecimento da carapaça, a fim de minimizar o choque térmico. A temperatura de pré-aquecimento varia em função da liga a vazar, e o ciclo térmico pode coincidir com o da sinterização [3, 6].

3.7 Ensaios de permeabilidade, resistência mecânica e de dilatométrica de carapaças cerâmicas

A permeabilidade e a resistência à fratura são as duas propriedades com maior impacto sobre a *performance* das carapaças cerâmicas. Como anteriormente referido, a resistência das carapaças, tanto à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, é crucial para garantir o seu desempenho durante o manuseamento e vazamento, em que terão de suportar a pressão metalostática de forma a assegurar a integridade dimensional. Já a permeabilidade é crucial no processo de descerificação, muito embora tenha igualmente um papel preponderante durante o vazamento, para assegurar que os gases aprisionados se escapam, prevenindo o aparecimento de defeitos nos fundidos.

Assim, é fulcral que estas propriedades sejam avaliadas da melhor e mais representativa maneira possível.

3.7.1 Permeabilidade

A permeabilidade não é uma propriedade intrínseca de um material, mas sim da sua interação com um fluido. Por isso, diferentes métodos de análise proporcionam resultados distintos.

O método mais comum e mais aceite entre os investigadores consiste na produção de um corpo de teste, com dimensões semelhantes às de uma bola de ténis, apresentando um orifício à sua superfície. Estes corpos são produzidos, como se pode ver na Figura 25, segundo o processo de fabrico de uma carapaça cerâmica, incluindo a sinterização [42].

Posteriormente, esse orifício é conectado a uma mangueira, sendo a união devidamente selada para evitar fugas de gás. Procede-se então à insuflação de um gás, a um débito e pressão estipulados, para o interior do corpo de teste. O gás atravessa os poros, sendo libertado a uma determinada pressão que é medida por um manómetro. Utilizando o equipamento adequado, este método permite até mesmo determinar a permeabilidade da carapaça cerâmica à temperatura de vazamento.

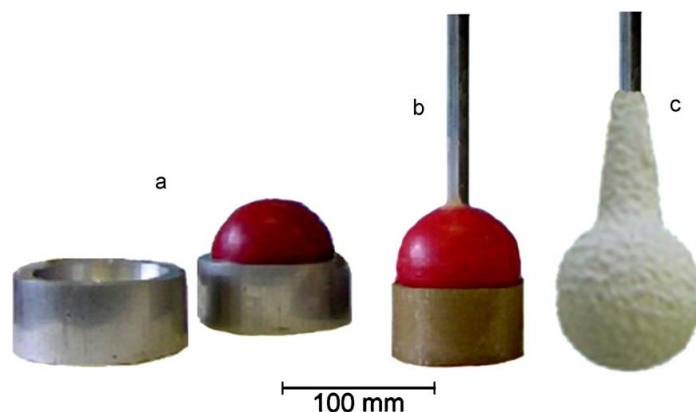


Figura 25 - Corpo de teste para ensaios de permeabilidade de carapaças cerâmicas [42].

A permeabilidade é calculada utilizando a lei de Darcy integrada, relacionando-a com a pressão e o fluxo de gás [14, 42]:

$$k = \frac{Q * \mu * T}{A * \Delta P} \quad (1)$$

em que k é coeficiente de permeabilidade (em cm^2), Q o fluxo de ar (em cm^3/s), μ a viscosidade do gás (em $\text{N.s}/\text{m}^2$), T a espessura do corpo de prova (em cm), A a área superficial interna do corpo de prova (em cm^2) e ΔP a diferença de pressão (em N/m^2).

3.7.2 Resistência à fratura

Para avaliar a resistência à fratura de uma carapaça cerâmica deve realizar-se um ensaio de flexão de modo a determinar o módulo de rotura (MOR). Estes ensaios devem ser realizados sobre provetes em verde e após sinterização [14].

Há dois tipos distintos de ensaios de flexão que, apesar de serem muito semelhantes, conduzem a resultados distintos. São eles o ensaio de flexão em três pontos (EF3), e em quatro pontos (EF4). Em ambos, utiliza-se como provete um bloco paralelepípedo, com dimensões estabelecidas [43].

No EF3, o provete fica apoiado em dois pontos equidistantes do seu centro, onde vai ser aplicada a carga. Neste ensaio, a zona sujeita a tensão mais elevada, e onde irá provavelmente ocorrer a rotura, situa-se exatamente por baixo do ponto em que é aplicada a carga [43, 44].

Já no EF4, o provete fica igualmente apoiado em dois pontos equidistantes do seu centro, mas a carga é aplicada em dois outros pontos, mais próximos do centro, mas igualmente equidistantes deste (Figura 26). Neste caso, a zona sob carga é mais extensa, tornando este ensaio mais representativo do que ocorre em situação real [43].

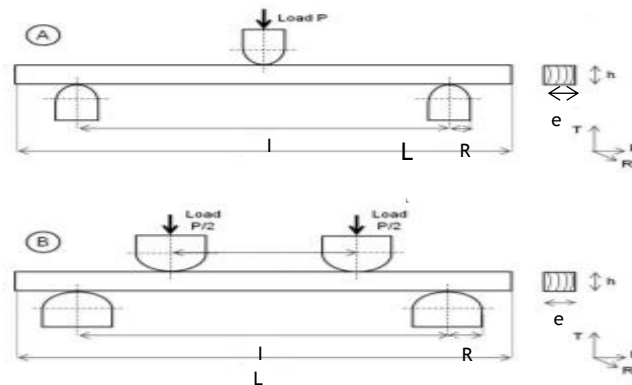


Figura 26 - Determinação da resistência à fratura de carapaças cerâmicas: a) ensaio de flexão em três pontos (EF3); b) ensaio de flexão em quatro pontos (EF4) [43].

O módulo de rotura, obtido no ensaio EF3, é calculado a partir da equação [43]:

$$MOR_3 = \frac{3 \cdot F_3 \cdot L}{2 \cdot e \cdot h^2} \quad (2)$$

em que F_3 representa a carga aplicada (em N), L a distância entre os dois pontos de apoio (em m), e e e h a largura e a espessura (em m) do provete, respetivamente.

Por sua vez, no ensaio EF4, o módulo de rotura é obtido a partir da equação [43]:

$$MOR_4 = \frac{3 \cdot F_4 \cdot (L - a)}{2 \cdot e \cdot h^2} \quad (3)$$

em que F_4 representa a carga aplicada (em N), L a distância entre os dois pontos de apoio (em m), a a distância entre os pontos de aplicação da carga (em m), e e e h a largura e a espessura (em m) do provete, respetivamente.

Os resultados obtidos em cada um dos ensaios são substancialmente diferentes, e, por isso, não são intercomparáveis.

S. Amira *et al.* [42] propuseram um método que permite determinar, de modo simples, a resistência das carapaças cerâmicas à temperatura de vazamento. São utilizados corpos de prova semelhantes aos utilizados para a determinação da permeabilidade. É então insuflado ar, a uma pressão progressivamente crescente, até ocorrer a rotura da amostra, sendo registada a pressão à qual a carapaça colapsa. A resistência a quente (σ) é então calculada a partir da expressão [42]:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{2t} \quad (4)$$

em que P representa a pressão de rebentamento da carapaça, r o raio interno do corpo de prova e t a espessura das suas paredes.

Este método impõe algumas medidas de segurança adicionais devido aos estilhaços que se formam, o que torna o método difícil de aplicar a nível industrial.

3.7.3 *Adjusted Fracture Load*

Este parâmetro corresponde à carga necessária para fraturar um provete normalizado, com 10 mm de largura e espessura, e 70 mm de comprimento, e está diretamente relacionado com os resultados obtidos no ensaio de flexão [20]. Este parâmetro é utilizado quando os corpos de prova não apresentam uma estrutura uniforme, servindo para estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos sobre amostras que foram obtidas por processos distintos.

A *Adjusted Fracture Load* (AFL) é calculada com base na expressão [14]:

$$AFL = f * MOR * H^2 \quad (5)$$

em que f corresponde a uma constante, MOR o módulo de rotura (determinado no ensaio de flexão) e H a espessura do provete.

3.7.4 *Dilatometria*

Dilatometria é uma técnica termoanalítica utilizada para monitorizar as mudanças dimensionais (contração e expansão) que sofre um material, em função da temperatura, quando submetido a um ciclo térmico pré-definido, em atmosfera controlada. É o método mais adequado para a determinação do coeficiente de dilatação térmica, bem como de temperaturas de transição vítrea e de transformações alotrópicas, taxas de sinterização e variações dimensionais resultantes do aumento da temperatura [45]. Este método e as suas aplicações é extensível a diversos campos científicos, sendo crucial aquando da caracterização térmica e mecânica de materiais poliméricos cerâmicos e metálicos [45].

Tal como sugerido pelo nome, neste tipo de ensaio é utilizado um dilatómetro. Os seus principais componentes são [45]: a haste de pressão, o Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT), o porta-amostras, a bainha cerâmica de proteção, o forno e um termopar. Por sua vez, a haste de pressão é conectada ao núcleo ferromagnético do LVDT e impulsiona a amostra de modo que a variação de comprimento seja registada pelo LVDT como uma tensão que corresponde à movimentação do núcleo ferromagnético. A parte externa é estática, contrariamente à interna, que se desloca entre as extremidades, consoante a contração ou expansão do material. Ambos os tubos (interno e externo) são em material cerâmico, de baixa expansão térmica e elevada temperatura de fusão, usualmente sílica ou alumina (suporta temperaturas até 1500°C) [46]. O termopar, presente no interior do tubo, pode ser de vários tipos consoante a temperatura do ensaio. Este servirá para monitorizar a temperatura do ensaio [46].

A preparação das amostras, tal como ocorre em outros ensaios sobre materiais, é crucial para a obtenção de resultados fidedignos. Neste caso, é essencial que estejam bem compactadas e apresentem faces paralelas nos seus extremos, para equilibrar o equipamento. Podem apresentar secção quadrangular ou circular, com dimensões entre 5 e 20 mm [46].

Obtém-se uma curva $\Delta L/L_0$, em % ou ΔL em μm , em função da temperatura [45, 46].

4 Trabalho experimental

Tal como anteriormente referido, neste trabalho pretendia-se analisar a resistência à fratura e a permeabilidade de carapaças cerâmicas utilizadas em IC, mais propriamente das carapaças produzidas na FERESPE, bem como os efeitos da incorporação de fibras cerâmicas e a reutilização de areias de reforço provenientes da reciclagem de carapaças.

Para haver um controlo aceitável das condições de produção de todos os provetes, é necessário dispor de toda a informação relativa à composição química de todos os refratários e outras matérias-primas utilizados, bem como ter conhecimento aprofundado do processo empregue para a produção das carapaças cerâmicas. É fundamental que se dominem os conhecimentos sobre os equipamentos e os métodos de ensaio aplicados para uma análise correta das propriedades em foco.

4.1 Materiais Utilizados

A produção de carapaças cerâmicas envolve diversos materiais, desde os utilizados na produção dos modelos em cera, até uma panóplia de refratários utilizados para a criação das camadas de reforço da cavidade moldante.

4.1.1 Ceras

Na FERESPE, são utilizados diversos tipos de ceras, conforme as especificações de cada peça, e adaptadas às necessidades específicas de cada situação:

- Cera vermelha – é uma cera virgem de elevada qualidade, com baixo coeficiente de contração térmica, utilizada na produção de peças de maior dimensão ou com tolerâncias mais apertadas;
- Cera castanha ou cera reciclada – cera, com elevado coeficiente de contração térmica, utilizada na produção dos sistemas de gitagem;
- Cera verde – cera virgem, com coeficiente de contração superior ao da cera vermelha, utilizada na produção de modelos em cera;
- Cera cola – usada no processo de colagem dos modelos de cera ao sistema de gitagem;
- Cera parafina – com baixo ponto de fusão, é utilizada para revestir sistemas de gitagem e alimentadores;
- Cera solúvel – cera usada para fazer os interiores de alguns modelos (machos); é removida do modelo principal recorrendo a ácido muriático.

As ceras virgens (vermelha e verde) destinam-se à produção dos modelos uma vez que têm maior estabilidade dimensional; por sua vez, a cera reciclada é normalmente usada nos sistemas de alimentação e gitagem.

4.1.2 Carapaças cerâmicas

Para o fabrico das carapaças cerâmicas, a FERESPE recorre a três barbotinas diferentes, e três areias de reforço.

Na preparação das barbotinas, são empregues duas farinhas refratárias diferentes, cujas composições químicas estão patentes na Tabela 2. É utilizado como agente ligante uma suspensão aquosa de sílica coloidal, com uma fração mássica de 10% de látex na sua composição.

Tabela 2 - Composição química (% mássica) das farinhas refratárias utilizadas

	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	H ₂ O
F1 (Zircão); <200 mesh	66,2	0,12	32,7	0,18	0,1	–	0,08	–	0,12	0,5
F2 (Sílica fundida); <200 mesh	–	0,255	99,7	–	0,03	0,005	0,005	0,005	–	–

Por sua vez, a Tabela 3 apresenta as frações dos diferentes componentes das barbotinas utilizadas.

Tabela 3 - Componentes das barbotinas utilizadas e respetivas frações (%)

Barbotinas	Ligante	Água	Molhante	Antiespumante	Farinha
B1	17,80	2,00	0,10	0,10	80,00
B2	18,00	12,00	0,00	0,10	69,90
B3	20,00	10,00	0,00	0,10	69,90

A barbotina 1 (B1), utilizada para a primeira camada, é produzida a partir de F1 e tem uma viscosidade entre 12 e 18 segundos, medida com copo de viscosidade Zahn de tamanho 4. A barbotina 2 (B2), utilizada nas segunda e terceira camadas, é igualmente produzida a partir de F1. Esta barbotina, com uma viscosidade de 7 a 10 segundos, tem por objetivo colmatar falhas no revestimento de B1, de dimensões impercetíveis a olho nu. Por sua vez, para as camadas de reforço recorre-se à barbotina 3 (B3), sendo utilizada a farinha refratária F3. A viscosidade da B3 varia entre os 8 e 14 segundos, em função da liga a vaziar.

