



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Daniel Borges Pinto

**ESTUDO DA CAVITAÇÃO-EROSÃO DE  
MATERIAIS OBTIDOS POR SINTERIZAÇÃO  
CARBONETO DE TUNGSTÊNIO**

VOLUME 1

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de  
Produção e Projeto orientada pelos Professores Doutores Luís Miguel Cardoso  
Vilhena Pereira da Silva e Amílcar Lopes Ramalho e apresentada ao  
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra.**

Outubro de 2020



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Estudo da cavitação-erosão de materiais obtidos por sinterização**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto.

### **Study of the Cavitation-Erosion of materials obtained by sintering**

Autor

**Daniel Borges Pinto**

Orientadores

**Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva**

**Amílcar Lopes Ramalho**

Júri

Presidente

**Professor Doutor Fernando Ventura Antunes**  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador

**Professor Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da  
Silva**  
Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

**Professor Doutor Mário Simões Correia**  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

**Coimbra, outubro, 2020**



## Resumo

Apesar de existirem alguns trabalhos já publicados, o estudo dos efeitos erosivos da cavitação de ligas de metal duro à base de carboneto de tungstênio, ainda não está devidamente efetuado. Em especial, a influência do material da fase ligante, no comportamento em situações de cavitação de materiais sinterizados à base de carboneto de tungstênio, não é suficientemente conhecida.

O objetivo principal desta dissertação, é caracterizar a resistência à cavitação de carboneto de tungstênio obtido por sinterização. Contudo, como no laboratório onde se desenvolveu o trabalho, não havia experiência prévia em estudos de cavitação, tornou-se imprescindível ultrapassar as fases finais do desenvolvimento de um equipamento de cavitação por ultrassons, bem como estabelecer as metodologias para quantificar e qualificar o dano resultante dos testes. Nesta dissertação são descritas as fases de montagem e de estudos prévios que se destinaram a validar procedimentos e a identificar e ultrapassar as dificuldades inerentes à adaptação da norma ASTM G32.

Inclui-se um protocolo de ensaio que se mostrou ajustado à aplicação do equipamento desenvolvido à caracterização de carboneto de tungstênio. É também apresentado um conjunto de resultados que inclui a quantificação da evolução da cavitação ao longo do tempo de ensaio, bem como a caracterização da morfologia observada por microscopia eletrônica de varrimento nas superfícies sujeitas a cavitação. O equipamento desenvolvido mostrou-se adequado à caracterização do comportamento de materiais submetidos a cavitação, e permitiu identificar que a erosão por cavitação em materiais sinterizados de carboneto de tungstênio ocorre por remoção da fase ligante deixando sem suporte os grãos de carboneto de tungstênio, que posteriormente serão removidos.

**Palavras-chave:** Cavitação por ultrassons; erosão; carboneto de tungstênio; protocolo de ensaio;



## Abstract

Although there are some published studies, the erosive effects caused by cavitation on tungsten carbide-based alloys, is not yet properly done. In particular, the influence of the binder phase material on the behaviour of sintered materials based on tungsten carbide subjected to cavitation situations is not sufficiently known.

The main objective of this dissertation is to characterize the cavitation resistance of tungsten carbide obtained by sintering. However, as there was no previous experience in cavitation studies in the laboratory where the work was developed, it became essential to overcome the final stages of the development of an ultrasonic cavitation equipment, as well as to establish the methodologies to quantify and qualify the resulting damage caused by the tests. This dissertation describes the stages of assembly and previous studies that were intended to validate procedures and to identify and overcome the difficulties inherent to the adaptation of the ASTM G32 standard.

A test protocol is included, which proved to be adjusted to the application of the developed equipment for tungsten carbide characterization. A set of results is also presented that includes the quantification of the evolution of cavitation over the test time, as well as the characterization of the morphology observed by scanning electron microscopy on surfaces subject to cavitation. The developed equipment proved to be suitable for characterizing the behaviour of materials subjected to this phenomenon, and allowed to identify that cavitation erosion in sintered tungsten carbide materials occurs by removing the binding phase leaving tungsten carbide grains unsupported, which subsequently will be removed.

**Keywords** Ultrasonic cavitation; erosion; tungsten carbide; test protocol;





## Índice

Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e Siglas .....	xi
Simbologia.....	xi
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. A cavitação .....	3
2.2. Consequências da cavitação e importância do seu estudo .....	4
2.3. Como estudar a Cavitação .....	6
2.3.1. Cavitação hidrodinâmica .....	6
2.3.2. Cavitação vibratória através de ultrassons (acústica) .....	8
2.3.3. Cavitação ótica e de partículas .....	9
2.4. Consequências da cavitação.....	10
2.4.1. Erosão .....	10
2.4.2. Deformação plástica .....	11
2.5. Evolução da erosão por cavitação.....	11
2.6. Carboneto de Tungstênio .....	12
2.6.1. Variações no ligante e estudos previamente conduzidos.....	13
3. Desenvolvimento do equipamento .....	15
3.1. Equipamento de erosão por ultrassons.....	15
3.1.1. Estrutura de suporte .....	15
3.1.2. Transdutor.....	17
3.1.3. Contra-corpo vibratório .....	18
3.1.4. Porta-amostras .....	18
3.1.5. Câmara anecoica.....	19
3.1.6. Amplificador e controlador .....	20
3.1.7. Sistema de regulação térmica .....	20
3.2. Equipamentos complementares .....	22
4. Estabelecimento de metodologias e casos práticos .....	27
4.1. Proposta inicial de utilização .....	27
4.2. Espécimes .....	28
4.3. Fase inicial de testes e primeira iteração .....	29
4.4. Segunda iteração .....	31
4.5. Solução proposta.....	32
4.6. Resultados obtidos .....	33
5. Protocolo de ensaio.....	35
5.1. Polimento .....	35
5.2. Preparação da montagem e início do teste.....	36
5.3. Intervalos de medição .....	36
5.4. Tratamento de dados .....	37

5.5. Análise superficial através de MEV .....	38
6. Conclusão .....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio evidenciando as diferentes fases da água perante a pressão e a temperatura (Sun, Xiao and Song, 2017).....	3
Figura 2 – Fases de uma bolha de vapor gerada por cavitação junto a uma superfície, adaptado (Dular <i>et al.</i> , 2019).....	4
Figura 3 - a) Turbina hidráulica apresentando danos por cavitação, RODELTA, 2017; b) Restrição num escoamento com origem de cavitação, Monsen, 2017;.....	5
Figura 4 - Paredes de um cilindro com danos causados por cavitação, CONSTRUCTIONEQUIPMENT, 2018.....	5
Figura 5 - Diferentes tipos de cavitação segundo Lauterborn, 1980 (modificado).....	6
Figura 6 - Condução com redução de secção transversal (Liu <i>et al.</i> 2017).....	7
Figura 7 - Estrutura utilizada para estudar cavitação hidrodinâmica (Gopalan, Katz and Kino, 1999).....	7
Figura 8 - Equipamento utilizado em cavitação acústica utilizado por Bai <i>et al.</i> 2008 (modificado).....	8
Figura 9 - Representação de um sistema de cavitação óptica (Gu <i>et al.</i> 2020).....	9
Figura 10 - Gráficos evidenciando os comportamentos esperados para a taxa de erosão e perda de massa segundo a norma ASTM G32-03.....	12
Figura 11 - Equipamento de erosão por ultrassons construído.....	15
Figura 12 - Suporte lateral.....	16
Figura 13 - Estrutura de acoplamento do transdutor.....	16
Figura 14 - Estrutura projetada.....	17
Figura 15 - Estrutura construída.....	17
Figura 16 - Conjunto transdutor e <i>ultrasonic horn</i> utilizados.....	17
Figura 17 - Corpo vibratório projetado.....	18
Figura 18 - Porta-amostras utilizado.....	19
Figura 19 - Câmara anecoica construída.....	19
Figura 20 - Amplificador utilizado.....	20
Figura 21 - Esquema do circuito de regulação térmica.....	21
Figura 22 - Circuito de refrigeração construído.....	21
Figura 23 - Equipamento de limpeza por ultrassons utilizado.....	22
Figura 24 - Balança utilizada.....	23
Figura 25 - Conjunto de fotografia utilizado.....	23
Figura 26 - Perfilómetro utilizado.....	24

Figura 27 - Exemplo de medição obtida pelo perfilómetro .....	24
Figura 28 – Máquina de polimento utilizada .....	25
Figura 29 - Microscópio eletrónico de varrimento (MEV) utilizado .....	26
Figura 30 - Perda de volume em função do tempo .....	30
Figura 31 - Taxa de erosão em função do tempo .....	30
Figura 32 - Gráfico do perfil superficial da amostra WC-Ni de acordo com as diferentes limpezas .....	32
Figura 33 - Perda de volume da amostra WC-CoCr .....	33
Figura 34 - Taxa de erosão da amostra WC-CoCr .....	33
Figura 35 - Zonas afetadas por cavitação na amostra WC-Co .....	34
Figura 36 - Grãos com presença de fraturas numa área com elevada remoção de ligante..	34

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composições das diferentes amostras .....	28
Tabela 2 - Propriedades mecânicas das diferentes amostras .....	28



## **SIMBOLOGIA E SIGLAS**

### **Simbologia**

$m$  = massa em g;

$\rho$  = densidade da amostra em  $\text{g/mm}^3$ ;

$\Delta V$  = variação de volume total;

$A$  = área superficial sujeita a cavitação;

$\Delta t$  = tempo total de teste;

### **Siglas**

ASTM – American Society for Testing and Materials;

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel;

AISI – American Iron and Steel Institute;

MDER – Medium depth erosion;





## 1. INTRODUÇÃO

A cavitação é muito pouco conhecida como fenómeno e a utilização desta, para estudo de materiais obtidos por sinterização, ainda é pouco comum.

Uma superfície sujeita ao escoamento de um fluido, apresenta diferenças de pressão nas arestas. O mesmo acontece no caso de uma superfície se movimentar num fluido. Como se sabe, a temperatura de ebulição diminui com a diminuição da pressão e, quando a pressão é suficientemente baixa para se alcançar a pressão de vapor do fluido para uma dada temperatura, este entra em ebulição criando bolhas de vapor que irão implodir, originando ondas de choque e *microjets* de elevada energia. Esta alteração de fase devido a diferenças de pressão é denominada de cavitação. Quando estas “pequenas explosões” e *microjets* são adjacentes à superfície de um material, provocam o seu desgaste, originando perdas de material e volume que podem ser determinantes para o prazo de vida de determinadas máquinas sujeitas a este fenómeno (FRANC, 2010).

A sinterização de materiais é um processo que ocorre na natureza, que pela sua elevada eficácia se industrializou, tornando-se uma das indústrias mais promissoras, pois neste método, o desperdício de material é muito reduzido e as peças obtidas por este são de elevada qualidade. Este processo, consiste em unir partículas de pó, que depois de compactadas são elevadas a temperaturas próximas das de fusão do material base, originando a ligação das partículas de pó, formando um material coeso, denso e de boas propriedades mecânicas (GERMAN, 2016).

Comumente é utilizada a cavitação como objeto de estudo de películas protetoras, para proteção superficial de maquinaria sujeita a condições de cavitação. No entanto, este fenómeno tem ainda possibilidades pouco exploradas, tal como o estudo de materiais sinterizados.

A temática abordada nesta dissertação, consiste na elaboração de um plano de trabalho para que seja possível estudar amostras de carboneto de tungsténio, produzidas com diferentes ligantes, de modo a obter resultados estáveis e passíveis de serem comparados entre si, bem como testes realizados por outros laboratórios. Esta definição de procedimentos foi criada à luz da norma ASTM G32-03 e adaptada à realidade laboratorial do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.



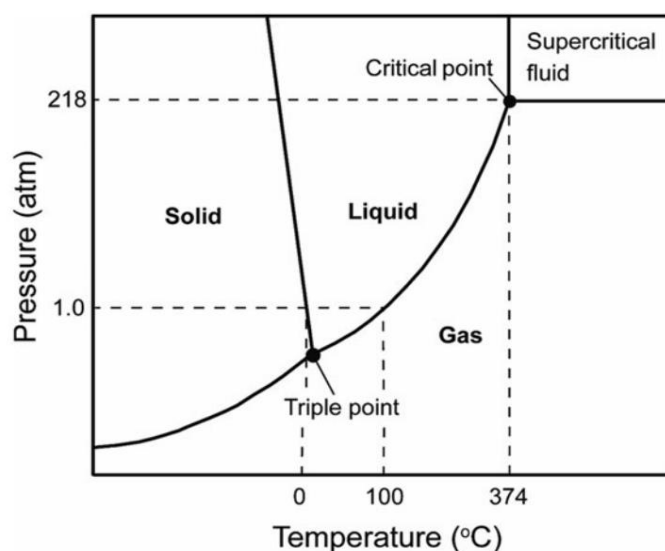
---

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. A cavitação

O nome cavitação é atribuído ao fenómeno da nucleação de bolhas de vapor num meio líquido, principalmente devido à súbita queda de pressão num determinado ponto, abaixo da pressão de vapor do líquido à mesma temperatura.

A transformação de um líquido em vapor tem uma explicação simples e bastante intuitiva, após a análise de um diagrama de fases de um elemento que possua os três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. A Figura 1 representa as diferentes fases da água e, através da análise desta, é possível perceber que para a temperatura de 100 °C e pressão superior a 1 atm, existe água em estado líquido e que, para a mesma temperatura e pressão inferior a 1 atm, se obtém vapor de água. Assim, torna-se trivial a diferença entre cavitação e evaporação, onde o vapor surge devido a um aquecimento do fluido (Brennen, 2013).



**Figura 1** – Diagrama de equilíbrio evidenciando as diferentes fases da água perante a pressão e a temperatura (Sun, Xiao and Song, 2017)

As 7 fases que uma bolha de vapor (gerada pelo fenómeno de cavitação junto a uma superfície) atravessa, encontram-se esquematizadas na Figura 2. Após a formação desta numa zona de baixa pressão, desloca-se para áreas de maior pressão (1), ficando instável.

Uma vez que a diminuição da pressão é proporcional à proximidade da superfície sujeita a cavitação, a zona da bolha que estiver mais distante da superfície encontrar-se-á sujeita a uma maior pressão, logo esta zona irá colapsar com maior rapidez que a zona mais próxima da superfície (2). Devido a esta implosão, são formadas ondas de choque bem como um “microjet”, que possui uma elevada velocidade na direção da superfície (3). O jato, perfura a zona de menor pressão da bolha dividindo-a e atinge a superfície, provocando deformações nesta devido à sua enorme energia (4). Após esta rutura da bolha, as suas subdivisões (5) seguem o mesmo processo (6), danificando a superfície até a sua extinção (7) (Dular *et al.*, 2019).

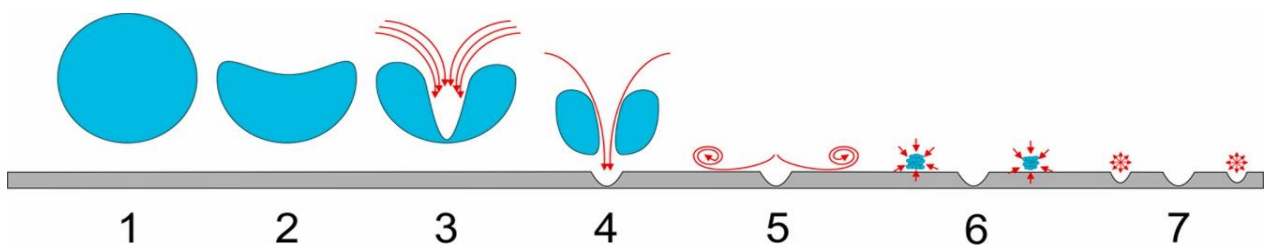
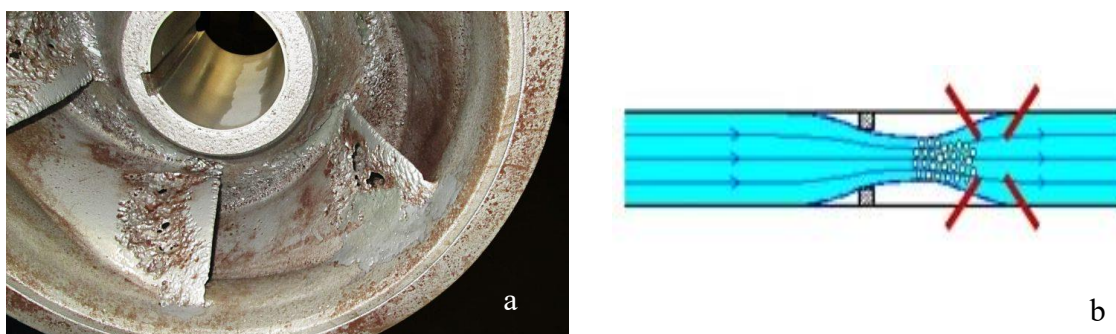


Figura 2 – Fases de uma bolha de vapor gerada por cavitação junto a uma superfície, adaptado (Dular *et al.*, 2019)

## 2.2. Consequências da cavitação e importância do seu estudo

A cavitação, pode ocorrer em qualquer fluido sujeito a quedas de pressão suficientemente grandes, que provoquem a formação de bolhas de vapor. Este fenómeno é normalmente indesejado devido aos seus impactos negativos tais como avarias, ruído e vibrações indesejadas.

Os casos mais comuns de ruína por cavitação encontram-se em bombas/turbinas hidráulicas (Figura 3a), em hélices de uso naval e em escoamentos com restrições de caudal ou válvulas (Figura 3b). Nos dois primeiros casos, o movimento das pás no fluido, gera zonas de baixa pressão que são tanto menores quanto maior for a velocidade de rotação. No terceiro caso, uma diminuição significativa da secção, origina um aumento da velocidade do fluido e, segundo a Lei de Bernoulli, o aumento de velocidade num escoamento leva a uma redução de pressão. Em ambos os casos, esta diminuição de pressão pode ser suficiente para que a pressão de vapor seja alcançada, originando cavitação e, posteriormente, remoção de material (Bernoulli, 1738; Tullis, 1989).



**Figura 3** - a) Turbina hidráulica apresentando danos por cavitação, RODELTA, 2017; b) Restrição num escoamento com origem de cavitação, Monsen, 2017;

No entanto, este acontecimento também está presente em situações onde a movimentação de fluidos não possui um papel ativo, como é o caso dos motores diesel. Nesta situação, a cavitação ocorre nas paredes dos cilindros devido às vibrações do pistão, proporcionando ciclos de pressão do líquido refrigerante que banha as paredes do cilindro, originando cavitação que pode levar à ruína do motor, tal como ilustrado na Figura 4 (Staff, 2015).



**Figura 4** - Paredes de um cilindro com danos causados por cavitação, CONSTRUCTIONEQUIPMENT, 2018.

Uma vez que este fenómeno é destrutivo e muitas vezes impercetível, o seu estudo e prevenção tornam-se essenciais num mundo tão competitivo como o atual, onde falhas deste tipo são extremamente desaconselhadas.

## 2.3. Como estudar a Cavitação

Este fenómeno, apesar de previamente conhecido pela sua presença em bombas hidráulicas e hélices de uso naval, foi mencionado pela primeira vez por Euler, 1755. Esta nobre menção por parte de Euler estava relacionada com a cavitação hidrodinâmica.

Com o avanço da tecnologia, a cavitação passou também a ser estudada com tecnologias de base vibratória, ótica e de partículas (Shah *et al.* 1999).

O estudo deste tema, pode ser dividido em cavitação formada por tensão ou por deposição de energia. A cavitação hidrodinâmica e vibratória são o resultado de tensões acumuladas num líquido. Por outro lado, a cavitação ótica e de partículas resultam de uma deposição de energia local. Na Figura 5 encontra-se um esquema dos diferentes tipos de cavitação (Lauterborn, 1980).

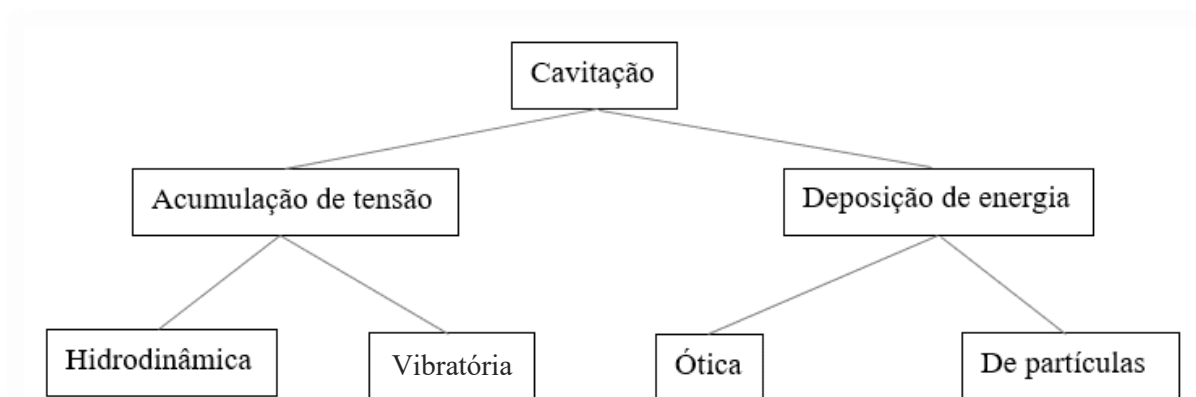


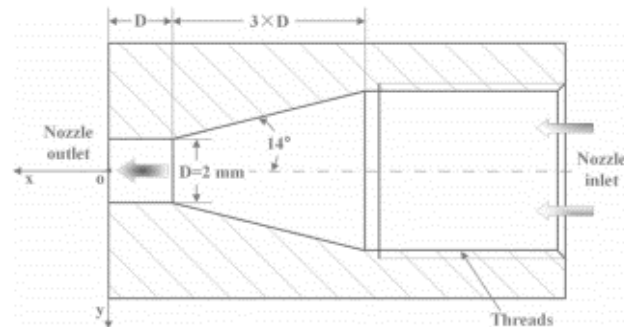
Figura 5 - Diferentes tipos de cavitação segundo Lauterborn, 1980 (modificado)

### 2.3.1. Cavitação hidrodinâmica

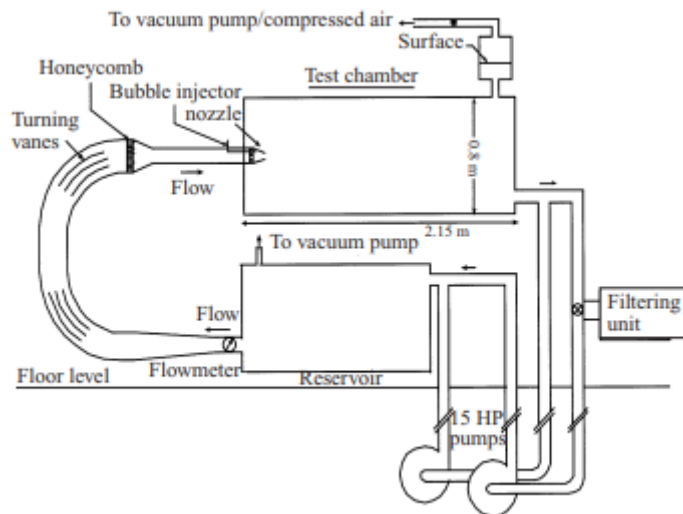
A cavitação hidrodinâmica baseia-se no escoamento de um líquido sujeito a diferenças de pressão obtidas devido a variações de velocidade no sistema tais como alterações geométricas no canal de escoamento (Shah *et al.* 1999; Brennen, 2013).