Quanto às areias de reforço (Tabela 4), utilizam-se três areias com granulometrias distintas, sendo uma delas areia de zircão, e as restantes de aluminossilicatos.

Tabela 4 - Composição química (% mássica) das areias de reforço disponíveis na FERESPE

	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅	H ₂ O
A1 (200 mesh)	66,2	0,12	32,7	0,15	0,1	–	–	0,1	–	0,13	0,5
A2 (0,2-0,5 mm)	–	43,0	53,0	1,6	1,3	0,5	0,1	0,2	0,2	–	0,1
A3 (0,5-1,0 mm)	–	43,0	53,0	1,6	1,3	0,5	0,1	0,2	0,2	–	0,1
Areia reciclada (R) (0,5-1,12 mm)	1,72	19,3	77,2	0,64	0,60	0,09	0,17	0,11	< 0,01	< 0,01	–

A areia de reforço A1 não tem a função de reforçar a carapaça, mas sim de colmatar a camada de barbotina B1 e impedir que esta escorra e surjam discontinuidades sobre o revestimento da cera. Neste trabalho, foi ainda avaliada a utilização de areia proveniente da recuperação de carapaças cerâmicas, após o seu abate. A areia reciclada (R) tem como finalidade substituir parcial ou completamente a areia de reforço A3, pelo que apresenta granulometria semelhante.

Como seria de esperar, a composição química da areia reciclada contempla todos os componentes das areias de reforço A1, A2 e A3 (Tabela 4) como das farinhas F1 e F2 (Tabela 2) utilizadas nas barbotinas. Não foram detetadas quaisquer contaminações metálicas provenientes do vazamento durante o processo de recuperação e moagem das carapaças. Há uma predominância de sílica e alumina, devido à diferença no número de camadas de B3 e A3 relativamente a B1, A1 e B2. Esta areia foi obtida por moagem em moinho de bolas, e crivada de modo a remover granulometrias não desejadas. Há uma ligeira diferença em termos de granulometria relativamente a A3.

4.1.3 Fibras de reforço

Para reforço das carapaças cerâmicas, foi equacionada a utilização de três fibras cerâmicas diferentes (Tabela 5): duas delas fornecidas pela ISOFRAX (ISOFRAX (ISO)) e FIBERFRAX (FFX)), e uma fibra de vidro, fornecida pela NIPON ELECTRIC GLASS, que apresenta um revestimento de zircónia (NEG AR). Todas as fibras apresentam elevado teor de SiO_2 pelo que, tendo em consideração que seriam aplicadas na barbotina B3, produzida a partir de farinha de sílica, era de esperar a sua elevada afinidade química para com a barbotina, o que se afigurava promissor em termos de aderência à carapaça cerâmica e melhoria das respetivas propriedades mecânicas.

Tabela 5 - Composição química (% mássica) das fibras inorgânicas de reforço

	SiO_2	Al_2O_3	ZrO_2	MgO	$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$
ISOFRAX 1260 (ISO)	70,0 - 80,0	–	–	18,0 - 27,0	< 4,0
FIBERFRAX 1250 (FFX)	50,0 - 58,0	42,0 - 50,0	–	–	< 4,0
NEG AR	83	–	17	–	–

A Figura 27 apresenta imagens dessas fibras, obtidas por Microscopia Eletrónica de Varrimento, em que foram registadas algumas das suas dimensões. É perceptível uma grande variação no diâmetro das fibras ISO e FFX; o seu valor médio ronda os 2-5 μm , com algumas fibras com um diâmetro de apenas algumas centenas de nanómetros. Por sua vez, as fibras NEG AR apresentam um diâmetro bastante mais uniforme, entre os 17 e os 19 μm .

É possível observar nas fibras ISO e FFX a presença de glóbulos, com a forma de gotículas, de dimensão muito superior ao diâmetro das fibras, muito provavelmente resultantes do processo de produção das fibras.

Estas fibras foram selecionadas como reforço devido à sua composição química, semelhante à das carapaças cerâmicas, e às suas propriedades: elevada estabilidade

térmica, baixa condutividade térmica, inércia química e resistência ao choque térmico [47].

É importante salientar que não foram produzidas carapaças reforçadas com fibras de vidro NEG AR devido a uma inesperada dificuldade em dispersar as fibras na barbotina. Após uma análise mais detalhada, foi detetada uma camada polimérica a agregar conjuntos de fibras (Figura 28), que impossibilitavam a sua dispersão eficaz e uniforme pela barbotina.

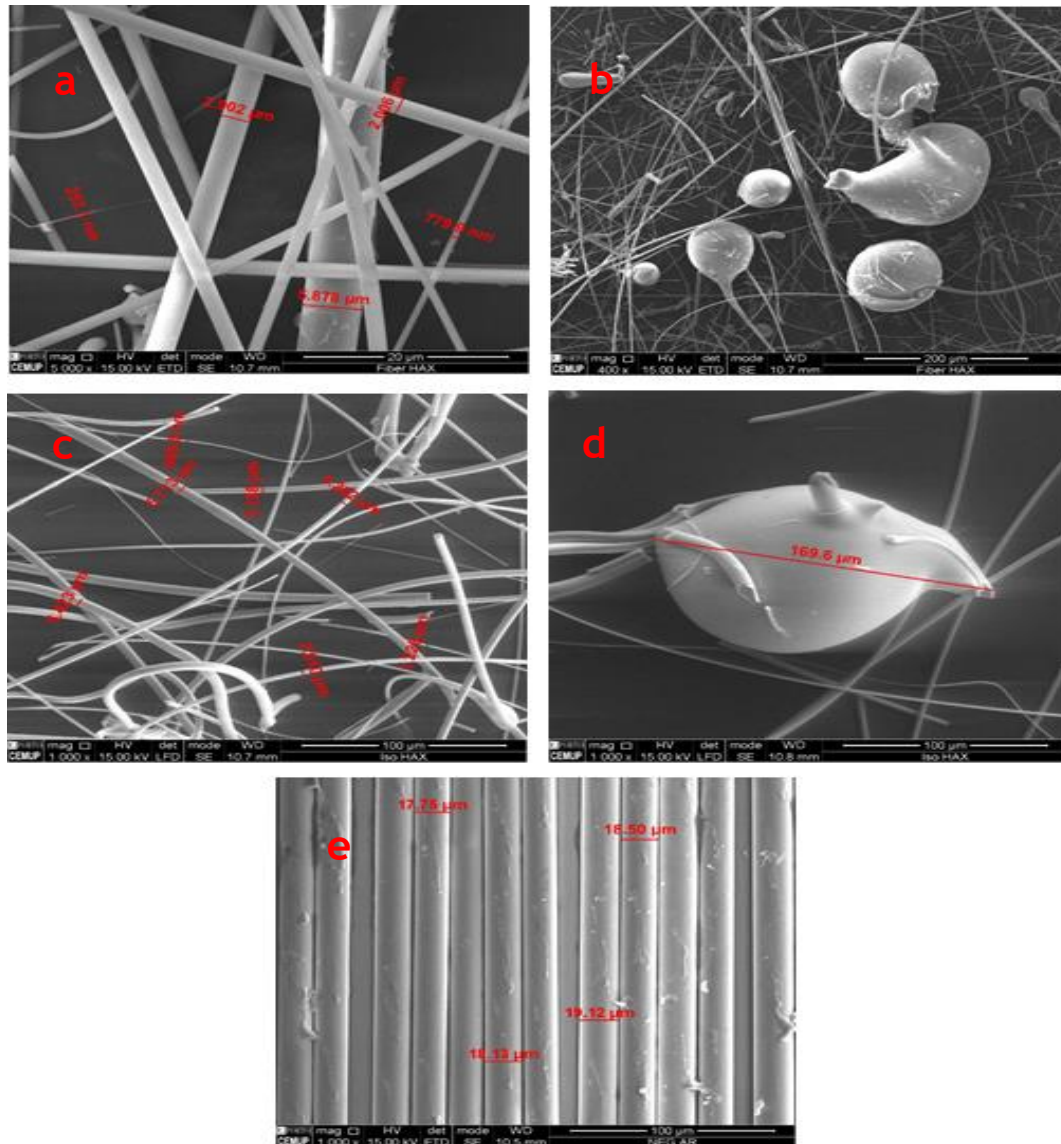


Figura 27 - Imagens, obtidas em SEM, das fibras inorgânicas de reforço das carapaças cerâmicas: (a) e (b) FIBERFRAX, (c) e (d) ISOFRAX, e (e) NEG AR.

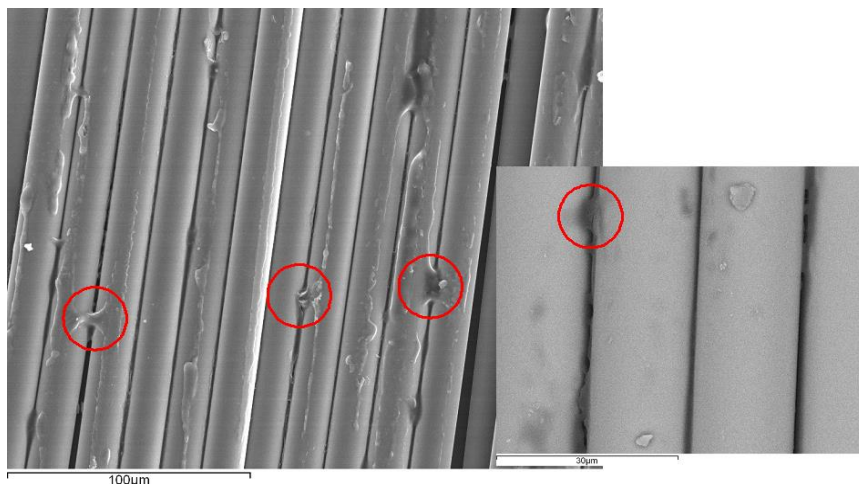


Figura 28 - Imagens, obtidas em SEM, das fibras NEG AR, com identificação da camada polimérica (imagem obtida por elétrons retrodifundidos).

4.2 Métodos experimentais

4.2.1 Produção de provetes

A produção de provetes cerâmicos seguiu ao máximo o processo produtivo utilizado na FERESPE de modo a criar carapaças que representassem de forma fiel as que são fabricadas regularmente. Para os ensaios de permeabilidade e resistência à fratura, foram produzidos modelos em cera dos provetes, para posteriormente criar a carapaça cerâmica para análise. Para a injeção dos modelos, foi utilizada a cera verde disponível na FERESPE. Foram fabricados 10 provetes de flexão para cada condição de ensaio, tendo sido adotadas as dimensões sugeridas pelo “*Wax Binder and Slurry Test Handbook*” [48]. Para os ensaios de permeabilidade, foram produzidos modelos esféricos com 80 mm de diâmetro, tendo sido necessário produzir o respetivo molde em resina, a partir de uma esfera polimérica com o mesmo diâmetro, para injeção da cera [42].

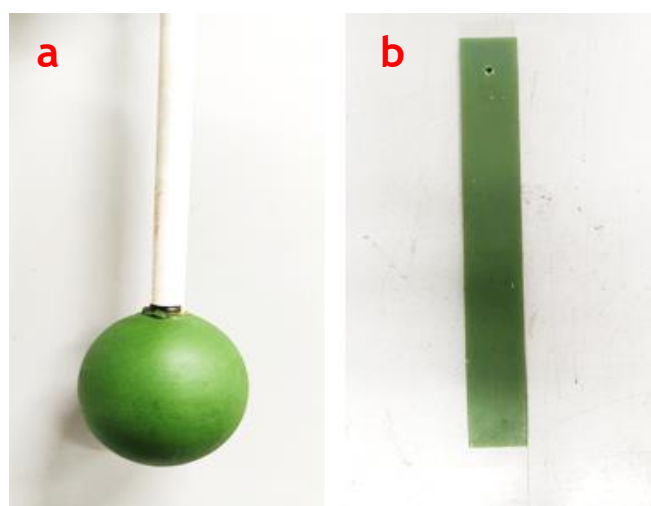


Figura 29 - (a) Modelo de cera para produção dos provetes para os ensaios de permeabilidade; (b) Modelo de cera utilizado na produção dos provetes para os ensaios de flexão.

Para facilitar a produção da carapaça cerâmica e permitir a insuflação de ar quente durante o ensaio de permeabilidade, fixou-se, com recurso a cera cola, um tubo de alumina às esferas de cera.

A FERESPE utiliza normalmente carapaças com oito camadas de barbotina e areia de reforço, e uma nona camada de barbotina selante (Figura 30). Destas camadas, cinco são de reforço, sendo as três primeiras (Zircão) importantes para a obtenção de um fundido com bom acabamento superficial.

Para este estudo foram produzidas carapaças com seis, sete e oito camadas de reforço de modo a recriar as condições utilizadas na empresa, e avaliar a viabilidade de uma potencial redução do número de camadas.



Figura 30 - Representação esquemática da sequência da deposição das camadas de barbotina, e respetiva identificação (Tabelas 3 e 4), durante o ciclo de produção das carapaças cerâmicas.