Se um fluido encontrar uma zona com redução de secção, a pressão irá aumentar significativamente. Consequentemente, a velocidade do escoamento irá aumentar. Assim que o fluido atravessa a constricção, existe formação de turbulências no escoamento que levam a perdas de atrito e, por sua vez, uma queda repentina de pressão. Se a pressão mínima alcançada for menor que a pressão de vapor do líquido, haverá então formação de cavitação (Shah *et al.* 1999; Ozonek, 2012).

A Figura 6 representa uma conduta com alterações geométricas capazes de proporcionar cavitação (Liu *et al.*, 2017). A Figura 7 representa uma estrutura utilizada para estudar cavitação hidrodinâmica recorrendo uma conduta semelhante à da Figura 6 (Gopalan, Katz *and* Knio, 1999).



**Figura 6** - Conduta com redução de secção transversal (Liu *et al.* 2017)



**Figura 7** - Estrutura utilizada para estudar cavitação hidrodinâmica (Gopalan, Katz *and* Kino, 1999)

Em engenharia, o estudo da cavitação segundo a vertente hidrodinâmica é especialmente útil para assessorar o projeto e desenvolver métodos para evitar a formação deste fenómeno destrutivo. É, também, bastante frequente na avaliação da influência dos diferentes acabamentos superficiais e seus impactos em escoamentos passíveis de sofrer cavitação. A maior desvantagem deste método na análise do comportamento de materiais, recai na lenta progressão dos danos causados face a outros métodos alternativos.

### 2.3.2. Cavitação vibratória através de ultrassons (acústica)

Este tipo de cavitação recai em ciclos de variação de pressão através da utilização de ultrassons para gerar movimentos vibratórios. Cada ciclo possui uma fase de baixa pressão e outra de alta pressão que são responsáveis pela criação e implosão de bolhas, respetivamente (Apfel, 1981).

A gama de ultrassons inicia-se a 16 kHz, ponto em que o ouvido humano deixa de ter sensibilidade. O intervalo utilizado neste método é compreendido entre 20 kHz e 100 kHz, uma gama de frequências comumente utilizada em ambiente laboratorial (Shah, 1999).

O estudo da cavitação por via acústica utiliza um transdutor ultrassónico como propulsor do processo, como representado na Figura 8. Este converte energia em vibração que, conseqüentemente, irá realizar os ciclos de pressão necessários para haver geração de cavitação. O ciclo vibratório, é composto por uma fase de expansão em que há uma súbita queda de pressão seguida da formação e crescimento de bolhas de vapor e outra de compressão, em que a pressão aumenta substancialmente provocando o colapso destas bolhas (Apfel, 1981; Shah, 1999; Franc *and* Michel, 2010).

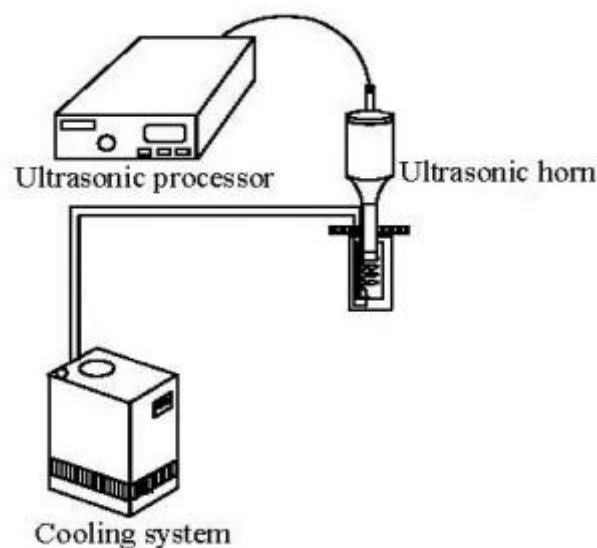


Figura 8 - Equipamento utilizado em cavitação acústica utilizado por Bai *et al.* 2008 (modificado)

Este método, munido de uma frequência de funcionamento elevadíssima, é capaz de acelerar o processo destrutivo originado por cavitação. No caso de cavitação hidrodinâmica, resultados conclusivos na análise de materiais podem demorar semanas, ao invés de horas no caso de cavitação acústica (Apfel, 1981; Shah, 1999).



---

Assim, este método torna-se o ideal para o estudo de materiais em espaço laboratorial e, também, o escolhido para o desenvolvimento deste estudo.

### 2.3.3. Cavitação ótica e de partículas

Nestes casos, a criação de bolhas de vapor é conseguida através da concentração de energia num determinado ponto do líquido, causando um aumento de temperatura localizada.

Para a cavitação ótica, esta concentração é conseguida através da junção de um laser de alta intensidade com lentes focais. O objetivo desta combinação passa por gerar uma elevada concentração de energia num dado ponto, que por sua vez provoca um aumento abrupto de temperatura nesse ponto, levando à criação de bolhas de vapor através da evaporação do líquido. Este método é bastante utilizado para estudar o comportamento de bolhas de vapor em fluidos (Shah, 1999). No entanto, também pode ser utilizado para estudar os danos causados pelas bolhas de vapor em materiais, tal como Gu *et al.*, 2020, no seu estudo com ferro fundido, cujo *setup* está representado na Figura 9.

No que toca a cavitação através de partículas, um fotão é utilizado para atravessar o líquido. Esta partícula carregada, ao romper o líquido inicia um rasto de iões, que por sua vez interagem com eletrões libertando enormes quantidades de energia, que origina um aumento súbito da temperatura numa área diminuta e localizada. Esta alteração de temperatura é suficiente para originar bolhas de vapor ao longo do rasto do fotão (Shah, 1999).

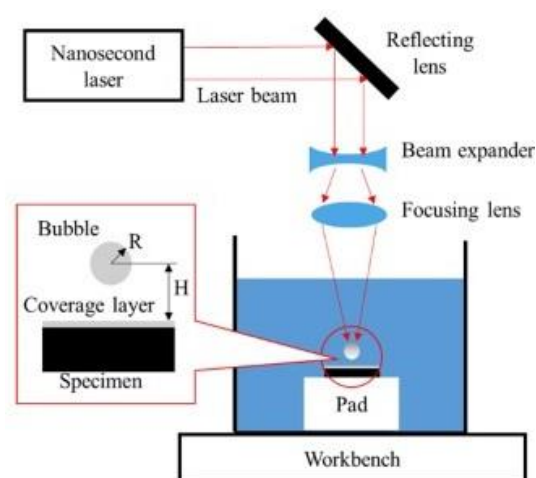


Figura 9 - Representação de um sistema de cavitação ótica (Gu *et al.* 2020)

## 2.4. Consequências da cavitação

A cavitação é um fenômeno destrutivo caracterizado por causar erosão e deformação plástica num material.

### 2.4.1. Erosão

A erosão é um dano causado pelo impacto de partículas, sendo elas sólidas, líquidas ou gasosas. Assim, a cavitação proporciona desgaste erosivo devido a ondas de choque e *microjets* formados durante a implosão de bolhas na periferia do material (Hutchings and Shipway, 2017).

Hammit, 1979, tentou relacionar os danos causados por cavitação com as propriedades mecânicas de materiais estruturalmente idênticos. Percebeu que a profundidade média de penetração é inversamente proporcional à capacidade de um material absorver energia. Notou ainda que, a profundidade média de penetração é também inversamente proporcional à dureza desse mesmo material. Assim, a dureza de um material é uma propriedade facilmente relacionável com a erosão causada por cavitação.

No que toca a materiais com diferentes acabamentos superficiais, os resultados não são tão lineares quanto os obtidos por Hammit, 1979. Materiais com diferentes acabamentos superficiais e durezas semelhantes, apresentaram diferenças na resistência à erosão por cavitação (PROCOPIAK *et al.*, 2000).

Tanto Rao and Kung, 1987, como Karimi, 1989, defendem que a resistência à fadiga de um material, é a propriedade que mais se aproxima à sua resistência contra a erosão gerada por cavitação. Sugerem que o processo de erosão é causado por fadiga cíclica. Mais tarde, Xiaojun *et al.*, 2003, verificou que a taxa de erosão de um material sujeito a cavitação está fortemente relacionada com a resistência à fadiga, mostrando que a resistência ao dano por cavitação, medida tanto pelo tempo de incubação como pela taxa de perda de massa, apresenta uma boa correlação com a resistência à fadiga.

---

## 2.4.2. Deformação plástica

Uma superfície sujeita a uma força suficientemente elevada, sofrerá deformação plástica, ou seja, deformação permanente.

Este tipo de deformação ocorre, principalmente, devido ao deslocamento relativo entre planos cristalinos paralelos e adjacentes aquando da aplicação de tensões, numa superfície, superiores à tensão de corte limite elástico do material. Estas interações entre camadas provocam discordâncias nas cadeias criando tensões acrescidas entre elas que, por sua vez, irão aumentar a tensão de cedência do material (Padilha, 2000).

A existência de ondas de choque durante a cavitação, pode originar danos nas camadas cristalinas abaixo da superfície, levando à formação de irregularidades e micro-cavidades. Por outro lado, os “*microjets*” possuem uma elevada energia aplicada sobre a superfície num ínfimo espaço de tempo, o que leva à deformação permanente e fissuração da área onde atua. Em situações em que a tensão de corte gerada por este fenómeno é inferior à tensão de corte limite elástico do material, apesar de não haver deformação plástica, pode existir formação e propagação de microfissuras, que por sua vez, debilitam a integridade da superfície (Haosheng *and* Shihan, 2009).

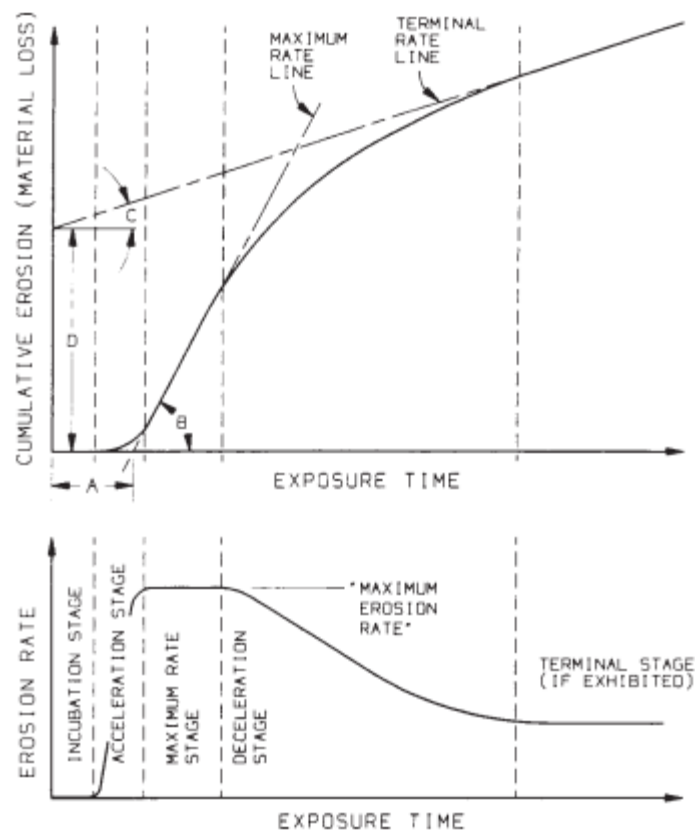
## 2.5. Evolução da erosão por cavitação

Através de uma leitura atenta da norma ASTM G32-03, que é a norma abordada nesta dissertação, é possível conhecer os comportamentos típicos que se esperam observar durante a caracterização de uma amostra.

A norma ilustra, utilizando dois gráficos, todos os diferentes estágios expectados. Nestes gráficos, representados na Figura 10, é possível apreciar comportamentos típicos para a perda de volume e para a taxa de erosão no gráfico superior e inferior, respetivamente.