Para este estudo foram alteradas algumas das condições de produção, tomando por base alguma informação bibliográfica, nomeadamente: adição de fibras de 0,2 a 1,0% (% mássica), em intervalos de 0,2%; incorporação (50%, em massa) de areia de reforço, proveniente da recuperação de carapaças após o seu abate, na areia de aluminossilicatos (A3); variação do número de camadas de reforço. As fibras de reforço foram adicionadas à barbotina B3 de modo a estarem presentes nas camadas de reforço. A utilização de fibras nas primeiras camadas poderia causar distorções na superfície do fundido, prejudicando a sua qualidade.

Foram avaliadas no total setenta condições de produção diferentes, às quais foram dadas referências para identificação, baseadas no número de camadas, tipo e fração de fibras de reforço adicionadas e areia de reforço utilizada (Tabelas 6 a 8).

Tabela 6 - Caracterização das carapaças produzidas sem incorporação de fibras de reforço

Nº de camadas	4	5	6	7	8
Areia A3	4N	5N	6N	7N	8N
Areia reciclada	4NR	5NR	6NR	7NR	8NR

Tabela 7 - Caracterização das carapaças produzidas com adição de fibras e areia de reforço A3

Fibra e nº de camadas	Fração (% mássica) de fibras de reforço				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ISOFRAX 6	6ISO0,2	6ISO0,4	6ISO0,6	6ISO0,8	6ISO1,0
ISOFRAX 7	7ISO0,2	7ISO0,4	7ISO0,6	7ISO0,8	7ISO1,0
ISOFRAX 8	8ISO0,2	8ISO0,4	8ISO0,6	8ISO0,8	8ISO1,0
FIBERFRAX 6	6FFX0,2	6FFX0,4	6FFX0,6	6FFX0,8	6FFX1,0
FIBERFRAX 7	7FFX0,2	7FFX0,4	7FFX0,6	7FFX0,8	7FFX1,0
FIBERFRAX 8	8FFX0,2	8FFX0,4	8FFX0,6	8FFX0,8	8FFX1,0

Tabela 8 - Caracterização das carapaças produzidas com adição de fibras e areia de reforço reciclada

Fibra e nº de camadas	Fração (% mássica) de fibras de reforço				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ISOFRAX 6 R	6ISO0,2R	6ISO0,4R	6ISO0,6R	6ISO0,8R	6ISO1,0R
ISOFRAX 7 R	7ISO0,2R	7ISO0,4R	7ISO0,6R	7ISO0,8R	7ISO1,0R
ISOFRAX 8 R	8ISO0,2R	8ISO0,4R	8ISO0,6R	8ISO0,8R	8ISO1,0R
FIBERFRAX 6 R	6FFX0,2R	6FFX0,4R	6FFX0,6R	6FFX0,8R	6FFX1,0R
FIBERFRAX 7 R	7FFX0,2R	7FFX0,4R	7FFX0,6R	7FFX0,8R	7FFX1,0R
FIBERFRAX 8 R	8FFX0,2R	8FFX0,4R	8FFX0,6R	8FFX0,8R	8FFX1,0R

O número de camadas apresentado corresponde ao número de pares barbotina/areia de reforço aplicados. Por exemplo, a referência “8FFX0,2R” corresponde a uma carapaça compreendendo oito camadas, cinco das quais de reforço, tendo-se incorporado 0,2% (% mássica) de fibras FIBERFRAX à barbotina B3, e utilizado areia reciclada como material de reforço.

Com o intuito de analisar o comportamento das carapaças em todos os estádios de produção, foi analisada a resistência à flexão para todas as condições, tanto para o estado verde, ou seja, pré-sinterizado, como após a sinterização. No caso dos ensaios de permeabilidade, apenas se alterou o número de camadas de reforço das carapaças isentas de fibras. Para as carapaças reforçadas com as diferentes frações de fibras, não foi alterado o número de camadas de barbotina, sendo apenas produzidos provetes com oito camadas, cinco delas de reforço.

De modo a obter os melhores resultados, as fibras foram adicionadas segundo o procedimento utilizado por K. Lü *et al* [36], *i.e.*, inicialmente misturadas com o ligante (por agitação durante 20-30 minutos), e posteriormente com a farinha de sílica. De realçar que, durante a preparação dos provetes, a barbotina foi mantida sob agitação mecânica [36].

Devido a limitações de equipamento, a mistura de areia reciclada com A3 foi aplicada manualmente, e não pelo método de chuveiro.

4.2.2 Ensaio de Flexão

Com o intuito de averiguar o impacto da incorporação de fibras nas carapaças, foram realizados ensaios de flexão de três pontos. Os ensaios foram conduzidos segundo a norma ASTM C1161 - 13 [44]. A resistência à flexão foi obtida utilizando a Equação 2 (subcapítulo 3.7.2). Para tal, foi necessário medir a espessura e largura de todas as carapaças ensaiadas, com o auxílio de um paquímetro digital calibrado.

Para os ensaios de flexão, foi utilizada uma célula de carga, com carga máxima de 500 N, uma distância entre apoios de 150 mm, um punção com 2,5 mm de raio, e um avanço de 1 mm/minuto. Do ensaio, obtém-se a carga máxima, que se atinge no momento

da rotura, e que permite calcular a tensão de fratura. Também se obtém o deslocamento, que representa a deformação elástica suportada pela carapaça antes da fratura.

Os ensaios de flexão em três pontos, apesar de permitirem fazer uma análise da resistência das carapaças e criar uma perspetiva do seu comportamento mecânico, não são totalmente representativos da realidade. Esta problemática existe porque, nos ensaios de flexão em três pontos, o esforço exercido na carapaça está concentrado na interface entre o punção e o corpo de prova. Durante a descerificação, as carapaças sofrem pressão em toda a área superficial, aumentando a chance de haver solicitação numa zona defeituosa. Ensaios como o ensaio de flexão em quatro pontos ou o *burst test* proposto por S. Amira *et al.* [42] são bastante mais representativos do comportamento real de uma carapaça durante as etapas em que é solicitada mecanicamente, uma vez que exercem pressão de forma distribuída por uma maior área do corpo cerâmico.

4.2.3 Ensaio de permeabilidade

Para análise da permeabilidade das carapaças, foi montado um circuito semelhante ao proposto por S. Amira *et al.* [42], e que está esquematizado na Figura 31.

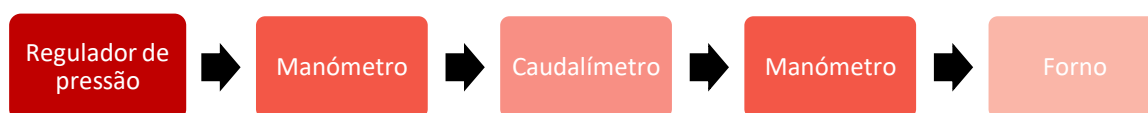


Figura 31 - Representação esquemática do circuito utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade.

Para o ensaio, foram produzidas carapaças com raio interno de 80 mm, conectadas a um tubo de alumina, através do qual se promove a insuflação de ar. Através do regulador de pressão e do caudalímetro, ajustaram-se as condições iniciais de ensaio a 1 bar e 500 l/h, respetivamente. Durante o ensaio, é medida a diminuição de pressão e de caudal, em consequência da resistência à passagem de ar oferecida pela carapaça. O valor de k é calculado a partir da Equação 1 (subcapítulo 3.7.1), sendo o seu valor inversamente proporcional à permeabilidade.

De modo a medir a permeabilidade das carapaças, recriando as condições reais em que são utilizadas, o circuito foi montado de modo a que o provete fosse ensaiado no interior de uma mufla cuja temperatura estava estabilizada a 900°C.

4.2.4 Ensaio dilatométrico

As carapaças cerâmicas são dimensionalmente estáveis a temperaturas elevadas; no entanto, impunha-se identificar as potenciais alterações nas curvas dilatométricas induzidas pelo aumento da fração de fibras de reforço.

Os ensaios foram realizados no dilatómetro Bahr Dil 801L, do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, cuja temperatura máxima de ensaio ronda os 1500°C. Foram analisadas amostras contendo 0,2, 0,6 e 0,8% de cada uma das fibras de reforço utilizadas.

Os ensaios foram realizados até à temperatura de 1100°C, tendo sido utilizada a taxa de aquecimento máxima permitida pelo equipamento (20°C/min) de modo a

aproximar, tanto quanto possível, as condições de ensaio às impostas pelo processo de descerificação *flashfire* e de vazamento às carapaças cerâmicas.

4.2.5 Determinação da densidade e porosidade aparente

De modo a analisar mais profundamente os efeitos da adição de fibras e da reutilização de finos de carapaças após o seu abate e moagem, foi calculada a densidade bem como a porosidade aparente das carapaças ensaiadas. Para tal, foram seguidas as diretrizes da norma ASTM C20 - 00(2015) [49]. Foram determinadas a massa em seco (D) das carapaças cerâmicas, e posteriormente, a massa em húmido (W). Para a determinação da massa em seco, as carapaças foram aquecidas a 110°C durante 30 minutos de modo a remover a sua humidade. No que concerne à massa em húmido, as carapaças foram imersas em água em ebulição durante 30 minutos, para promover a penetração do líquido nos canais existentes no seu interior. Depois de retiradas da água, a superfície das carapaças era seca de modo a remover excessos. O volume (V) foi medido pelo método de Arquimedes.

A porosidade (P) e a densidade aparente (B) são calculadas a partir das fórmulas:

$$P (\%) = \frac{W-D}{V} * 100 \quad (6)$$

$$B \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{D}{V} \quad (7)$$

4.2.6 Análise em Microscopia Eletrónica de Varrimento

De modo a avaliar a aderência das fibras, a coesão da ligação e a dispersão das fibras pela carapaça, recorreu-se ainda a uma observação em Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM), tendo sido analisada a superfície de fratura de provetes submetidos ao ensaio de flexão em três pontos. Esta análise teve com objetivo comprovar os mecanismos de fratura e o desempenho das fibras de reforço como meio de entrave à propagação de fissuras. As amostras foram revestidas com Au-Pd de modo a torná-las condutoras e aptas à análise por SEM.

5 Apresentação e discussão de resultados

5.1 Ensaios de determinação do módulo de rotura

A resistência à flexão é uma propriedade fulcral das carapaças cerâmicas, sobretudo para o seu desempenho durante a descerificação e o vazamento uma vez que é, nestas etapas, que estão sujeitas a cargas e tensões mais elevadas. Além disso, é de grande importância atentar à carga máxima que uma carapaça suporta antes de fraturar. Isto porque a alteração no número de camadas de uma carapaça altera a sua espessura e consequentemente a carga máxima suportada. Como a resistência à flexão é uma propriedade independente da espessura, pode ocorrer o fenómeno de uma carapaça que fratura com uma carga bastante menor ter a mesma resistência à flexão que uma carapaça capaz de suportar cargas superiores.

5.1.1 Resistência à flexão

Nas Figuras 32 a 35 são apresentados os resultados dos ensaios da resistência à flexão das carapaças reforçadas com fibras, produzidas sem incorporação de areia reciclada. É evidente um aumento progressivo dessa resistência com a fração de fibras, culminando nos 0,6% de fibras, com um aumento de aproximadamente 17% para as carapaças reforçadas com as fibras ISOFRAX, e de 11% para as carapaças reforçadas com as fibras FIBERFRAX. Este aumento não se verifica exclusivamente nas carapaças sinterizadas, mas também no estado em verde. Regista-se também uma ligeira tendência para o aumento da resistência com o número de camadas de reforço. Este incremento acontece entre a quarta e a quinta camadas, seguindo-se uma estabilização da resistência. A partir da quinta camada, o acrescento de novas camadas de reforço não aparenta ter impacto relevante, como se conclui da análise do gráfico da Figura 32. Infere-se então que o efeito de reforço das fibras seja o motivo do incremento de resistência das carapaças. A diferença entre as carapaças com quatro e cinco camadas de reforço deve ser atribuída ao facto de a quarta camada ser a primeira camada de B3, ou seja, a primeira camada de reforço, havendo particular incidência das três primeiras camadas nas propriedades das carapaças em questão. Com a introdução de novas camadas de reforço, o corpo cerâmico ganha cada vez maior integridade, que culmina na estabilização da resistência patente no gráfico da Figura 32.

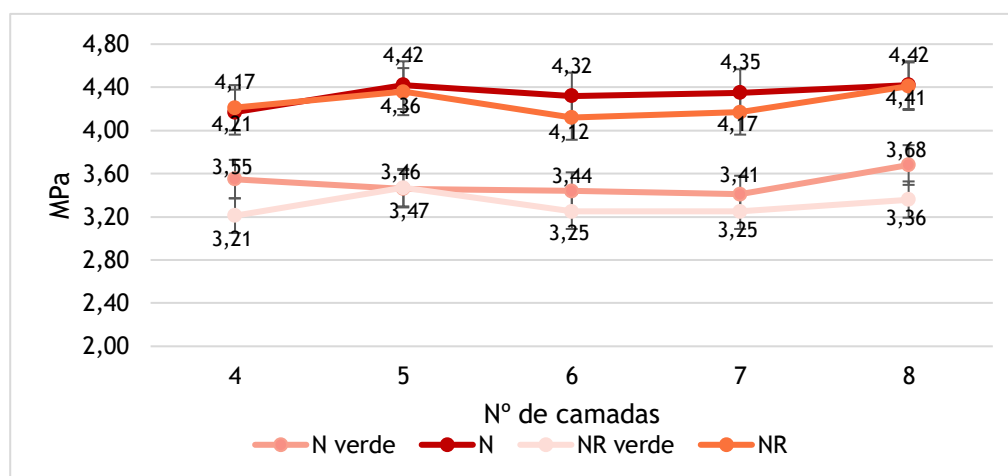


Figura 32 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, vs. número de camadas de reforço.

As carapaças em verde têm, como esperado, menor resistência do que as carapaças sinterizadas. Isto ocorre porque as forças em ação que garantem a coesão da carapaça nos dois estágios são diferentes.