Reparando no gráfico inferior, é facilmente perceptível que existem 5 fases bem distintas. Estas fases são denominadas por ordem cronológica por incubação, aceleração, taxa de erosão máxima, desaceleração e, finalmente, fase terminal.

O período de incubação, é o momento inicial em que não se verificam danos por cavitação, ou estes não são perceptíveis. A zona com taxa de erosão máxima, é caracterizada por se situar entre uma zona de aceleração e uma zona de desaceleração (ASTM G32, 2016).



NOTE 1—A = nominal incubation time;  $\tan B$  = maximum erosion rate;  $\tan C$  = terminal erosion rate; and D = terminal line intercept.

**Figura 10** - Gráficos evidenciando os comportamentos esperados para a taxa de erosão e perda de massa segundo a norma ASTM G32-03

## 2.6. Carboneto de Tungstênio

O carboneto de tungstênio, é normalmente associado à categoria de metais duros devido à sua elevada dureza, quando comparado com outros metais. Ainda que caracterizado como metal duro, este é um compósito obtido por sinterização onde constam carbono, tungstênio e um ou mais elementos ligantes. Os ligantes mais utilizados com o carboneto de tungstênio são o cobalto, o níquel e o ferro (Upadhyaya, 1998; AZoM, 2020).

No que toca a microestrutura, esta está diretamente ligada ao desempenho de qualquer material. Upadhyaya, 1998, verificou que a microestrutura do carboneto de tungstênio depende principalmente dos seguintes fatores: composição química do ligante

---

utilizado; tamanho, forma e distribuição das partículas de carboneto de tungstênio; falta ou excesso de carbono.

O controlo destes parâmetros é utilizado para definir propriedades físicas tais como o tamanho de carbonetos, a contiguidade entre partículas ou alocação do ligante. Estes aspetos físicos contribuem para o comportamento mecânico final do material.

### **2.6.1. Variações no ligante e estudos previamente conduzidos**

O estudo do comportamento do carboneto de tungstênio sujeito a cavitação é bastante vasto, especialmente no que toca à utilização deste composto como película protetora de um material-base distinto. Foram conduzidos estudos prévios com o fim de analisar os efeitos da percentagem de cobalto no ligante de um filme protetor de carboneto de tungstênio onde se verificou que o incremento da percentagem de cobalto proporciona uma diminuição da dureza, no entanto, a tenacidade à fratura aumenta, o que se traduz numa redução da perda de volume ao longo do tempo. Estudos conduzidos por Lamana *et al.* constataram que o aumento de dureza não é o fator preponderante, concluíram ainda, que a elevada porosidade e existência de defeitos, tais como microfissuras ou impurezas são fatores com uma capacidade dominante de comprometer a resistência à erosão (Lamana, Pukasiewicz *and* Sampath, 2018).

Diferentes técnicas de deposição de filmes tais como deposição por laser (Tam, Cheng *and* Man, 2002; Zhang *et al.*, 2009) e HVOF (Lamana, Pukasiewicz *and* Sampath, 2018; Ding *et al.*, 2020; Kanno, Takagi *and* Arai, 2020), também foram analisados, onde se verificou que as películas depositadas por HVOF possuem menor resistência ao desgaste. Foram ainda realizados estudos acerca do comportamento de um filme protetor de carboneto de tungstênio com diferentes ligantes tais como: níquel, crómio e ferro (Tam, Cheng *and* Man, 2002); cobalto e crómio (Ding *et al.*, 2020).

No entanto, à data desta dissertação, apenas foi encontrado um estudo relativo aos efeitos da cavitação em carboneto de tungstênio como material base, sendo que o ligante foi cobalto. Este estudo realizado por (Pugsley *and* Allen, 1999), aborda o comportamento de diferentes aspetos microestruturais e os seus efeitos na resistência à cavitação, onde os autores concluíram que existem dois regimes de erosão separados pelo tamanho de grão. Para um tamanho de grão inferior a 1  $\mu\text{m}$ , a perda de material situa-se em aglomerados e a resistência à erosão é inversamente proporcional ao teor de cobalto. No entanto, para um

tamanho de grão superior a  $1\ \mu\text{m}$ , a perda de material é localizada e ocorre preferencialmente pela remoção do ligante, o que leva a uma eventual perda de grãos de carboneto de tungstênio e, neste caso, a resistência à erosão aumenta com a adição de cobalto, pois promove-se a ligação entre os grãos de carboneto de tungstênio.

Tendo em conta que os estudos de cavitação já realizados em compósitos à base de carboneto de tungstênio são reduzidos, esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver um equipamento de erosão por ultrassons que futuramente permita caracterizar o comportamento de compósitos à base de carboneto de tungstênio, bem como estudar a influência de diferentes ligantes.

---

## 3. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

### 3.1. Equipamento de erosão por ultrassons

Equipamento de erosão por ultrassons, é o nome dado ao conjunto de elementos necessários para gerar cavitação ultrassônica de uma forma controlada.

Este conjunto, representado na Figura 11, baseia-se na norma ASTM G32-03 e os elementos constituintes encontram-se descritos e caracterizados em maior detalhe nos subcapítulos 3.1.1 a 3.1.7.



Figura 11 - Equipamento de erosão por ultrassons construído

#### 3.1.1. Estrutura de suporte

Este elemento é responsável por suportar o transdutor, o recipiente onde a amostra é mergulhada e inclui um medidor de profundidade, que se encarrega do suporte do porta-amostras.

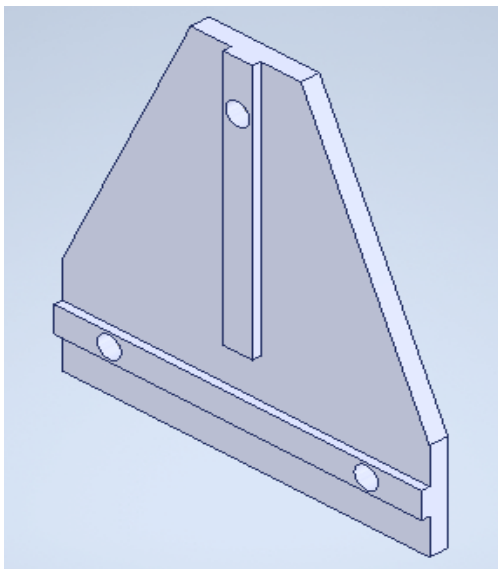
Toda esta estrutura foi totalmente desenhada e idealizada com o intuito de satisfazer os requisitos de posicionamento relativo dos vários componentes e ter rigidez adequada. Utilizou-se o programa *AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2020* para projetar esta estrutura em perfis de alumínio, Bosch Rexroth quadrangulares. Conta com

uma base de suporte para o graminho de profundidade e para o recipiente onde se realizará o teste.

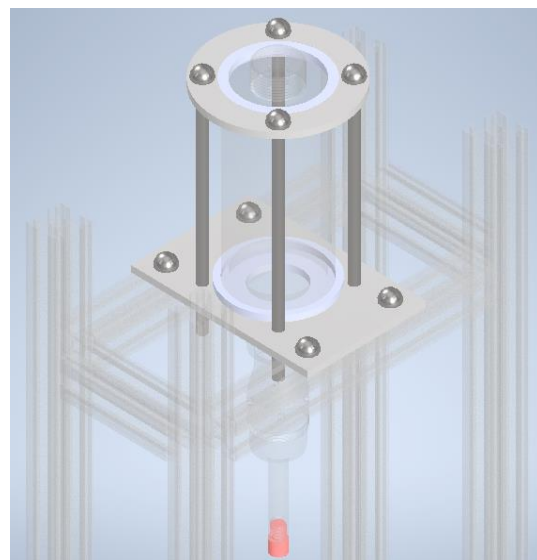
Uma vez que a energia gerada por ultrassons é significativa e pode suscitar oscilações na estrutura, foram adicionados quatro suportes de reforço lateral com o intuito de aumentar a rigidez dos nós de ligação entre a base e os perfis verticais da estrutura. Estes suportes foram maquinados por fresagem.

Foram ainda construídas duas placas de suporte para o transdutor de modo a ser possível o seu acoplamento à estrutura, bem como evitar deslocamentos do mesmo durante a sua utilização. A estabilidade da montagem é conseguida porque estas placas estão ligadas entre si através de quatro fusos roscados M8x160, que garantem um pré-aperto capaz de manter o transdutor imóvel, quando sujeito a condições de operação.

A Figura 12 representa os suportes laterais, a Figura 13 representa a estrutura de acoplamento do transdutor e a Figura 14, a estrutura fabricada. O produto final encontra-se na Figura 15.

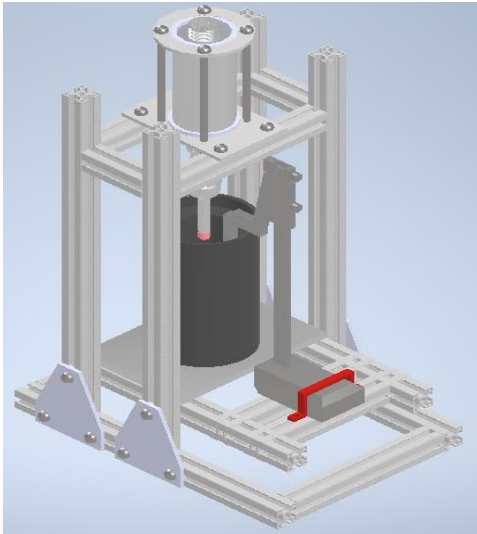


**Figura 12** - Suporte lateral



**Figura 13** - Estrutura de acoplamento do transdutor





**Figura 14** - Estrutura projetada



**Figura 15** - Estrutura construída

### 3.1.2. Transdutor

O transdutor é responsável por transformar energia elétrica, em vibração ultrassônica.

O modelo utilizado é o *Branson CR-20* e produz vibrações com uma frequência de 20 kHz. Neste, encontra-se ligado um elemento chamado *ultrasonic horn*, que funciona como amplificador mecânico e é encarregue de aumentar a oscilação do movimento gerado pelo transdutor, que por sua vez, permite ainda acoplar um corpo na sua extremidade que constitui o contra-corpo e que limita o líquido onde ocorre cavitação.

Este conjunto, encontra-se representado na Figura 16.



**Figura 16** - Conjunto transdutor e *ultrasonic horn* utilizados

### 3.1.3. Contra-corpo vibratório

O contra-corpo vibratório obedece ao dimensionamento imposto pela norma ASTM G32-03, contando apenas com uma única modificação.

Durante a projeção deste elemento, decidiu-se incluir duas perfurações laterais com a finalidade de facilitar o seu aperto ao amplificador mecânico, como é possível observar na Figura 17.

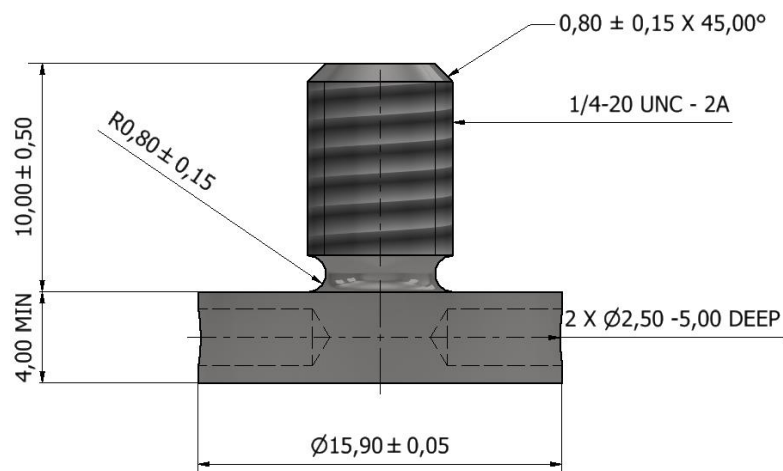


Figura 17 - Corpo vibratório projetado

O contra-corpo vibratório é responsável pelo controlo da área geradora de cavitação e pela proteção do amplificador mecânico dos efeitos nefastos da cavitação.