Nas carapaças em verde, as forças em ação são provenientes maioritariamente do ligante e do látex nele presente. A presença do látex confere uma plasticidade extra à carapaça. O alongamento à fratura das carapaças em verde durante os ensaios de flexão variou entre os 10 e os 13%, enquanto o alongamento das carapaças sinterizadas não ultrapassou os 5%. A maior capacidade da carapaça em verde para se deformar temporariamente é claramente benéfica durante a etapa de descerificação uma vez que

permite o aumento do espaço livre para a expansão da cera, provocando uma diminuição da pressão por ela exercida.

No caso das carapaças sinterizadas, o ciclo térmico de sinterização provoca a combustão total de quaisquer voláteis orgânicos que se encontrem na carapaça, bem como do látex. As forças de coesão em ação numa carapaça sinterizada são o resultado da aglomeração dos grãos de refratário de reforço e da farinha, juntamente com a sílica do ligante. Estas ligações são muito mais fortes que as do látex, resultando numa maior resistência das carapaças sinterizadas. O alongamento relativamente mais reduzido das carapaças neste estado é também favorável ao processo uma vez que permite a estabilidade dimensional e geométrica necessária durante o vazamento.

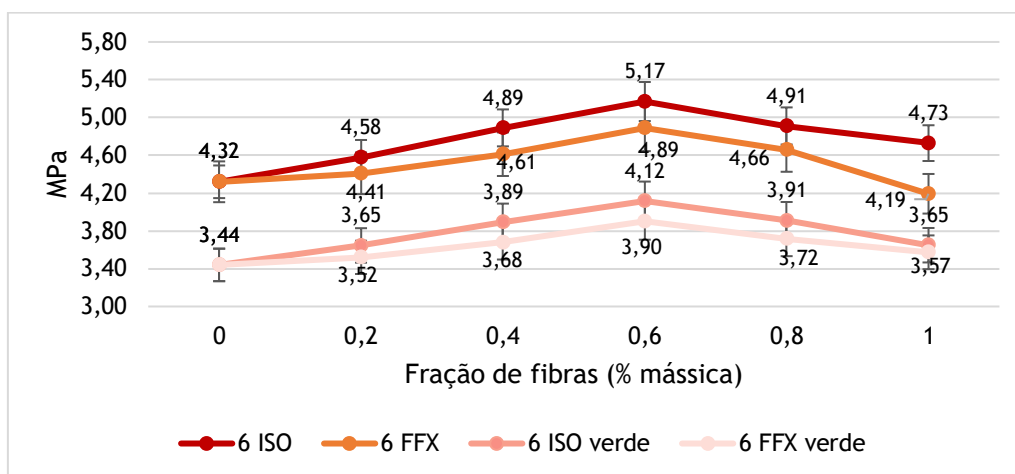


Figura 33 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por seis camadas de reforço, com diferentes frações e tipos de fibras.

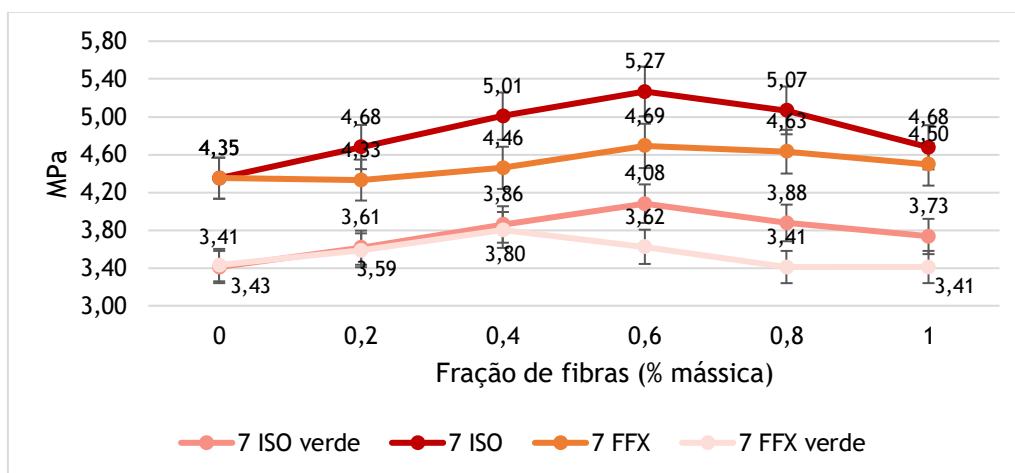


Figura 34 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por sete camadas de reforço, com diferentes frações e tipos de fibras.

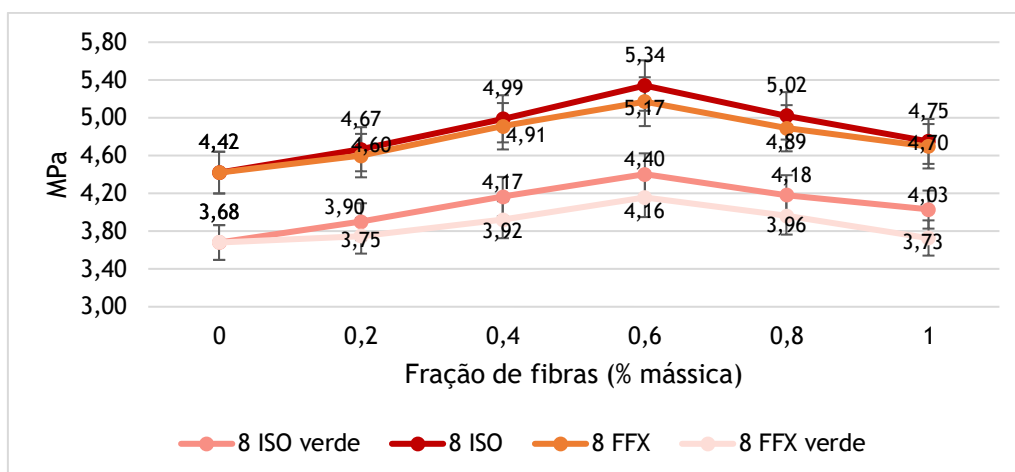


Figura 35 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, constituídas por oito camadas de reforço, com diferentes frações e tipos de fibras.

A partir dos 0,6% de fibras, é inequívoca a diminuição da resistência à flexão, independentemente da fibra utilizada ou do número de camadas. Esta diminuição está já identificada na bibliografia [19, 24, 34], sendo atribuída exclusivamente à aglomeração das fibras. O comprimento das fibras está relacionado com a sua aglomeração, bem como a respetiva fração e sua origem. A aglomeração provoca uma dispersão heterogênea das fibras pela carapaça, além de provocar um déficit na fração de fibras disponíveis para reforço e obstrução à propagação de fissuras.

Durante a produção das carapaças, foi observável, à escala macroscópica, a aglomeração das fibras em pequenos novelos. Nas amostras produzidas com a fibra FFX, esses novelos surgiram a partir dos 0,2% (Figura 36), apesar de serem bastante diminutos, tendo intensificado a sua ocorrência com o aumento da fração de fibras. A diminuição de resistência entre os 0,6 e 1,0% varia de amostra para amostra, sendo maior nas carapaças reforçadas com FFX, o que sugere uma maior propensão destas fibras para se aglomerarem.

As carapaças reforçadas com fibras FFX apresentam uma resistência à flexão inferior à das carapaças reforçadas com fibras ISO, o que pode ser explicado por dois fatores: a já referida aglomeração, que aparentemente é mais elevada para as fibras FFX, e o elevado teor de Al_2O_3 das fibras FFX que faz com que estas tenham uma densidade superior à das fibras ISO. Consequentemente, para a mesma massa de fibras, a quantidade nominal de fibras FFX é inferior à das fibras ISO, fazendo com que o seu efeito seja menor.



Figura 36 -Novelo de fibras formado na barbotina 3, para uma adição de 0,2% de fibras FFX.

Nas Figuras 37 a 39 estão patentes os resultados obtidos nos ensaios de flexão realizados sobre as carapaças contendo areia recuperada. Tal como para as carapaças sem areia recuperada, o efeito das fibras correspondeu às expectativas, tendo-se registado um aumento de aproximadamente 15% da resistência à flexão em carapaças contendo 0,6% de fibras, relativamente às carapaças sem qualquer reforço. Com o aumento da fração de fibras além dos 0,6%, e tal como já tinha sido verificado nas carapaças fabricadas com areia A3, ocorre uma diminuição dessa resistência.

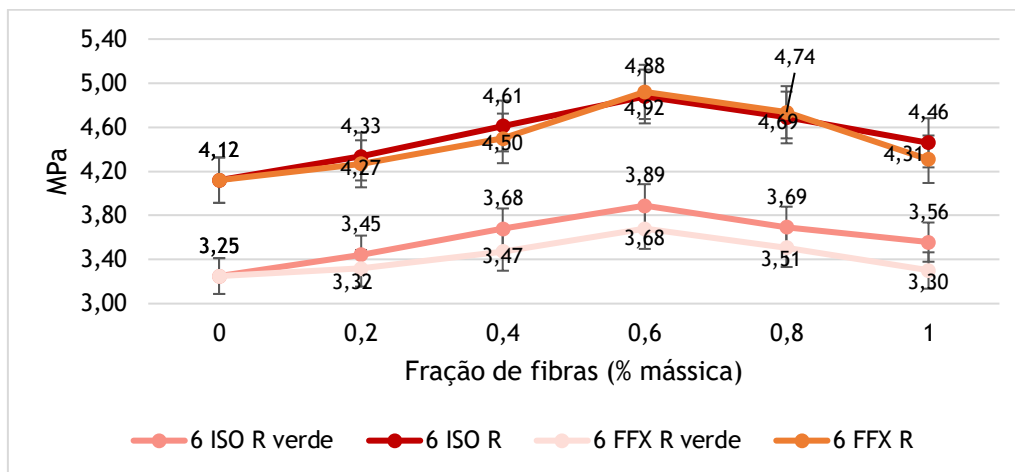


Figura 37 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com seis camadas de reforço, com diferentes frações e tipos de fibras, e areia recuperada.

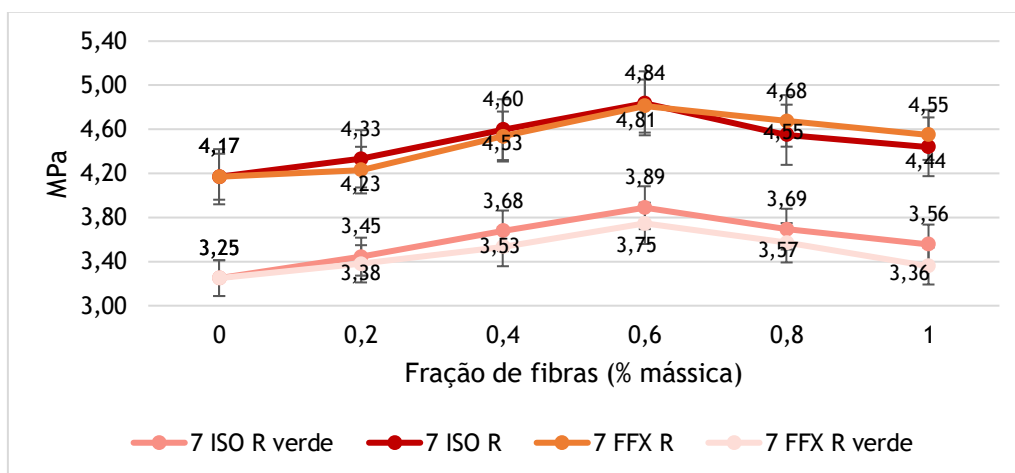


Figura 38 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com sete camadas de reforço, com diferentes frações e tipos de fibras, e areia recuperada.

Relativamente ao valor nominal da resistência à flexão, apesar do comportamento semelhante, os valores obtidos em MPa são ligeiramente inferiores aos valores de resistência das carapaças produzidas sem areia recuperada.

Fazendo uma análise mais atenta, verifica-se (Tabela 9) que a espessura das carapaças contendo areia recuperada é significativamente superior. Isto deve-se ao método utilizado para aplicar a areia de reforço. Enquanto a areia A3 foi aplicada utilizando um chuveiro, que promove a formação de uma camada uniforme de areia sobre cada uma das camadas de barbotina, a mistura de areia recuperada com A3 foi aplicada manualmente para a totalidade dos provetes.

Tabela 9 - Espessura, em mm, das carapaças cerâmicas produzidas para os ensaios de flexão

	8N	8ISO0,2	8ISO0,6	8ISO1,0	8FFX0,2	8FFX0,6	8FFX1,0
A3	8,30	8,76	9,94	8,84	8,56	9,62	8,74
A3/R	10,56	11,06	12,12	11,68	10,08	10,64	9,3

O método de aplicação manual não é o ideal; a camada de areia não é uniforme, verificando-se maiores oscilações na espessura da carapaça. Além disso, não há o impacto, provocado pela queda da areia sobre a carapaça, que ocorre no chuveiro, o que faz com que muita da areia depositada apresente uma adesão deficiente, comprometendo a resistência da carapaça por falta de coesão entre os grãos, tanto em verde como após a sinterização.

Esta diferença não revelou ser muito significativa no desempenho das carapaças, e não está relacionada com o tipo de areia utilizada como reforço. Tendo isso em conta, é possível admitir que a incorporação da areia recuperada como areia de reforço na produção de carapaças cerâmicas é viável, conferindo aos corpos cerâmicos resistência equivalente à obtida em carapaças produzidas sem areia reciclada, resultando numa carapaça com as características necessárias para a sua adequada *performance* em todas as etapas do processo.