O material selecionado para o contra-corpo vibratório foi o aço AISI 316.

Este material é relativamente barato, abundante, prima pela resistência à corrosão e ausência de magnetismo pois é um aço austenítico (International, 2020).

Assim, este aço torna-se ideal para este tipo de utilizações uma vez que a contaminação por corrosão, não representa um fator a ter em consideração.

### 3.1.4. Porta-amostras

Este elemento é encarregue de manter a amostra em estudo segura e em posição de teste.

Foi construído em latão e conta com três parafusos de aperto, de modo a ajustar a posição da amostra, bem como providenciar fixação suficiente para satisfazer as necessidades de teste. Recorreu-se a uma fresadora, para perfurar a cavidade onde se insere a amostra e a uma furadora vertical, para obter os orifícios dos parafusos, que foram

---

posteriormente roscados. É acoplado ao graminho de profundidade via um fuso roscado. Possui ainda uma indentação de referência, para que a amostra possa ser alinhada.

O porta-amostras encontra-se representado na Figura 18.



**Figura 18** - Porta-amostras utilizado

### **3.1.5. Câmara anecoica**

Uma vez que a implosão de bolhas em meio aquático gera ruído, uma câmara anecoica foi construída com o fim de reduzir o nível de ruído.

Foi utilizado contraplacado de madeira marítima para a estrutura e espuma de isolamento acústico para a atenuação do som. Este tipo de contraplacado foi utilizado pela sua enorme resistência à presença de líquidos e humidade. A diminuição de ruído é possível graças ao aumento da área de absorção e pela utilização de materiais com isolamento sonoro, como é o caso da espuma. As formas angulares da espuma de isolamento acústico, permitem que a área exposta ao ruído seja aumentada e que as ondas sonoras não sejam refletidas para o ambiente. A câmara anecoica está representada na Figura 19.



**Figura 19** - Câmara anecoica construída

### 3.1.6. Amplificador e controlador

O amplificador é responsável por fornecer energia ao transdutor, bem como realizar a gestão da amplitude do movimento vibratório.

O modelo utilizado neste estudo, foi o *Fisher Scientific Sonic Dismembrator Model 500*, representado na Figura 20.



Figura 20 - Amplificador utilizado

### 3.1.7. Sistema de regulação térmica

Dado que existe aumento de energia térmica no sistema, é necessário dissipá-la uma vez que o aumento de temperatura, promove o aumento de erosão causado por cavitação. A norma ASTM G32-03, impõe ainda que o fluido onde ocorre cavitação seja mantido a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ .

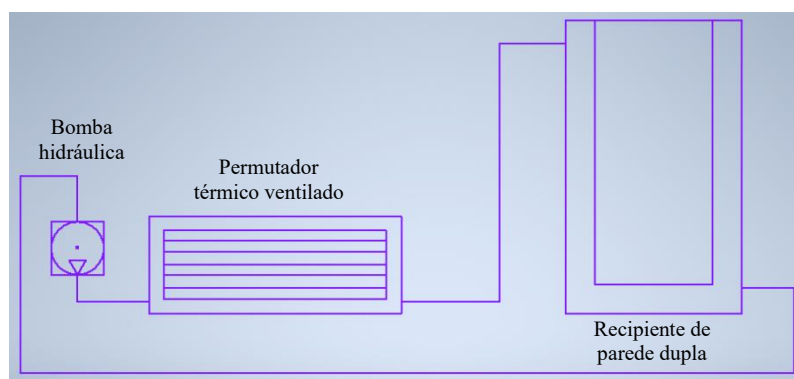
Para garantir estes requisitos, foi construído um sistema de refrigeração composto por um controlador, um permutador térmico ventilado, uma bomba hidráulica e um recipiente de parede dupla que permite a passagem de fluido de refrigeração no interior das suas paredes.

O controlador monitoriza a temperatura através dum sensor de temperatura mergulhado no interior do recipiente. Quando o sistema atinge  $27^\circ\text{C}$ , inicia-se o

---

funcionamento da bomba hidráulica e dos ventiladores de arrefecimento do permutador. As ventoinhas forçam um escoamento de ar pelas alhetas do radiador, a bomba garante o escoamento do líquido refrigerante pelas cavidades do radiador, refrigerando-o. Este líquido prossegue em direção às paredes do recipiente, onde irá realizar o arrefecimento da solução que se encontra no interior deste, estabilizando assim as temperaturas de teste. Após a permuta de calor no recipiente, o líquido regressa novamente à bomba hidráulica para que um novo ciclo de refrigeração se inicie. Assim que o sensor indique uma temperatura de teste de 23°C, cessa o funcionamento do sistema de refrigeração até que seja atuado novamente.

O esquema deste circuito encontra-se representado na Figura 21 e o circuito construído, na Figura 22.



**Figura 21** - Esquema do circuito de regulação térmica



**Figura 22** - Circuito de refrigeração construído

### 3.2. Equipamentos complementares

- Equipamento de limpeza por ultrassons:

Durante os testes preliminares verificou-se que existia acumulação de detritos de desgaste sobre a superfície das amostras, pôde ainda constatar-se que esta acumulação falseava os resultados da perda de massa. Assim, de modo a eliminar quaisquer resíduos ou detritos da superfície das amostras, estas foram submetidas a limpeza em banho de ultrassons com solvente adequado (álcool ou acetona).

O equipamento utilizado foi o *Guyson Kerry KC3 Ultrasonic Bath*, representado na Figura 23.



**Figura 23** - Equipamento de limpeza por ultrassons utilizado

- Balança:

A cavitação é um processo destrutivo que ocorre com remoção de material. A forma mais simples de quantificar o dano, é através da avaliação da perda de massa.

A quantidade de material removido entre períodos de teste, foi aferido através de uma balança *A & D Instruments GH-202-EC*, com sensibilidade de um miligrama, que se encontra representada na Figura 24.



**Figura 24** - Balança utilizada

- Microscópio ótico com câmara:

A morfologia das zonas de desgaste das amostras, foi registada fotograficamente a cada intervalo de teste.

Foi utilizado um microscópio ótico *Nikon Stereo Photo SMZ – 10*, com uma máquina fotográfica *Cannon PowerShot A620* acoplada. Em termos de iluminação, foi utilizada uma luz circular em torno do óculo do microscópio e ainda uma fonte de luz *VOLPI Intralux 5000-1 Cold Light Source*, Figura 25.



**Figura 25** - Conjunto de fotografia utilizado



- Perfilómetro:

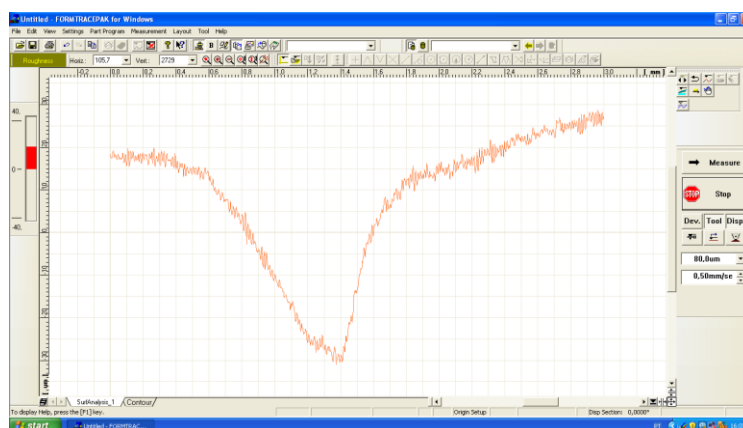
De modo a avaliar o perfil da superfície das amostras sujeitas a cavitação, recorreu-se a um perfilómetro.

O perfilómetro utilizado foi um *Mitutoyo SJ-500*. Este equipamento é capaz de varrer a superfície de uma amostra segundo um eixo, fornecendo um detalhado gráfico representando a morfologia da superfície em estudo.

O perfilómetro utilizado encontra-se representado na Figura 26 e uma medição do perfil é ilustrado na Figura 27.



**Figura 26** - Perfilómetro utilizado



**Figura 27** - Exemplo de medição obtida pelo perfilómetro



---

- Máquina de Polimento:

Sabendo que a dureza de um material é um fator preponderante na resistência deste à cavitação, é de esperar que o contra-corpo vibratório se desgaste mais rapidamente que as amostras em estudo.

Assim, foi utilizada uma máquina de polimento *Struers LaboPol-5*, Figura 28, com o intuito de polir a superfície desgastada do contra-corpo vibratório até um ponto em que se encontre isenta de marcas de cavitação antes do início da seguinte sessão de testes de uma nova amostra. Este procedimento garante a reutilização destes elementos e garante ainda que todos os testes se realizam em condições semelhantes.



**Figura 28** – Máquina de polimento utilizada

- Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV):

Com o intuito de analisar ao pormenor a superfície das amostras estudadas, podendo assim estudar os processos e os mecanismos de erosão, foi utilizado um microscópio eletrónico de varrimento *Philips XL30 TMP* representado na Figura 29.



**Figura 29** - Microscópio eletrônico de varrimento (MEV) utilizado

---

## **4. ESTABELECIMENTO DE METODOLOGIAS E CASOS PRÁTICOS**

A norma ASTM G32-03 estabelece os métodos de análise dos danos causados por cavitação, e identifica as características do equipamento mínimo necessário para colocar em prática o estudo deste fenómeno.

Apesar das informações fornecidas, e pelo facto de não existir neste laboratório experiência prévia neste tipo de estudo, na sequência do desenvolvimento do equipamento foi necessário efetuar um estudo prévio que permitisse identificar deficiências e propor medidas de correção. Neste capítulo relatam-se os resultados desta fase do estudo.

### **4.1. Proposta inicial de utilização**

Na primeira fase do estudo usou-se um porta-amostras cilíndrico em aço com diâmetro semelhante ao da amostra. A amostra era unida ao porta-amostras de forma concêntrica, utilizando cola de cianoacrilato.

No que diz respeito a limpeza, as amostras foram limpas antes e após cada período de teste utilizando papel de limpeza humedecido num solvente. Após humedecer o pano com o agente de limpeza, todas as superfícies do conjunto porta-amostras e amostra, eram limpas cuidadosamente.

Segundo a norma utilizada, da análise das amostras ao longo dos testes, é possível construir dois gráficos passíveis de serem comparados entre amostras de diferentes materiais. Estes gráficos contemplam a erosão cumulativa traduzida em perda de massa e a taxa de erosão em relação ao tempo de exposição e estão representados na Figura 10

Através da análise da norma, é possível concluir que os pontos de taxa de erosão máxima ocorrem entre as 4 e 12 horas de teste. Assim, optou-se por efetuar intervalos de medição de 4 horas até um período máximo de 16 horas de teste e, intervalos de 8 horas, até perfazer um tempo total de teste de 40 horas. Esta decisão revelou ser adequada e assertiva ao longo de todo o estudo realizado.

Além da avaliação da perda de massa, no final de cada etapa de cavitação as amostras foram ainda medidas utilizando um perfilómetro, de modo a obter um registo da evolução do estado da superfície.

## 4.2. Espécimes

As amostras utilizadas nos ensaios preliminares, foram disponibilizadas pela empresa *DURIT Metal Duro*, uma empresa de referência na área da metalurgia, em Portugal.

Estas amostras foram obtidas por sinterização. Este processo, consiste em unir partículas de pó, que depois de compactadas são elevadas a temperaturas próximas das de fusão do material base, originando a ligação das partículas de pó, formando um material coeso, denso e com boas propriedades mecânicas (GERMAN, 2016).

Ao todo, foram testadas 4 amostras de diferentes composições e de semelhante microestrutura. O elemento diferenciador entre as amostras é o ligante, sendo que o carboneto de tungsténio é o material preponderante. As amostras possuem um diâmetro de 20 mm e altura nominal de 8 mm.

As diferentes composições das amostras estudadas e as suas propriedades mecânicas encontram-se compiladas na Tabela 1 e na Tabela 2, respetivamente.

**Tabela 1** - Composições das diferentes amostras

Amostra	Composição (wt.%)				Composição do ligante (wt.%)			Composição (vol.%)	
	WC	Co	Ni	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Co	Ni	Cr	WC	ligante
<b>WC-Co</b>	92.0	8.0	-	-	100.0	-	-	86.8	13.2
<b>WC-Ni</b>	92.0	-	8.0	-	-	100.0	-	86.8	13.2
<b>WC-CoNi</b>	92.0	5.5	2.5	-	68.8	31.2	-	86.8	13.2
<b>WC-CoCr</b>	92.0	7.2	-	0.8	91.2	-	8.8	86.7	13.3

**Tabela 2** - Propriedades mecânicas das diferentes amostras

Comp.	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	HV30 (kgf/mm <sup>2</sup> )	K <sub>IC</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	E (GPa)
<b>WC-Co</b>	14.72	1659	9.9	512
<b>WC-Ni</b>	14.69	1508	9.4	522
<b>WC-CoNi</b>	14.62	1604	9.5	520
<b>WC-CoCr</b>	14.64	1825	9.3	526

---

A entidade fornecedora, foi também responsável pelo acabamento superficial das amostras. Estas, apresentavam uma superfície extremamente polida e nivelada, agilizando assim todo o processo de ensaio.

### **4.3. Fase inicial de testes e primeira iteração**

Foi iniciado o estudo com uma amostra de carboneto de tungstênio, tendo cobalto como ligante (WC-Co).

Ao fim das primeiras 4 horas de teste, foi realizada uma pausa para efetuar medições e recolher todos os dados necessários. A medição do peso do conjunto porta-amostras e amostra, demonstrou imediatamente, que seria necessário um passo extra: secagem da água infiltrada entre os componentes. Assim, a primeira otimização recaiu na adição ao processo de uma fase de secagem de 30 minutos a 60°C, utilizando uma mufla.

Apesar da remoção de infiltrações, a medição do peso ao longo do teste, continuou irregular e de difícil percepção. Procedeu-se a um aumento do tempo de secagem para 45 minutos. A cada pausa de teste, foi também possível observar uma formação crescente de óxidos que seriam aparentemente removidos aquando da limpeza manual.

Após finalizada a primeira amostra, seguiram-se a segunda (WC-Ni) e a terceira (WC-CoNi), uma vez que era visível uma progressão aparentemente natural da erosão cumulativa e da taxa de erosão.

Assim que foram finalizados os ensaios correspondentes às 3 primeiras amostras, todos os resultados obtidos envolvendo pesagens, foram compilados em 2 gráficos representados nas Figuras 30-31. A Figura 30 representa a erosão cumulativa e a Figura 31 a taxa de erosão, ambas em função do tempo.

Através da análise dos gráficos obtidos, conclui-se que o processo se encontrava aparentemente controlado pois os gráficos obtidos assemelham-se aos apresentados na norma. No entanto, foi possível observar algumas incongruências. No gráfico representado na Figura 30, é possível observar deflexões em todas as amostras, especialmente mais pronunciadas para a amostra WC-Co. O gráfico presente na Figura 31, confirma o comportamento irregular da amostra WC-Co.

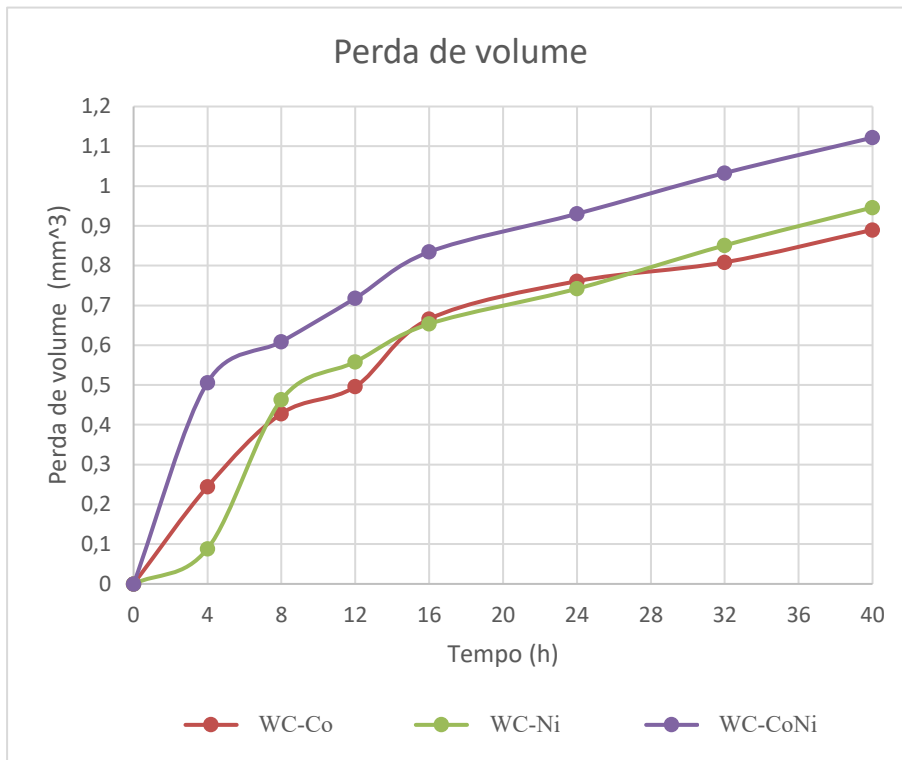


Figura 30 - Perda de volume em função do tempo

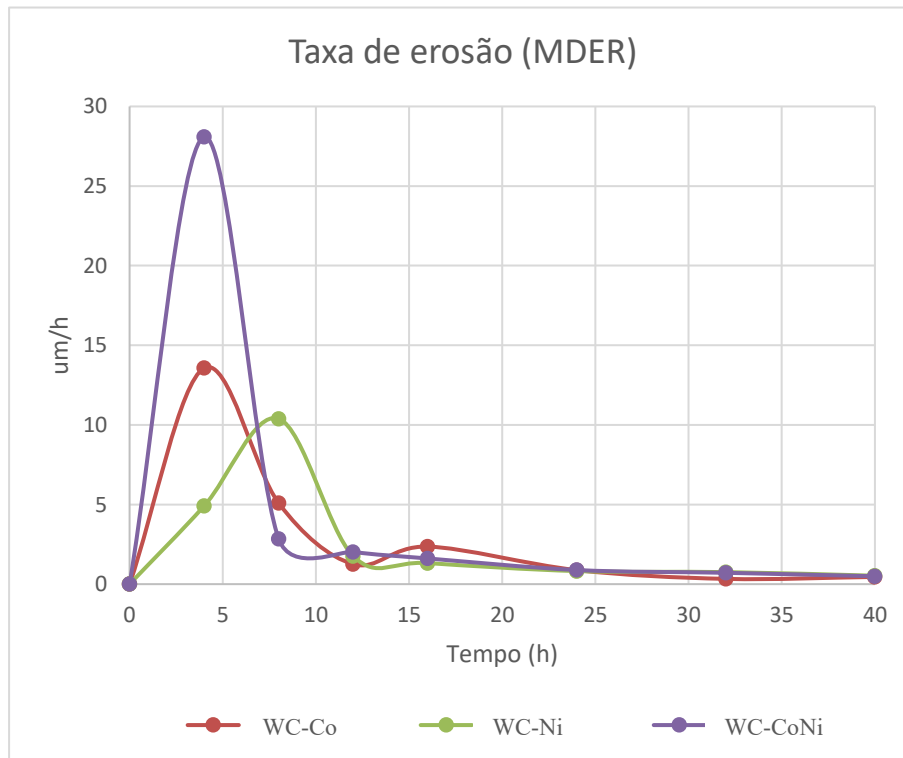


Figura 31 - Taxa de erosão em função do tempo

---

#### 4.4. Segunda iteração

Estando perante um processo de difícil controlo e verificando oxidação residual no porta-amostras, que certamente influenciou as medições de peso, optou-se por alterar o método de limpeza com o intuito de eliminar esta interferência.

Como se sabe, a oxidação em metais surge devido à interação destes com ambientes ricos em oxigénio. A superfície metálica reage com o oxigénio, formando óxidos. Estas reações químicas provocam, de uma forma geral um aumento de peso da amostra o que torna muito difícil a tarefa de avaliar a erosão provocada pela cavitação.

De modo a eliminar estas formações indesejadas, optou-se por efetuar uma limpeza por ultrassons, ao invés da limpeza manual até então utilizada. Para testar a eficácia deste novo método foi submetida a este tratamento, a amostra constituída por WC-Ni, ainda acoplada por colagem ao seu respetivo porta-amostras. Este passo revelou-se crucial no aperfeiçoamento do método em estudo, pois com ele foi possível descobrir que uma elevada quantidade de detritos, se depositava nas cavidades geradas por cavitação. Pode-se afirmar que o método de limpeza manual, não remove as impurezas depositadas nas microcavidades.

Analisando os perfis bidimensionais da amostra WC-Ni antes e após limpeza através de ultrassons, é perfeitamente notória a quantidade de detritos removidos pelo novo método de limpeza. O gráfico da Figura 32, representa a sobreposição dos perfis de superfície da amostra WC-Ni recorrendo a limpeza manual e a limpeza por ultrassons. De notar que ambos os perfis representados são provenientes da mesma amostra, com o mesmo período de teste, e que foram medidos com a mesma orientação da amostra.

Após a limpeza com ultrassons, pesou-se o porta-amostras utilizado e verificou-se uma perda de peso igual a 6 miligramas. Esta diferença de peso num material não sujeito a cavitação direta, apenas advém da criação e remoção de óxidos e outros detritos aderentes à sua superfície. Esta adição e remoção de peso não é passível de ser controlada, o que invalida os resultados obtidos nos testes das 3 primeiras amostras.

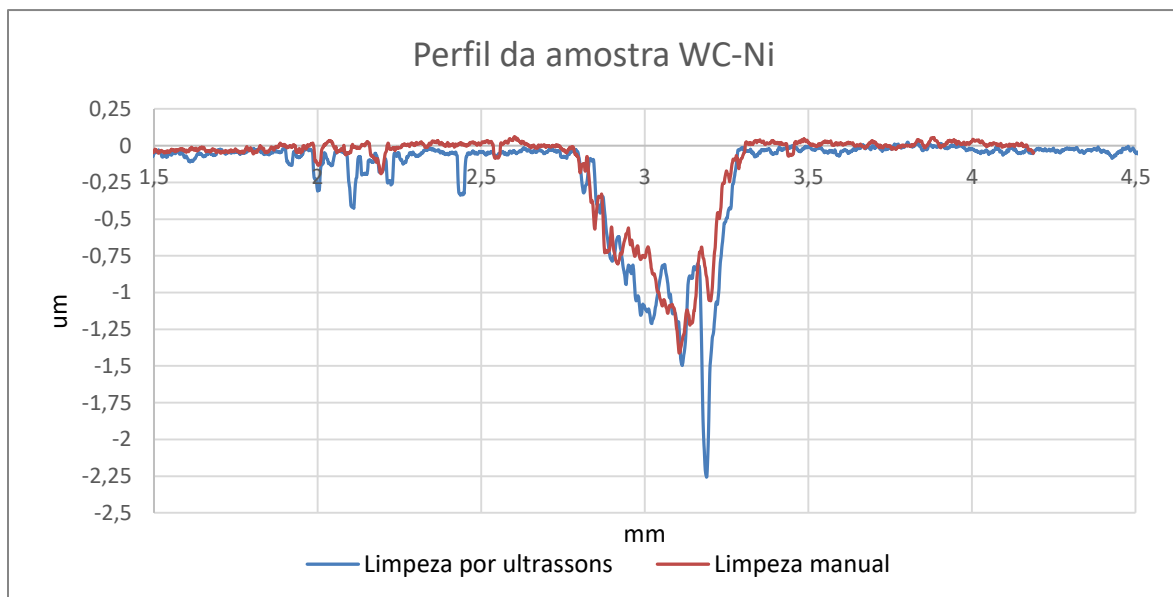


Figura 32 - Gráfico do perfil superficial da amostra WC-Ni de acordo com as diferentes limpezas

#### 4.5. Solução proposta

Com o intuito de controlar a formação de óxidos, um novo porta-amostras foi idealizado.