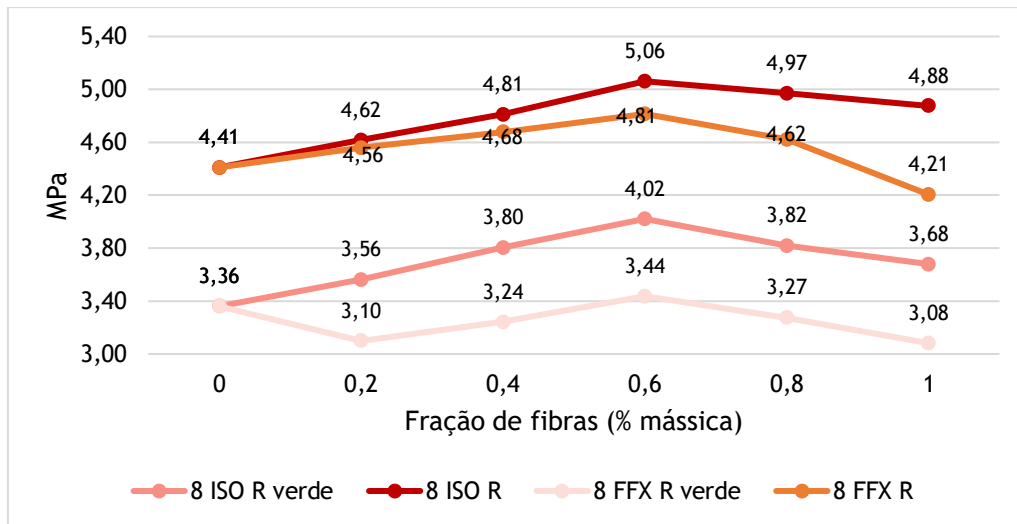


Figura 39 - Resistência à flexão de carapaças, em verde e após sinterização, produzidas com oito camadas de barbotina reforçada, com diferentes frações e tipos de fibras, e areia recuperada.

5.1.2 Adjusted Fracture Load

Um dos fatores com maior impacto na produção de carapaças cerâmicas é a possibilidade de aumentar a sua resistência simplesmente por recurso a um maior número de camadas de reforço. Este é o método mais rudimentar para se obter a resistência necessária. Ao fazê-lo, há que atender ao tempo de produção: cada camada extra promove um aumento do tempo de secagem da carapaça em algumas horas, o que pode resultar em atrasos de um ou mais dias na sua produção. Como patente no gráfico da Figura 32, o aumento de resistência promovido pelo número de camadas não se revelou significativo

no estudo desenvolvido sobre a resistência à flexão. Para melhor avaliar o impacto do número de camadas, é necessário analisar a *Adjusted Fracture Load* (AFL).

Tal como para a resistência à flexão, há uma tendência para o aumento da AFL até aos 0,6% de fração de fibras de reforço, registando-se o seu posterior decréscimo até aos 1,0% (Figuras 40 e 41).

A grande diferença assenta nos valores claramente distintos que se observam para carapaças produzidas com diferente número de camadas, que demonstram nitidamente o efeito preponderante que o aumento do número de camadas de reforço tem no comportamento da carapaça. Com o simples acréscimo de uma camada de reforço, a carga máxima suportada pela carapaça pode aumentar desde 23%, para carapaças sem reforço de fibras, até 33% nas carapaças com 0,6% de fibras ISOFRAX.

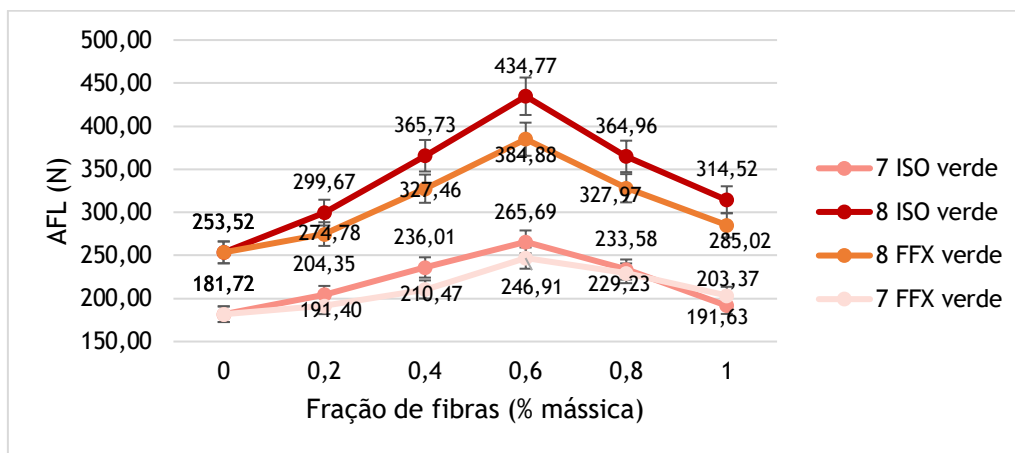


Figura 40 - AFL de carapaças, em verde, vs. fração e tipo de fibras de reforço.

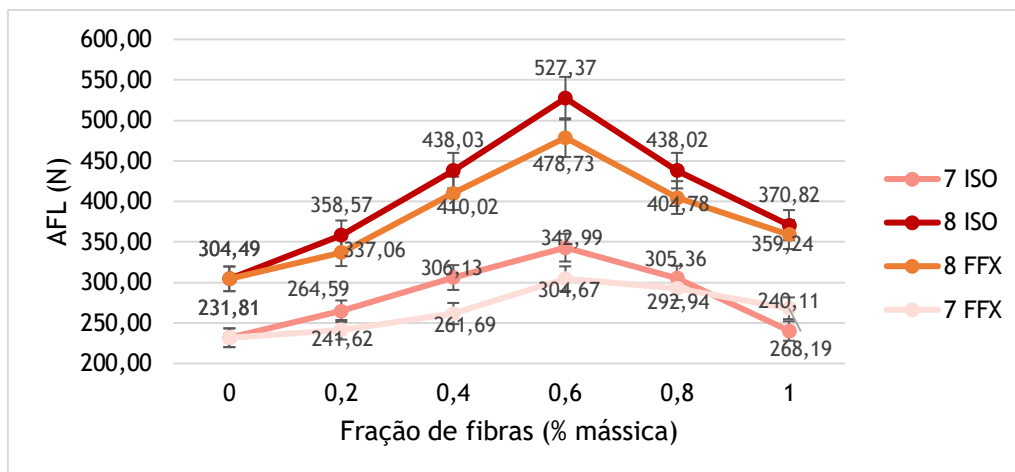


Figura 41 - AFL de carapaças, após sinterização, vs. fração e tipo de fibras de reforço.

No gráfico da figura 41 sobressai um facto bastante promissor: as carapaças com sete camadas de barbotina reforçada com a fibra ISOFRAX, em frações de 0,4 a 0,8%, tiveram em média um desempenho semelhante ou superior ao de uma carapaça produzida com oito camadas e sem qualquer reforço. Isto significaria uma redução de 12% no tempo de produção de uma carapaça (excluindo o tempo de secagem final), bem como uma redução na quantidade de materiais utilizados.

As figuras 42 e 43 apresentam os valores de AFL para as carapaças em que foi utilizada areia recuperada. É flagrante a diferença de valores entre as amostras reforçadas com ISOFRAX e as restantes. No entanto, tal como patente na Tabela 9, as carapaças produzidas com areia recuperada e fibras ISOFRAX têm uma espessura 10% superior à das restantes. Isto deve-se à aplicação desta areia de um modo manual; a heterogeneidade de espessura daí resultante fez com que estas carapaças ficassem com uma espessura que, por outro método de aplicação de areia, não existiria, tendo efeito direto no cálculo da AFL. No entanto, não se pode desvalorizar o aumento notório da carga com o aumento da fração de fibras.

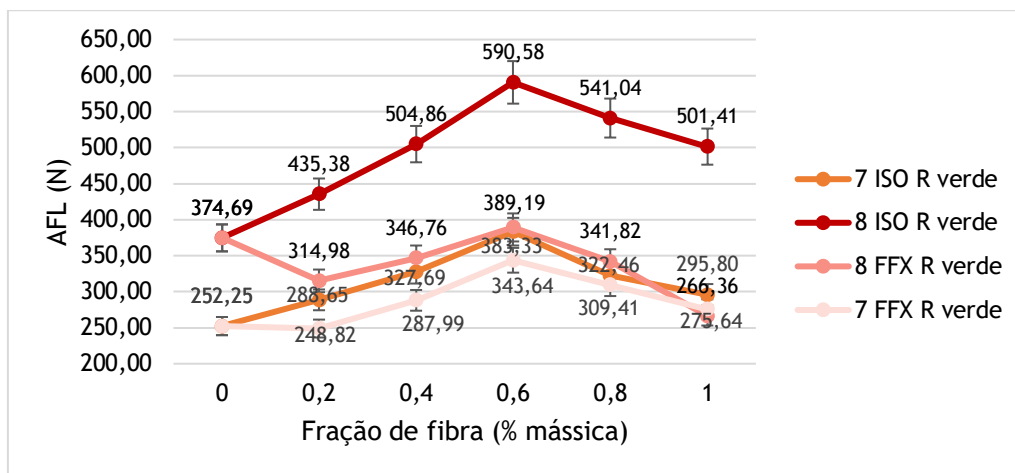


Figura 42 - AFL, em verde, de carapaças produzidas com 50% de areia reciclada, vs. fração e tipo de fibras de reforço.

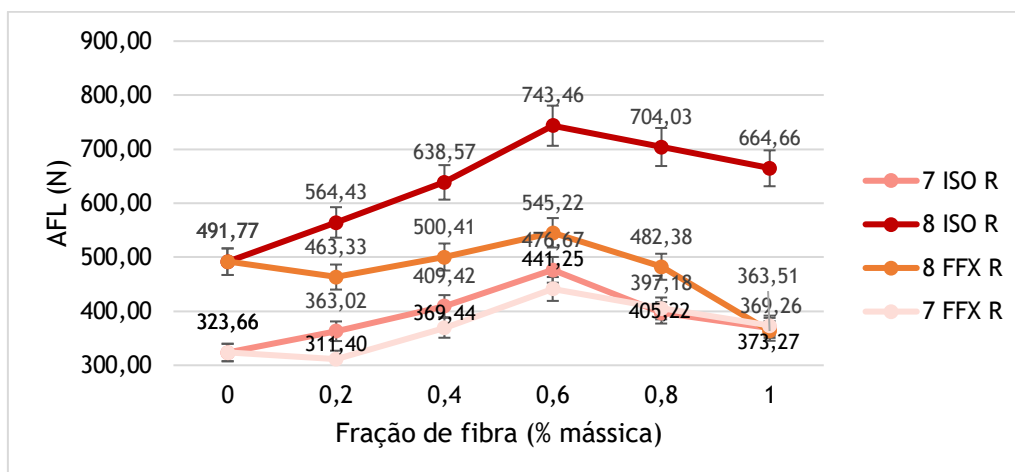


Figura 43 - AFL, após sinterização, de carapaças produzidas com 50% de areia reciclada, vs. fração e tipo de fibras de reforço.

Tal como previsto, a incorporação de fibras fez com que a espessura das carapaças aumentasse substancialmente. Isto deve-se sobretudo ao facto de as fibras servirem de entrave ao escorrimento da barbotina, aumentando a quantidade que adere à superfície da carapaça em cada camada. Quando começa a haver aglomeração das fibras, há uma diminuição da sua capacidade de sustentar o escoamento da barbotina, que resulta numa diminuição da espessura para valores mais próximos, ainda que superiores, dos das carapaças não contendo qualquer reforço. É também evidente (Tabela 9) a diferença de

espessura entre as carapaças produzidas com e sem areia recuperada. Como já foi referido, esta diferença é devida quase exclusivamente ao método de aplicação da areia, e não ao tipo de areia utilizada. Deverá ainda ser considerada uma pequena influência resultante da diferença de granulometria entre a areia de aluminossilicatos e a areia recuperada.

Por último, é importante ressaltar que a obtenção de resultados inesperados, para algumas carapaças reforçadas com as fibras FIBERFRAX, para frações em que era previsível um aumento de resistência, deverá ser explicada pela inesperada aglomeração destas fibras, que ocorre para valores superiores a 0,2%.

5.2 Permeabilidade

A existência de vias para o escape de gases é fulcral, durante as etapas de descerificação e vazamento, de modo a evitar a fissuração das carapaças ou o mau enchimento da cavidade moldante provocados pelo aprisionamento de ar. Assim, é fundamental que a carapaça cerâmica apresente canais de porosidade aberta, que lhe confirmem uma permeabilidade adequada.

Na Figura 44 podemos verificar que o aumento do número de camadas está diretamente relacionado com a diminuição da permeabilidade.

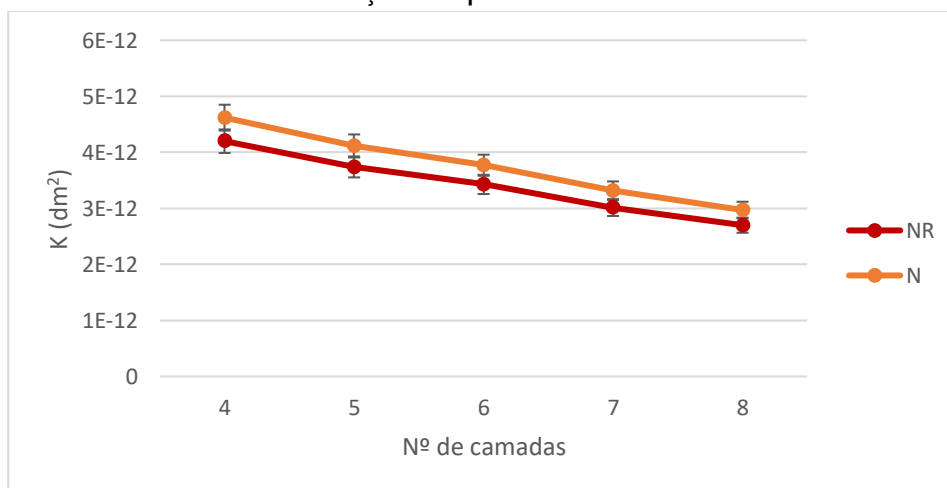


Figura 44 - Permeabilidade das carapaças cerâmicas vs. número de camadas de reforço.