O material escolhido para construir esta peça, foi o latão. Este material prima pela sua abundância, resistência à corrosão e baixo custo. A nova versão deste elemento, conta ainda com melhorias face à versão prévia no que toca ao suporte da amostra. No modelo anterior, a amostra era colada ao porta-amostras. Uma vez que estes elementos estariam unidos, o processo de limpeza por ultrassons atuaria em ambos e, inevitavelmente, existiria remoção da cola. Este impasse foi corrigido recorrendo a um sistema de sujeição da amostra via 3 parafusos. Assim, a amostra é desmontada do seu suporte ao fim de cada teste e é pesada de forma independente.

Esta solução mostrou ser eficaz no controlo do processo. Esta afirmação é corroborada através dos resultados obtidos no teste subsequente.



## 4.6. Resultados obtidos

Após a correção de todas as lacunas encontradas, foi possível confirmar a veracidade das mesmas realizando um teste envolvendo uma amostra de carboneto de tungstênio, contendo cobalto e crômio como ligante.

Analisando os gráficos presentes nas Figuras 33-34, é possível observar um comportamento natural e semelhante ao esperado segundo a norma, sem as irregularidades locais que caracterizavam os ensaios anteriores. Podemos concluir que a amostra WC-CoCr, possui uma perda de volume aproximadamente linear a partir das 12 horas e que atinge uma taxa de erosão máxima aproximada de 3,8  $\mu\text{m}/\text{h}$  às 8 horas de teste. Verifica-se ainda que após 40 horas de teste, esta amostra ainda não apresenta uma fase terminal definida, encontrando-se, portanto na fase de desaceleração.

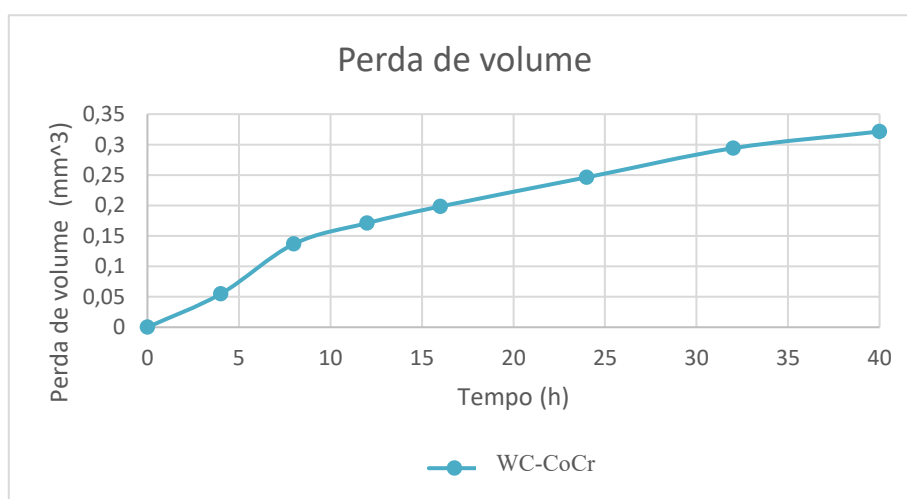


Figura 33 - Perda de volume da amostra WC-CoCr

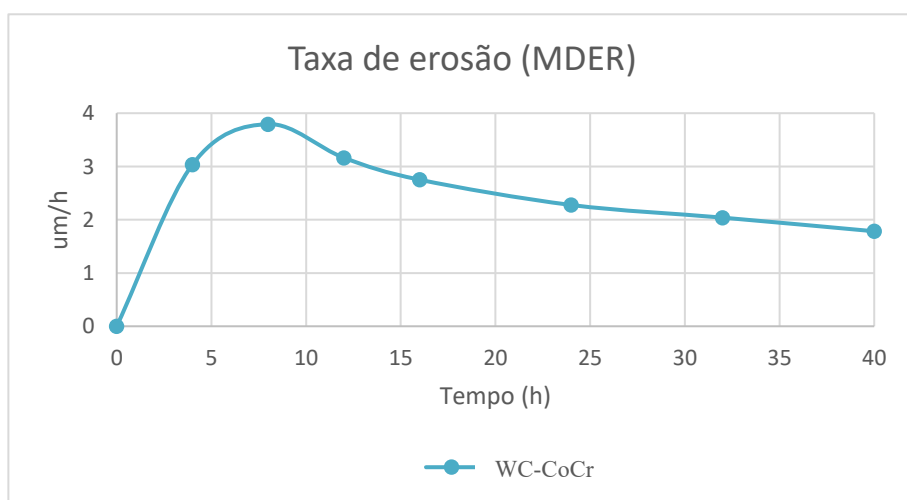
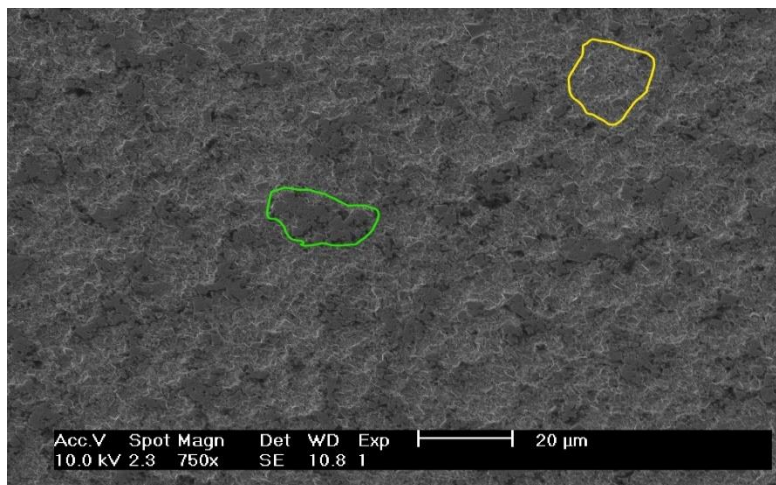


Figura 34 - Taxa de erosão da amostra WC-CoCr

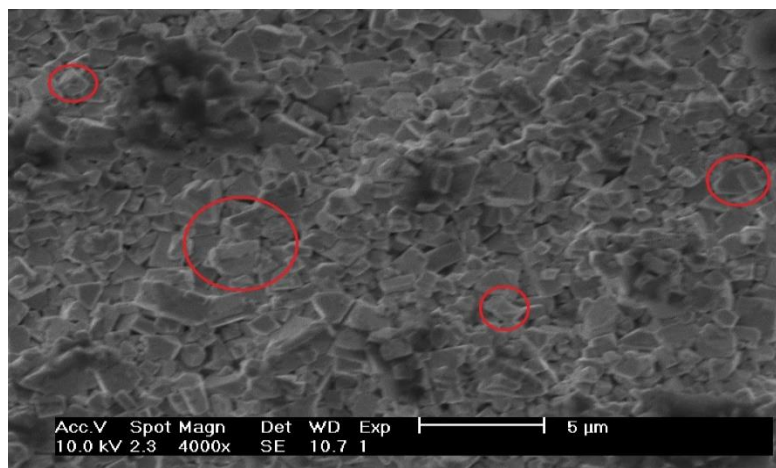
Uma vez que em todas as amostras houve dano por cavitação, escolheu-se a amostra WC-Co para efetuar uma análise mais cuidada ao desgaste causado por cavitação recorrendo ao Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV).

Esta amostra, composta por cobalto como ligante, revelou que a principal forma de desgaste ocorre por remoção do ligante. A remoção deste elemento, expõe os grãos de carboneto de tungsténio que posteriormente ficarão sem suporte, acabando por se soltar da matriz. Na Figura 35 é possível observar a verde uma zona onde o ligante existe em quantidade apreciável e a amarelo uma área com intensa remoção deste. A perda de ligante encontra-se localizada no centro da amostra, apresentando o comportamento esperado, de acordo com estudos prévios.



**Figura 35** - Zonas afetadas por cavitação na amostra WC-Co

Estes grãos de carboneto de tungsténio podem ainda sofrer fraturas, como circundado a vermelho na Figura 36.



**Figura 36** - Grãos com presença de fraturas numa área com elevada remoção de ligante

---

## 5. PROTOCOLO DE ENSAIO

Esta dissertação aborda o estudo da cavitação em materiais segundo a norma ASTM G32-03. Esta norma engloba uma série de procedimentos, materiais, especificações e análises standardizados com o intuito de possibilitar a comparação de resultados entre diferentes entidades.

Após a análise desta norma, criou-se uma lista de procedimentos que foi sendo refinada após ultrapassar cada lacuna encontrada. Assim, o protocolo proposto adequa-se às condições existentes no laboratório respeitando as indicações da norma utilizada.

Nos pontos **5.1 a 5.5** encontram-se, por ordem cronológica, os procedimentos determinantes para um estudo controlado dos efeitos da cavitação. Os tempos para cada etapa de cavitação são adequados para amostras de carboneto de tungstênio e deverão ser reajustados quando se testarem materiais com resistência mecânica mais reduzida.

### 5.1. Polimento

O primeiro passo para realização do estudo de uma amostra, inicia-se com um polimento adequado de ambas as superfícies, da amostra e do contra-corpo.

O polimento da amostra, deve ser especialmente rigoroso, até um polimento tipo espelho, para que seja possível avaliar o dano de cavitação por perfilometria. Para obter um polimento tipo espelho, deve-se realizar o polimento com suspensão de diamante, com partículas tipicamente de 3  $\mu\text{m}$ .

Para o contra-corpo é utilizada a máquina de polimento iniciando o processo com uma lixa de grão 200, progredindo até uma lixa de grão 2000. Visa-se com este procedimento, eliminar qualquer deformação superficial na área que irá gerar cavitação, criando assim condições idênticas entre as diferentes amostras. Através deste processo, é possível reutilizar estes corpos para novos testes uma vez que as condições iniciais são restabelecidas.

O polimento do contra-corpo apenas se realiza no início do estudo de uma amostra, não ocorrendo após as diferentes etapas de teste da mesma.

## 5.2. Preparação da montagem e início do teste

Este passo consiste em preparar o equipamento para o início do teste.

Inicia-se o processo enroscando o contra-corpo vibratório no amplificador mecânico. Prossegue-se para a preparação da amostra, colocando-a dentro do porta-amostras e fixando-a por aperto dos parafusos. Este porta-amostras é posteriormente apertado ao graminho de ajuste de altura e aproxima-se a amostra do contra-corpo vibratório, até que estes estejam concêntricos e se encontrem a 0,5 mm de distância entre si. A distância entre a amostra e o contra-corpo é medida usando um apalpa-folgas com lâmina de 0,5 mm.

De seguida, colocam-se 2 L de água destilada a 25°C no recipiente refrigerado e posiciona-se este no local de teste, de forma concêntrica com a amostra. Assim que se encontra na posição ideal, verifica-se se o contra-corpo vibratório se situa a  $12 \pm 4$  mm abaixo da superfície da água, realizando os ajustes necessários. De notar que o líquido utilizado no recipiente é exclusivo para cada amostra e deve ser renovado aquando da troca de amostra a estudar.

Neste momento, é possível ligar o sistema de refrigeração, o amplificador e iniciar o teste. Para a montagem utilizada, os testes foram realizados fixando um valor de 75% de potência no amplificador, que se traduz em 50  $\mu$ m de amplitude de vibração.