A diminuição da permeabilidade está relacionada com a diminuição da porosidade aberta. Por cada camada de reforço adicional, são fechados alguns dos canais porosos abertos que estão conectados nas camadas anteriores, diminuindo assim as vias de escape dos gases do interior da carapaça. Analisando em simultâneo os gráficos das Figuras 44 e 45, constata-se a diminuição em mais de 10% da porosidade da carapaça, que resulta numa diminuição bastante significativa da permeabilidade de uma carapaça quando o número de camadas de reforço passa de quatro para oito.

Ademais, regista-se uma ligeira diminuição da permeabilidade das carapaças produzidas com a mistura contendo areia recuperada. Da análise da Figura 45, constata-se que as carapaças em que foi incorporada areia recuperada até apresentam uma porosidade ligeiramente superior. O seu pior desempenho, em termos de permeabilidade, é explicado pela sua elevada e irregular espessura, causada pelo método de aplicação

manual da areia de reforço. O aumento da espessura da carapaça está diretamente relacionado com a diminuição da sua permeabilidade. O fluxo de ar através da carapaça pode ser afetado pela granulometria da areia de reforço utilizada. No entanto, segundo o gráfico da Figura 6 (subcapítulo 3.3.5) esse efeito não é muito significativo, podendo ser desprezado, tendo em conta as diferenças de granulometria entre a A3 e a mistura de A3/R.

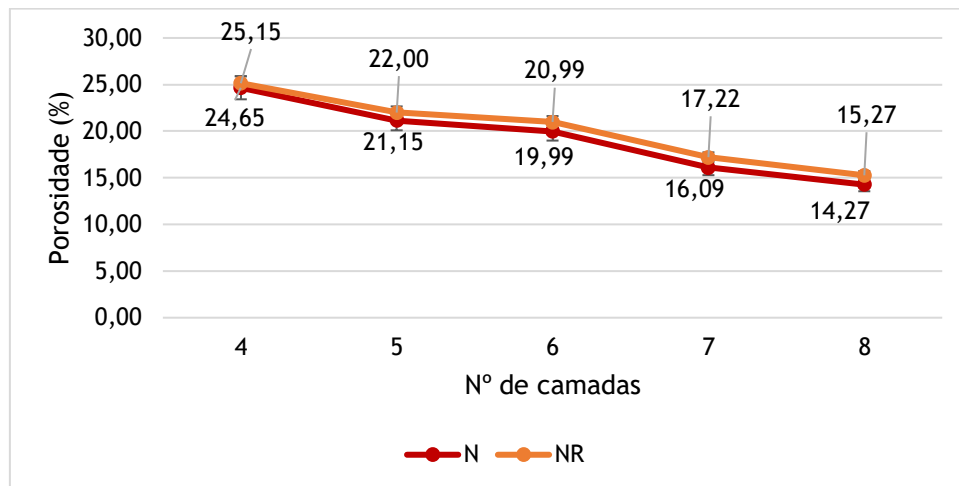


Figura 45 - Porosidade aparente das carapaças cerâmicas vs. número de camadas de reforço.

No gráfico da figura 46 está patente a permeabilidade das carapaças reforçadas com diferentes frações de fibras. Todas as carapaças analisadas foram produzidas seguindo sem interrupções o processo de fabrico implementado na FERESPE, ou seja, oito camadas de barbotina. Comparativamente às carapaças sem reforço de fibras com oito camadas de barbotina, os valores da permeabilidade obtidos para as carapaças reforçadas são bastante semelhantes. Há ainda uma dispersão considerável de valores, atribuída a pequenas oscilações na viscosidade da barbotina, que dificulta a tomada de elações relativamente ao efeito da fração de fibras na permeabilidade. Com uma análise mais cuidada do gráfico na figura 46, não é possível estabelecer uma relação direta entre a variação da fração de fibras e a permeabilidade das carapaças cerâmicas. Infere-se que a adição de fibras de reforço não induz qualquer efeito significativo sobre a permeabilidade das carapaças cerâmicas. Denota-se de novo que, em média, as carapaças produzidas com areia de reforço recuperada têm uma menor permeabilidade.

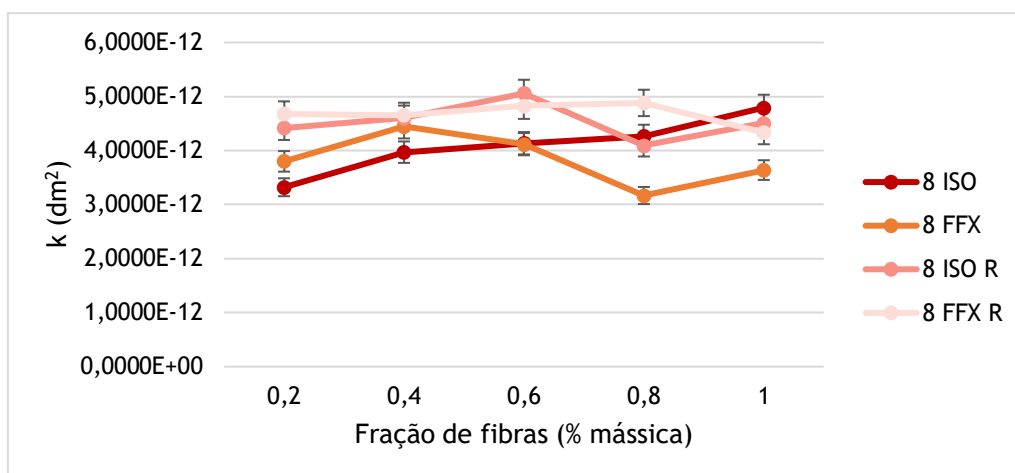


Figura 46 - Permeabilidade das carapaças cerâmicas vs. fração e tipo de fibras de reforço.

Não foi possível determinar a permeabilidade das carapaças em verde uma vez que o processo de descerificação implementado na FERESPE não permite a obtenção de carapaças cerâmicas em verde. No entanto, é possível deduzir que, devido à presença de látex por combustar e de humidade nas carapaças em verde, a permeabilidade seja bastante menor que nas carapaças sinterizadas.

5.3 Análise da superfície de fratura das carapaças cerâmicas

Alguns efeitos da utilização de fibras como reforço de carapaças cerâmicas são visíveis a nível macroscópico, como o aumento da espessura ou da viscosidade da barbotina. No entanto, os mecanismos responsáveis pelo reforço das propriedades mecânicas das carapaças cerâmicas ocorrem a nível microscópico, nomeadamente: interação das fibras com a matriz refratária e comportamento desse compósito de matriz cerâmica sob a ação de uma solicitação mecânica. Segundo a bibliografia, o maior problema relacionado com o reforço das carapaças cerâmicas com fibras, cerâmicas ou poliméricas, é a aderência das fibras ao material cerâmico.

A superfície das fibras é normalmente uma superfície bastante lisa, o que dificulta a aderência à barbotina. Isto faz com que o reforço das carapaças pelas fibras não seja integralmente aproveitado e estas sejam arrancadas da matriz antes de fraturarem. De modo a analisar mais profundamente os mecanismos responsáveis pelo aumento da resistência mecânica das carapaças, nomeadamente as interações entre as fibras e a matriz cerâmica, foram analisadas as superfícies de fratura de carapaças submetidas aos ensaios de flexão em três pontos.

A análise da morfologia da superfície de fratura das carapaças reforçadas com fibras mostra os diferentes comportamentos que estas apresentam durante o processo de rotura da carapaça. As imagens a) e b) da Figura 47 mostram a superfície de fratura após o arrancamento das fibras da matriz cerâmica. É possível ver as estrias formadas em consequência desse arrancamento pois as fibras oferecem resistência caso apresentem boa aderência à matriz, daí resultando o fenómeno denominado estrangulamento [29, 36], que retarda a fratura da carapaça (Figura 47 f)).

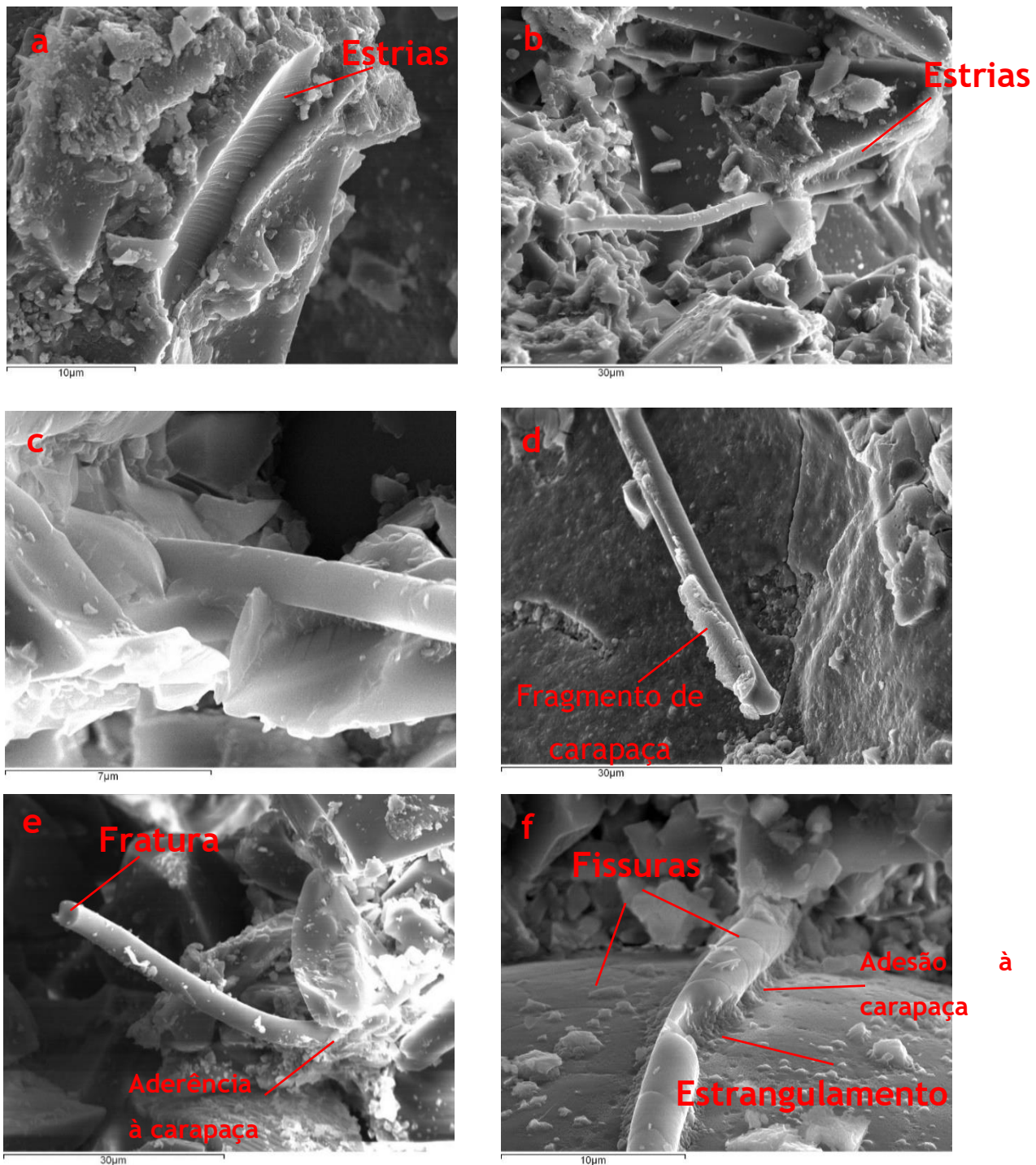


Figura 47 - Imagens, obtidas em SEM, da superfície de fratura de carapaças sinterizadas: a) ISO0,2; b) FFX0,6; c) ISO0,6; d) ISO0,2; e) ISO1,0; f) ISO0,6.

Nas imagens c), d) e e) da Figura 47, pode observar-se que as fibras são arrancadas da matriz durante o ensaio de flexão, provando que o modo de falha das carapaças reforçadas é dominado pelo deslocamento e arrancamento das fibras da matriz cerâmica. A fratura ocorre quando há forte aderência entre a matriz cerâmica e as fibras, e as fissuras conseguem ultrapassar as zonas em que as fibras se encontram. A zona em questão continua em esforço até que a fibra inevitavelmente quebra e é arrancada. Denota-se ainda que existe bastante resíduo a envolver as fibras que foram arrancadas da matriz

cerâmica, sugerindo que a interface entre as fibras e a carapaça cerâmica apresenta uma forte ligação mecânica.

Todos estes mecanismos, desde o arranque das fibras à sua fratura, consomem energia que seria direcionada para a criação e propagação de fissuras, atrasando esse processo, e aumentando assim a resistência da carapaça.

A sinterização da carapaça promove a fusão, parcial ou total, das fibras cerâmicas, originando alterações na sua morfologia, que aumentam a área de interação com a carapaça, reforçando assim a sua resistência mecânica [29].

Quando a carapaça é submetida a tensões, são criadas milhares de microfissuras na matriz cerâmica. Estas microfissuras têm potencial para crescer e provocar a fratura da carapaça. Devido à sua elevada resistência, as fibras atrasam o crescimento das microfissuras, podendo mesmo impedir a sua propagação. Nas Figuras 47 f) e 48 a) e b) são perceptíveis várias microfissuras que se propagaram ao longo da matriz cerâmica e da fibra de reforço.

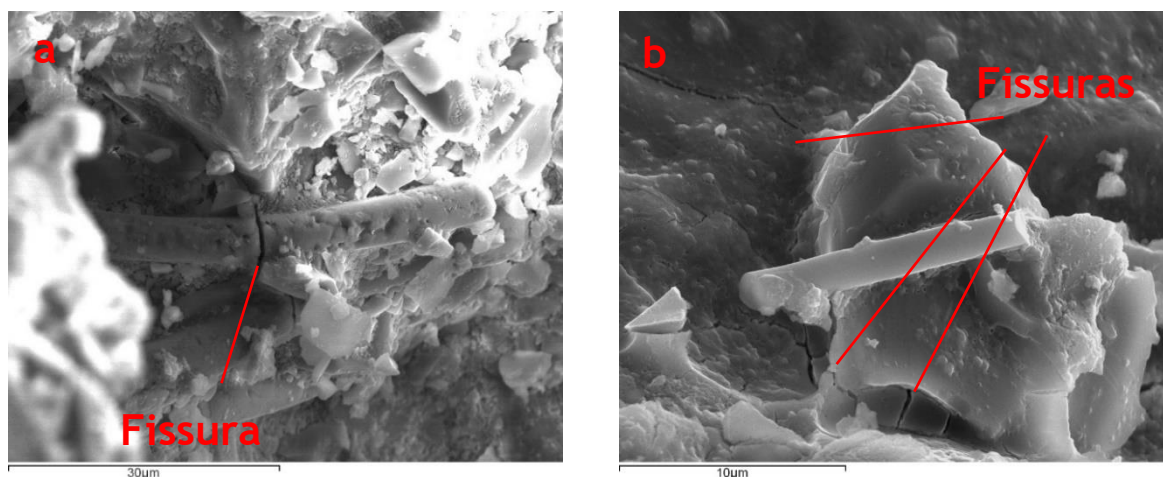


Figura 48 - Imagens, obtidas em SEM, da superfície de fratura de carapaças sinterizadas: a) ISO0,8; b) FFX0,2.

As fibras cerâmicas apresentam uma grande propensão para se aglomerarem se não forem misturadas uniformemente. A aglomeração de fibras gera descontinuidades na carapaça, criando zonas “frágeis”, comprometendo assim o seu efeito de reforço. É nestas zonas, isentas de fibras, que as fissuras se propagam com maior facilidade, e onde ocorrerá a fratura. Quanto maior for a fração de fibras na matriz cerâmica, maior a propensão para a sua aglomeração. Uma vez que se trata de fibras cerâmicas, que não combustam durante a sinterização, é de esperar que a sua utilização tenha sempre algum efeito de melhoria em relação a uma carapaça sem qualquer tipo reforço. A presença de fibras na matriz cerâmica e a sua interação provoca um aumento da resistência mecânica. Mesmo a utilização de fibras em quantidades superiores a 0,6% resulta num aumento da resistência relativamente a carapaças sem reforço, uma vez que há fibras dispersas pela matriz que conferem algum aumento de integridade à carapaça. No entanto, a utilização de maiores frações de fibra resulta no aparecimento de aglomerados cujos efeitos estão longe do ideal em termos de melhoria da resistência da carapaça cerâmica, atuando como geradores de microfissuras, fazendo com que a sua *performance* se deteriore, e haja um

grande desvio da resistência máxima possível. Além disso, a aglomeração das fibras gera descontinuidades de fibras na matriz, criando zonas deficientes de reforço e com menor resistência, o que acelera a propagação de fissuras e consequente fratura da carapaça.

5.4 Ensaios dilatométricos

Uma das principais características do processo de IC é a sua elevada precisão dimensional. Este fator deve-se à elevada estabilidade dimensional dos materiais utilizados para produzir as carapaças cerâmicas. A contração e a dilatação desses materiais são aspetos a ter em atenção durante todo o processo já que as diferenças entre os coeficientes de dilatação da cera e da carapaça cerâmica estão diretamente associadas à fissuração das carapaças durante a descerificação, sendo alvo de várias medidas preventivas ao longo da sua produção.

Com a introdução de corpos estranhos (fibras de reforço) na carapaça, é de capital importância que seja analisado o seu comportamento dilatométrico com a variação de temperatura, de modo a detetar quaisquer alterações dimensionais que possam introduzir fissuras que fragilizem e comprometam a integridade da carapaça.

Nas Figuras 49 a), b), c), d), e) e f) estão patentes os resultados obtidos nos ensaios dilatométricos de carapaças já sinterizadas, reforçadas com fibras ISOFRAX e FIBERFRAX, para diferentes frações. Em todas as amostras ensaiadas, independentemente da fração de fibras, a dilatação registada, entre os 1000 e os 1100°C, situou-se entre os 0,300 e 0,500%, confirmando a elevada inércia térmica dos materiais utilizados na produção das carapaças de que resulta a alta precisão dimensional do IC. A reprodução de resultados que se verificou em todos os ensaios, mesmo com variação da fração de fibras, torna claro que as fibras não têm qualquer efeito significativo quanto à dilatação das carapaças, não havendo possibilidade da ocorrência de problemas neste campo.

A progressiva dilatação, observável nos gráficos da Figura 49 até os 1000°C, revela que a sinterização das carapaças se processou devidamente. A potencial ocorrência de contração em carapaças, devido à sua incompleta sinterização, poderia causar problemas dimensionais nos fundidos.

Próximo dos 1100°C, verifica-se um ligeiro achatamento das curvas de dilatação, revelando um abrandamento na dilatação e possível início de contração. Seriam necessários ensaios a temperaturas superiores, complementados por uma análise direcionada a detetar os motivos desta ocorrência, mas esta incoerência sugere uma densificação incompleta do material, que ocorreria a uma temperatura superior. Na produção de carapaças cerâmicas para IC é importante balancear a densificação das carapaças, de modo a conferir-lhes integridade e a resistência mecânica necessária, sem prejudicar a permeabilidade. Poderia não ser benéfico para o processo de IC densificar mais as carapaças cerâmicas, uma vez que isso iria diminuir a quantidade de poros no material cerâmico, comprometer a permeabilidade e provocar aprisionamento de gases no seu interior durante o vazamento, o que iria assolar a qualidade dos fundidos produzidos.

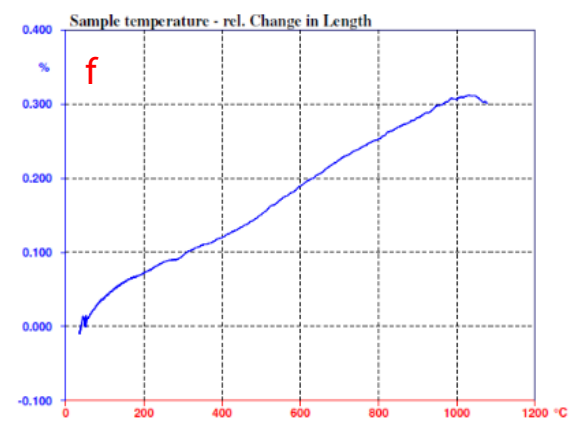
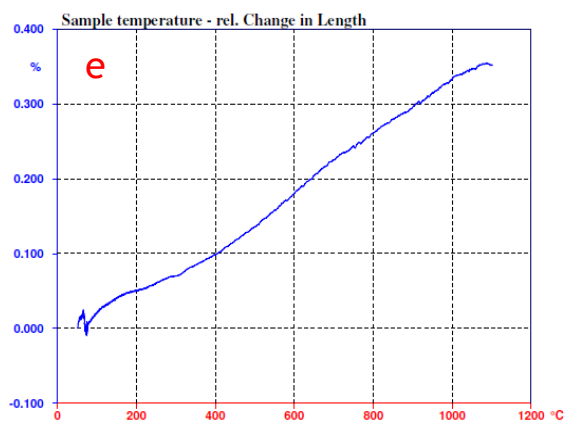
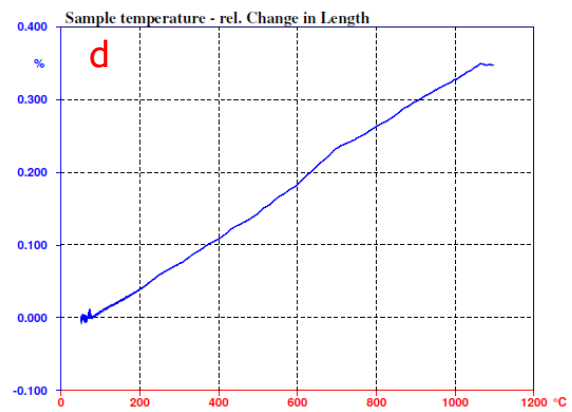
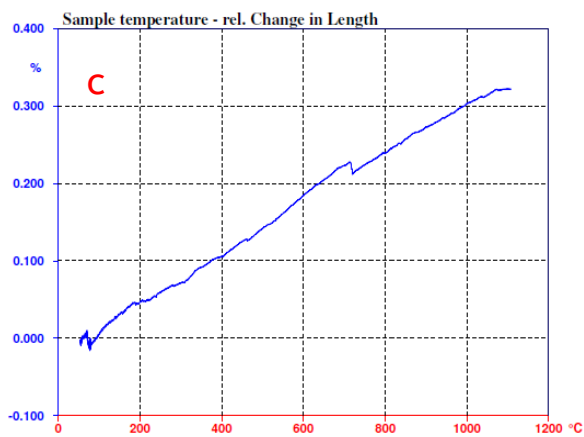
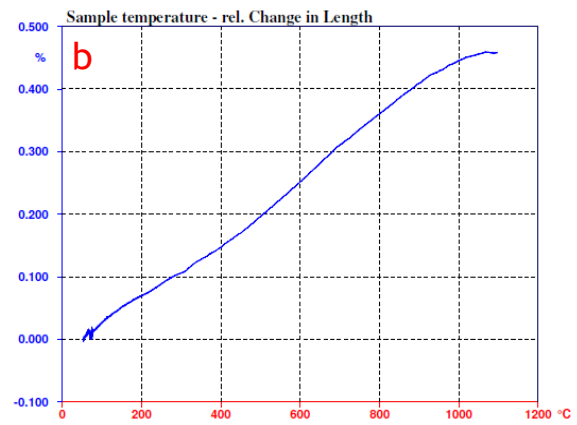
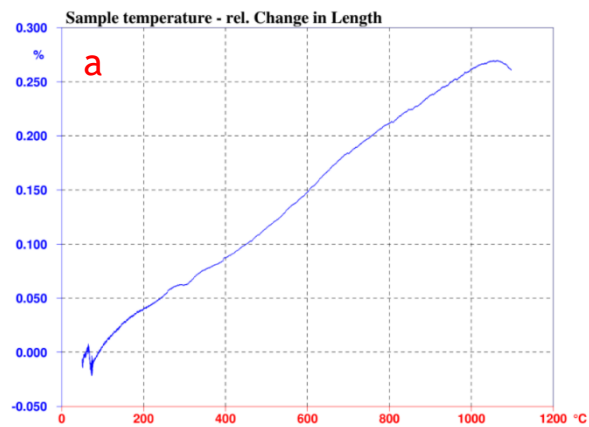


Figura 49 - Dilatação, vs. Temperatura, das carapaças cerâmicas: a) FFX0,2; b) FFX0,6; c) FFX0,8; d) ISO0,2; e) ISO0,6; f) ISO0,8

6 Conclusões

Com os constantes avanços tecnológicos que o mundo enfrenta, é imperativo que o IC também evolua e siga esses avanços de modo a manter-se competitivo relativamente a outros processos já estabelecidos ou emergentes. Para isso, é importante conseguir reduzir os custos de produção, melhorar a qualidade dos fundidos produzidos, e explorar novos e mais desafiantes mercados.

A otimização da produção das carapaças cerâmicas é um passo crucial para se alcançarem esses objetivos já que é o mais moroso de todo o processo. Conseguir produzir carapaças com propriedades mecânicas mais elevadas, mediante a adição de materiais de reforço, é um caminho muito promissor na otimização da sua produção.

A incorporação de fibras nas barbotinas para produção de carapaças cerâmicas revelou-se um método bastante promissor relativamente ao aumento da sua resistência. Registou-se um aumento de 17% da resistência mecânica com a incorporação de 0,6% de fibras de sílica e magnésia, e de 11% para a mesma fração de fibras de sílica e alumina. Consequentemente, a carga suportada por carapaças reforçadas com fibras é também superior.

O número de camadas de reforço não teve qualquer efeito aparente na resistência mecânica das carapaças. No entanto, uma simples camada extra de reforço, com barbotina reforçada com fibras, produziu um aumento da carga suportada entre os 23 e os 33% para uma fração de 0,6% das fibras de alumina-sílica e de magnésia-sílica respetivamente. Mesmo em carapaças sem reforço de fibras, há um aumento próximo dos 30% na carga suportada, com o acréscimo de uma camada de reforço. Foi demonstrado que a utilização de fibras permite obter carapaças com apenas sete camadas de barbotina que têm a mesma resistência que carapaças com oito camadas de reforço de barbotina isenta de fibras. A possibilidade de obter a mesma resistência com uma camada de reforço a menos permite reduzir o tempo de produção das carapaças cerâmicas, e consequentemente de todo o processo de fabrico. No entanto, medidas dessa ambição só devem ser tomadas após testagem mecânica mais abrangente e pormenorizada das carapaças, com uma avaliação mais minuciosa de todas as variáveis envolvidas.