## 5.3. Intervalos de medição

Os intervalos de medição ocorreram de 4 em 4 horas durante as primeiras 16 horas e de 8 em 8 horas até às 40 horas, momento em que o teste finda. Estes momentos são fulcrais e utilizam-se para efetuar todas as medições necessárias para avaliar a progressão das amostras.

Após cada etapa de ensaio a amostra é desmontada e é submetida a um banho de ultrassons, por um período de 30 minutos. Após esta limpeza, a amostra encontra-se preparada para a obtenção de análises superficiais fidedignas. Durante o processo de limpeza a temperatura da amostra aumenta ligeiramente, o que pode levar a distorções.

Assim, a amostra é primeiramente fotografada no microscópio com câmara, para que todas as áreas relevantes da superfície da amostra sejam fotografadas e registadas. Este

---

processo leva tipicamente 15 minutos a ser concluído, permitindo estabilizar a temperatura da amostra.

De seguida recorre-se ao perfilómetro, onde são retirados diversos perfis da superfície da amostra. De modo a avaliar a evolução dos danos devem usar-se marcas na periferia da amostra para que as medidas sejam efetuadas segundo as mesmas direções radiais. Este processo demora cerca de 1 hora a concluir. Posteriormente recorre-se à pesagem para efetuar a medição de massa.

Por fim, a amostra é novamente colocada no porta-amostras para que o teste prossiga até ao próximo intervalo de medição.

## 5.4. Tratamento de dados

O objetivo desta fase passa por analisar os ensaios e construir todos os gráficos necessários, para sustentar os resultados obtidos.

Uma vez recolhidas todas as informações acerca do teste, é necessário tratá-las. Inicia-se esta fase, organizando as medições de peso, por ordem cronológica. Dado que é necessário organizar as informações de modo a que possam ser comparadas com outros trabalhos, é necessário representar a massa perdida ao longo dos testes em forma de perda de volume. Para tal, é necessário encontrar o volume (V) da amostra em cada medição efetuada recorrendo à equação 1:

$$V = \frac{m}{\rho} \cdot 10^9 \quad [\mu m^3] \quad (1)$$

Onde:

- m = massa em g;
- $\rho$  = densidade da amostra em g/mm<sup>3</sup>;

Após 2 medições consecutivas obteve-se a perda de volume para o período de tempo em questão. Foi, então, construído um gráfico mostrando a evolução da perda de volume em função do tempo. No gráfico da Figura 33 está uma representação do resultado obtido para a amostra WC-CoCr.

É ainda possível traçar um gráfico que representa a taxa de erosão, ou *medium depth erosion rate* (MDER), do inglês. Para tal, foi necessário encontrar esta taxa para cada medição realizada recorrendo à equação 2:

$$MDER = 10 \cdot \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad [\mu m/h] \quad (2)$$

Onde:

- $\Delta V$  = variação de volume total;
- $A$  = área superficial sujeita a cavitação;
- $\Delta t$  = tempo total de teste;

Assim, basta apenas construir um gráfico que contenha a taxa de erosão média para cada intervalo de medição efetuado. No gráfico da Figura 34 está uma representação do resultado obtido para a amostra WC-CoCr. A utilização deste parâmetro deve ser feita com cautela pois no seu cálculo presume-se que a erosão ocorre em toda a superfície da amostra, o que não se verificou para os materiais testados.

## 5.5. Análise superficial através de MEV

Após o término da fase de testes de uma amostra, foi necessário observar a sua superfície de forma detalhada recorrendo a microscopia eletrónica de varrimento.

Levaram-se então as amostras estudadas ao microscópio, onde foram fotografados os danos superficiais ao pormenor, utilizando ampliações adequadas aos detalhes que se pretendem realçar.

---

## 6. CONCLUSÃO

O objetivo inicial da presente dissertação consistia em aprofundar o conhecimento sobre os efeitos da cavitação em materiais sinterizados, mais concretamente, em amostras de carboneto de tungstênio produzidas com diferentes ligantes. Pretendia-se assim, compreender de que forma é que diferentes ligantes influenciam a resistência à cavitação. Estes objetivos iniciais, não puderam ser concretizados tendo em conta o contexto mundial de Pandemia de COVID-19 que condicionou a realização dos trabalhos experimentais. Assim que as condições de trabalho foram restabelecidas, problemas com o transdutor levaram a que a atividade laboratorial que estava programada fosse consideravelmente reduzida. Devido a estas contingências, os resultados obtidos não são extensos, pelo que esta dissertação se circunscreveu muito mais em torno do projeto e desenvolvimento do equipamento bem como do estabelecimento do protocolo de ensaio.

Atendendo às adversidades sentidas durante a elaboração desta dissertação, o trabalho realizado deve ser avaliado quanto aos seus resultados qualitativos e pelo aspeto de otimização de metodologias, ao invés da sua avaliação em função dos resultados numéricos.

Dos resultados obtidos, é possível obter as seguintes ilações:

- O equipamento desenvolvido cumpre com os requisitos do ponto de vista da aplicação da norma ASTM G32-03;
- Uma vez que a formação de óxidos é algo a ter em conta, projetou-se e desenvolveu-se um potra-amostras inoxidável, que possui um sistema de aperto por forma a evitar contaminação das amostras;
- A utilização de pontos de referência é fundamental para garantir que a posição da amostra é semelhante ao longo de todo o período de teste;
- A principal forma de desgaste deste tipo de materiais sinterizados sujeitos a cavitação, passa pela remoção preferencial de ligante, o que leva à falta de suporte dos grãos de carboneto de tungstênio, que acabam por se soltar;
- A zona sujeita a erosão é predominante localizada na zona central da amostra

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apfel, R. E. (1981) 'Acoustic cavitation', *Methods in Experimental Physics*. doi: 10.1016/S0076-695X(08)60338-5.
- ASTM G32 (2016) 'Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus', *Annual Book of ASTM Standards*. doi: 10.1520/G0032-16.
- AZoM (2020) *What is Tungsten Carbide or Hard Metal?* Available at: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4827> (Accessed: 14 June 2020).
- Bernoulli, D. (1738) 'Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii', *Opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum*. doi: 10.3931/e-rara-3911.
- Brennen, C. E. (2013) *Cavitation and bubble dynamics, Cavitation and Bubble Dynamics*. doi: 10.1017/CBO9781107338760.
- Construction Equipment (2018). *Cavitation Causes And Cures*. Available at: <<https://www.constructionequipment.com/cavitation-causes-and-cures>> (Accessed 5 October 2020).
- Ding, X. et al. (2020) 'Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF', *Surface and Coatings Technology*. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125757.
- Dular, M. et al. (2019) 'High speed observation of damage created by a collapse of a single cavitation bubble', *Wear*. doi: 10.1016/j.wear.2018.11.004.
- Euler, L. (1755) 'Principes generaux du mouvement des fluides', *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin*.
- Franc, J. and Michel, J. (2010), *Fundamentals Of Cavitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- German, R. (2016), *Sintering Science: An Historical Perspective*. Gu, J. et al. (2020) 'Laser cavitation peening of gray cast iron: Effect of coverage layer on the surface integrity', *Applied Surface Science*. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.146295.
- Hammit, F. G. (1979) 'CAVITATION EROSION: THE STATE OF THE ART AND PREDICTING CAPABILITY.', *Appl Mech Rev*.
- Haosheng, C. and Shihan, L. (2009) 'Inelastic damages by stress wave on steel surface at the incubation stage of vibration cavitation erosion', *Wear*. doi: 10.1016/j.wear.2008.05.011.
- Hutchings, I. and Shipway, P. (2017) *Tribology: Friction and wear of engineering materials: Second Edition, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials: Second Edition*.
- International, A. W. (2020) *Stainless Steel 316 - Alloy Wire International*. Available at: <https://www.alloywire.pt/products/stainless-steel-316/> (Accessed: 23 June 2020).
- Kanno, A., Takagi, K. and Arai, M. (2020) 'Influence of chemical composition, grain size, and spray condition on cavitation erosion resistance of high-velocity oxygen fuel thermal-sprayed WC cermet coatings', *Surface and Coatings Technology*. doi:



---

10.1016/j.surfcoat.2020.125881.

Karimi, A. (1989) 'Cavitation erosion of austenitic stainless steel and effect of boron and nitrogen ion implantation', *Acta Metallurgica*. doi: 10.1016/0001-6160(89)90104-1.

Lamana, M. S., Pukasiewicz, A. G. M. and Sampath, S. (2018) 'Influence of cobalt content and HVOF deposition process on the cavitation erosion resistance of WC-Co coatings', *Wear*. doi: 10.1016/j.wear.2017.12.009.

Lauterborn, W. (1980) 'Cavitation and inhomogeneities in underwater acoustics, Proceedings of the First International Conference held at Gottingen, Fed. Rep. Germany on July 9-11, 1979.', BERLIN, FED. REP. GERMANY, SPRINGER-VERLAG, 1980, 332P. (SPRINGER SERIES IN ELECTROPHYSICS).

Liu, H. et al. (2017) 'Flow structures and cavitation in submerged waterjet at high jet pressure', *Experimental Thermal and Fluid Science*. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.07.003.

Monsen, J., 2017. Liquid Flow in Control Valves – Choked flow, Cavitation and Flashing. Available at: <https://www.valin.com/resources/blog/liquid-flow-control-valves-choked-flow-cavitation-and-flashing> (Accessed: 5 October 2020)

Padilha, A., 2000. *Materiais De Engenharia: Microestrutura E Propriedades*. São Paulo (SP): HEMUS.

Procopiak, L. A J, Souza, N.C., D'Oliveira, A.S.C.M, Xiaojun,Z (2000), Efeito dos processos de modificação superficial na resistência a erosão por cavitação. Programa P & D COPEL / ANEEL.

Pugsley, V. A. and Allen, C. (1999) 'Microstructure/property relationships in the cavitation erosion of tungsten carbide-cobalt', in *Wear*. doi: 10.1016/S0043-1648(99)00201-X.

Rao, A. S. and Kung, D. (1987) METALLIC OVERLAY MATERIALS FOR THE OPTIMUM CAVITATION PERFORMANCE OF HYDRAULIC TURBINES., Research and Development Report - Canadian Electrical Association.

Rodelta (2017) Pump cavitation what happens and what causes it?. Available at: <https://www.rodelta.com/pump-cavitation/> (Accessed: 5 October 2020).

Shah Y. T., Pandit A. B., Moholkar V. S., (1999) - *Cavitation Reaction Engineering*-Springer US.

Staff, E. B. (2015) Cavitation erosion in diesel cylinders, *enginebuildermag.com*. Available at: <https://www.enginebuildermag.com/2015/03/cavitation-erosion-in-diesel-cylinders/> (Accessed: 5 October 2020).

Sun, R. C., Xiao, L. P. and Song, G. Y. (2017) 'Effect of hydrothermal processing on hemicellulose structure', in *Hydrothermal Processing in Biorefineries: Production of Bioethanol and High Added-Value Compounds of Second and Third Generation Biomass*. doi: 10.1007/978-3-319-56457-9\_3.

Tam, K. F., Cheng, F. T. and Man, H. C. (2002) 'Cavitation erosion behavior of laser-clad Ni-Cr-Fe-WC on brass', *Materials Research Bulletin*. doi: 10.1016/S0025-5408(02)00766-3.

Tullis, J. P. (1989) 'Hydraulics of Pipelines - Pumps, Valves, Cavitation, Transients', p. 266.

Upadhyaya, G. S. (1998) Cemented tungsten carbides: production, properties and testing, Cemented Tungsten Carbides.

Xiaojun, Z. et al. (2003) 'Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel', Materials Science and Engineering A. doi: 10.1016/S0921-5093(03)00297-1.

Zhang, X. bin et al. (2009) 'Cavitation erosion behavior of WC coatings on CrNiMo stainless steel by laser alloying', International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. doi: 10.1016/S1674-4799(09)60034-0.