A permeabilidade e a porosidade são fortemente afetadas pelo número de camadas de barbotina uma vez que novas camadas colmatam canais de porosidade aberta existentes. Registou-se uma diminuição de 20% da permeabilidade com o aumento de uma camada, e um decréscimo de 10% na porosidade aparente. Após análise da permeabilidade de carapaças reforçadas com fibras, foi possível constatar que os resultados obtidos apresentam alguma oscilação que dificultam a tirada de relações relativamente ao efeito do aumento da fração de fibras. No entanto, os mesmos resultados não sugerem que as fibras tenham qualquer efeito prejudicial neste campo, apesar de também não haver nenhum incremento de permeabilidade, havendo uma regularização de valores de k entre os $3 \cdot 10^{-12}$ e os $5 \cdot 10^{-12} \text{ dm}^2$.

A utilização de areia recuperada como areia de reforço revelou ser bastante promissora uma vez que os valores de resistência mecânica, AFL, porosidade e permeabilidade das carapaças produzidas com esta areia não mostraram diferenças significativas em relação às carapaças produzidas apenas com areia de aluminossilicatos.

7 Estudos futuros

Nesta dissertação foi feita a caracterização das propriedades das carapaças cerâmicas utilizadas na FERESPE, complementada com o estudo de algumas soluções visando o seu reforço mecânico. Contudo, ainda há muito espaço para novos estudos e avaliações mais pormenorizadas das condições apresentadas.

Há diversos estudos que apontam para a possibilidade da utilização de fibras orgânicas sintéticas ou naturais, individual ou simultaneamente com as fibras cerâmicas, como método para melhorar as propriedades mecânicas em paralelo com a permeabilidade. Além disso, neste estudo foi gorada a possibilidade de avaliar o efeito da incorporação de fibras de vidro na carapaça cerâmica, pelo que seria pertinente um estudo nesse sentido.

É perceptível que os sistemas de reforço abordados fraturam pelo mesmo mecanismo, associado ao arrancamento das fibras da matriz cerâmica. Afigura-se de enorme interesse uma investigação sobre a alteração do estado superficial das fibras, tornando-as mais rugosas e, conseqüentemente, mais aderentes, de modo a atenuar o atual sistema de falha.

O efeito prejudicial do método de aplicação manual empregue para a areia reciclada abre portas para a discussão sobre os efeitos reais que os métodos utilizados para produzir a carapaça têm nas suas propriedades.

Neste trabalho foram examinadas as propriedades de carapaças produzidas a partir de uma mistura de 50% de areia reciclada e 50% de areia de aluminossilicatos. Tendo em conta a ambição de reduzir ao máximo a produção de resíduos cerâmicos, há interesse no estudo da utilização de 100% de areia reciclada.

É de conhecimento geral que o tratamento e a reciclagem de materiais cerâmicos é um processo muito complexo e difícil de reproduzir de maneira economicamente viável, o que torna a sua recuperação e reutilização um fator ainda mais importante. Porém, há que precisar sobre qualquer perda de propriedades que possa ocorrer quando a recuperação do material cerâmico é feita repetidamente, e se há um limite no número de vezes que estes materiais podem ser reutilizados sem comprometer as características que são necessárias ao processo de IC. A utilização de fibras pode também atuar como entrave à futura recuperação das carapaças, o que deve ser analisado.

Já foi referido que os ensaios de flexão em três pontos, apesar de significativos, não representam de uma forma totalmente fiel o comportamento de uma carapaça cerâmica durante o seu processamento até ao fim do vazamento do metal. No tempo de vida de uma carapaça, são-lhe exercidos esforços mecânicos durante o fabrico, descerificação e vazamento em que as cargas são exercidas sobre toda a área superficial da carapaça, enquanto, no ensaio de três pontos, há um foco da carga numa zona específica do corpo cerâmico. Algumas das carapaças estudadas nesta dissertação evidenciaram valores de resistência à flexão bastante próximos. De modo a avaliar de modo mais fiel a *performance* real de carapaças, assegurando a sua aplicabilidade ao processo de IC, é recomendado que se efetuem outros ensaios mais representativos, como um *burst test* ou ensaio de flexão em quatro pontos.

Os ensaios dilatométricos realizados revelaram a possibilidade da densificação das carapaças estar incompleta, sendo possível o seu incremento a temperaturas além dos 1000°C a que decorre atualmente a sinterização. Torna-se interessante avaliar o desempenho dilatométrico de carapaças no estado em verde, para possuir uma melhor percepção das contrações e dilatações envolvidas na descerificação e sinterização das carapaças, e nos possíveis efeitos que isso possa ter no aparecimento de defeitos que possam provocar a falha das carapaças a jusante. A realização de ensaios dilatométricos numa gama de temperaturas superiores a 1100°C também seria interessante de modo a perceber se realmente existe possibilidade para maior densificação e agregação dos refratários das carapaças. Caso se verifique a maior densificação a uma gama maior de temperatura, pode ser interessante avaliar os efeitos que a sinterização a uma temperatura superior tem nas propriedades mecânicas e na permeabilidade das carapaças cerâmicas.

8 Bibliografia

- [1] FERESPE. (2021, 16/03/2021). *Company*. Available: <https://ferespe.com/company/>
- [2] FERESPE. (2021, 16/03/2021). *Investment Casting*. Available: <https://ferespe.com/solutions/investment-castings/>
- [3] R. Prasad, "Progress in investment castings," in *Science and Technology of Casting Processes*: IntechOpen, 2012.
- [4] S. Pattnaik, D. B. Karunakar, and P. K. Jha, "Developments in investment casting process—A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 11, pp. 2332-2348, 2012/11/01/ 2012.
- [5] L. F. M. P. M. Moreira, "Desenvolvimento da Metodologia de Fabrico de Protótipos de Torneiras pelo Processo da Cera Perdida," Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [6] A. International, *ASM Handbook - Casting*. 1988. Volume 15.
- [7] J. E. Fritz. *The Investment Casting process*. (2021, 20/03/2021). Available: <https://www.investmentcasting.org/what-is-investment-casting.html>
- [8] U. Basheer, A.-F. M.N, and A. Noor, "Current Issues and Problems in the Joining of Ceramic to Metal (Free download)," 2016, p. 35.
- [9] M. Gromada, A. Świeca, M. Kostecki, A. Olszyna, and R. Cygan, "Ceramic cores for turbine blades via injection moulding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 220, pp. 107-112, 2015/06/01/ 2015.
- [10] R. Craig, J. Eick, and F. J. J. o. D. R. Peyton, "Properties of natural waxes used in dentistry," vol. 44, no. 6, pp. 1308-1316, 1965.
- [11] R. Singh, S. J. J. o. M. S. Singh, and Technology, "Effect of process parameters on surface hardness, dimensional accuracy and surface roughness of investment cast components," vol. 27, no. 1, pp. 191-197, 2013.
- [12] R. Singh, S. Singh, and G. Singh, "Dimensional Accuracy Comparison of Investment Castings Prepared with Wax and ABS Patterns for Bio-medical Application," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 851-858, 2014/01/01/ 2014.
- [13] R. Williams, "World Investment Casting Market Review," presented at the EICF International Conference Porto, 2018.
- [14] S. N. Bansode, V. M. Phalle, and S. S. Mantha, "Influence of Slurry Composition on Mould Properties and Shrinkage of Investment Casting," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, no. 3, pp. 763-773, 2020/03/01 2020.
- [15] J. Bundy and S. J. I. J. o. M. Viswanathan, "Characterization of zircon-based slurries for investment casting," vol. 3, no. 1, pp. 27-37, 2009.
- [16] J. D. Simas, "Fundição de Turbinas em Aluminetos de Titânio," Dissertação do MIEM, FEUP, 2015.
- [17] D. S. Viswanath, T. Ghosh, D. H. L. Prasad, N. V. K. Dutt, and K. Y. Rani, *Viscosity of Liquids heory, Estimation, Experiment, and Data*. Springer Netherlands, 2007.
- [18] D. M. Kline, "Controlling strength and permeability of silica investment casting molds," 2010.
- [19] P. P. Huang, G. Lu, Q. S. Yan, and P. Mao, "Effect of Ceramic and Nylon Fiber Content on Composite Silica Sol Slurry Properties and Bending Strength of Investment Casting Shell," (in English), *Materials*, Article vol. 12, no. 17, p. 10, Sep 2019, Art. no. 2788.
- [20] C. Yuan and S. Jones, "Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 23, no. 3, pp. 399-407, 2003/03/01/ 2003.

- [21] S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim, J.-H. J. Kim, and Y.-C. Song, "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 3, pp. 232-240, 2010/03/01/ 2010.
- [22] Z. Harun, N. H. Kamarudin, N. A. Badarulzaman, and M. S. Wahab, "Shell Mould Composite with Rice Husk," *Key Engineering Materials*, vol. 471-472, pp. 922-927, 02/01 2011.
- [23] S. Pattnaik, "Influence of sawdust on the properties of the ceramic shell used in investment casting process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 1, pp. 691-707, 2017/10/01 2017.
- [24] K. Lü, X.-d. Liu, Z.-x. Du, and Y.-f. J. C. F. Li, "Bending strength and fracture surface topography of natural fiber-reinforced shell for investment casting process," vol. 13, no. 3, pp. 211-216, 2016.
- [25] V. C. L. a. K. H. Obla, "Effect of fiber length variation on tensile properties of carbon-fiber cement composites," *Composites Engineering*, vol. 4, 1994.
- [26] S. Singh and R. Singh, "Investment Casting (Disposable Mold)," 2017.
- [27] S. Jones and C. Yuan, "Advances in shell moulding for investment casting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 135, no. 2, pp. 258-265, 2003/04/20/ 2003.
- [28] K. Young *et al.*, "Strong Dependence of Mechanical Properties on Fiber Diameter for Polymer-Nanotube Composite Fibers: Differentiating Defect from Orientation Effects," *ACS Nano*, vol. 4, no. 11, pp. 6989-6997, 2010/11/23 2010.
- [29] K. Lü, X. Liu, Y. Lu, and Z. Du, "The interfacial characteristics and action mechanism of fibre-reinforced shell for investment casting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 5, pp. 2895-2902, 2017/11/01 2017.
- [30] K. Hannawi, H. Bian, W. Prince-Agbodjan, and B. Raghavan, "Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 86, pp. 214-220, 2016/02/01/ 2016.
- [31] F. McGee. (2014, 15/11/2020). *Como plantar taboas em um jardim*. Available: https://www.ehow.com.br/ramo-munguba-brotar-como_133484/
- [32] T. M. Chang-Seon Shon , Deuckhang Lee , Dichuan Zhang * and Jong R. Kim, "Can Common Reed Fiber Become an Effective Construction Material? Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Mortar Mixture Containing Common Reed Fiber," 2019.
- [33] L. Dehong, W. Zhao, J. Yehua, and Z. J. C. F. Rong, "Effect of aluminum silicate fiber modification on crack-resistance of a ceramic mould," vol. 9, no. 4, 2012.
- [34] K. Lü, X. Liu, Z. Du, and Y. Li, "Properties of hybrid fibre reinforced shell for investment casting," *Ceramics International*, vol. 42, no. 14, pp. 15397-15404, 2016/11/01/ 2016.
- [35] X. Li, J. S. Yao, D. Z. Tang, S. X. Niu, J. H. Yan, and C. X. Cao, *Effect of Fused Silica Fiber on the Shrinkage and Properties of Silica Based Ceramic Core* (Advanced Functional Materials). Singapore: Springer-Verlag Singapore Pte Ltd, 2018, pp. 599-607.
- [36] K. Lü, Z. Duan, X. Liu, and Y. Li, "Effects of fibre length and mixing routes on fibre reinforced shell for investment casting," *Ceramics International*, vol. 45, no. 6, pp. 6925-6930, 2019/04/15/ 2019.
- [37] A. F. B. S. Simões, "Economia circular na Indústria cerâmica," Instituto politécnico de Coimbra, 2017.
- [38] M. S. Almeida, A.; Dias, A., "Impactes Ambientais e Comércio de Emissões - Indústria

Cerâmica: um caso de estudo. , " Coimbra, 2004.

- [39] G. Kakuk, Á. Csanády, and I. Oldal, "Contributions to the modelling of the milling process in a planetary ball mill," *Reviews on advanced materials science*, vol. 22, 12/01 2009.
- [40] H. Mio, J. Kano, and F. Saito, "Scale-up method of planetary ball mill," *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 24, pp. 5909-5916, 2004/12/01/ 2004.
- [41] O. D. Neikov, "Chapter 2 - Mechanical Crushing and Grinding," in *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders (Second Edition)*, O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, and N. A. Yefimov, Eds. Oxford: Elsevier, 2019, pp. 65-90.
- [42] S. Amira, D. Dubé, and R. Tremblay, "Method to determine hot permeability and strength of ceramic shell moulds," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 8, pp. 1336-1340, 2011/08/01/ 2011.
- [43] P. R. G. Hein and L. J. M. C. y. t. Brancheriau, "Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens," vol. 20, no. 3, pp. 333-342, 2018.
- [44] *C 1161 - Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature*, 2013.
- [45] C. P. Romao, K. J. Miller, C. A. Whitman, M. A. White, and B. A. Marinkovic, "4.07 - Negative Thermal Expansion (Thermomiotic) Materials," in *Comprehensive Inorganic Chemistry II (Second Edition)*, J. Reedijk and K. Poeppelmeier, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2013, pp. 127-151.
- [46] D. U. d. Aveiro, "Análise Dilatométrica de Retração/Expansão e Sinterização dos Materiais," ed, 2021.
- [47] Unifrax. (2021, 20/03/2021). *Isofrax 1260c fiber*. Available: <https://www.unifrax.com/product/isofrax-1260c-fiber/>
- [48] *Wax Binder and Slurry Test Handbook*, 1988.
- [49] Z. Raheem, *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water 1*. 2019.