

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO PAULO GABRE FERREIRA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM PULSO ECO COM
CABEÇOTE MONOCRISTAL NA ANÁLISE DE POROSIDADE DE
REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA DEPOSITADOS POR
PLASMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Ponta grossa
2014**

JOÃO PAULO GABRE FERREIRA

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM PULSO ECO COM
CABEÇOTE MONOCRISTAL NA ANÁLISE DE POROSIDADE DE
REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA DEPOSITADOS POR
PLASMA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do Departamento
Acadêmico Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano
Augusto Lourençato

**Ponta Grossa
2014**



TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM PULSO ECO COM CABEÇOTE MONOCRISTAL NA ANÁLISE DE POROSIDADE DE REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA DEPOSITADOS POR PLASMA

por

JOÃO PAULO GABRE FERREIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 15 de dezembro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Responsável pelos Trabalhos
de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Coordenador do Curso de
Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos Institutos Lactec pelo apoio na pesquisa.

Gostaria de deixar registrado a minha eterna gratidão aos meus amigos e familiares, em especial à minha mãe, pelo apoio prestado nas horas mais difíceis, acredito que sem eles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta pesquisa.

RESUMO

FERREIRA, João Paulo Gabre. **Aplicação da Técnica de Ultrassom Pulso Eco com Cabeçote Monocristal na Análise de Porosidade de Revestimentos de Barreira Térmica Depositados por Plasma**. 2014. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

Este trabalho tem por objetivo avaliar se é possível aplicar a técnica de ultrassom pulso eco utilizando um transdutor monocristal na análise de porosidade em revestimentos de barreira térmica depositados por plasma. Para isso, medições de velocidade de propagação do som, utilizando o ensaio de ultrassom, e medições de porosidade, utilizando microscópio ótico foram realizadas em amostras de revestimentos depositadas com diferentes valores de porosidade. Como resultado obteve-se um gráfico onde é possível observar relação entre a variação da velocidade de propagação do som e o aumento do nível de porosidade nos revestimentos, validando assim a técnica pulso eco utilizando um transdutor monocristal para a análise de porosidade.

Palavras-chave: Revestimento de Barreira Térmica. Ensaio não destrutivo. Ultrassom. Porosidade.

ABSTRACT

Ferreira, João Paulo Gabre. **Pulse-Echo Single Crystal Transducer Ultrasound Technique Applied in Porosity Measurement of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings**. 2014. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2014

This study has the intention to evaluate if it is possible to apply the pulse-echo ultrasound technique with a single crystal transducer in the analysis of porosity in plasma sprayed thermal barrier coatings. In order to do this, measurements of sound's velocity, using the ultrasound test, and measurements of porosity, using optical microscopy was performed on samples deposited with different porosity values. As a result it was obtained a graph where is possible evaluate the relationship between the variation of the sound's velocity and the increased level of porosity, thus validating the pulse-echo technique using a single crystal transducer for porosity analysis.

Keywords: Thermal Barrier Coating. Nondestructive Evaluation. Ultrasound. Porosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Típica De Um Revestimento De Barreira Térmica.....	11
Figura 2 - Gráfico De Condutividades Térmicas Em Função Da Temperatura	12
Figura 3 - Sistema De Uma Tocha De Plasma.....	13
Figura 4 - Sistema De Uma Tocha HVOF	14
Figura 5 - Modo De Propagação De Uma Onda Longitudinal	16
Figura 6 - Campo Sônico Nas Proximidades Do Cristal Piezelétrico	21
Figura 7 - Representação De Um Feixe Sônico.....	22
Figura 8 - Cabeçote De Incidência Normal	23
Figura 9 - Diagrama Esquemático Dos Ecos Ultrassônicos Em Uma Superfície Revestida	28
Figura 10 - Variação Da Velocidade Em Relação À Variação Da Porcentagem De Poros.....	29
Figura 11 – Fluxograma Do Procedimento Experimental Adotado.....	30
Figura 12 – Amostras Utilizadas No Ensaio De Ultrassom Após A Deposição Dos Revestimentos.....	32
Figura 13 - “A” Equipamento De Correntes Parasitas Olympus Nortec 500d, “B” Sonda Nortec SI/300hz-10khz.....	33
Figura 14 - “A” Pulse/Reciver Olympus 5077pr, “B” Osciloscópio Agilent 2022a, “C” Cabeçote Monocristal Olympus V327-10mhz.	34
Figura 15 - Amostra De Inconel 718 Sem A Presença De Revestimento	38
Figura 16 - Imagem Da Tela Do Osciloscópio Durante O Ensaio De Ultrassom Na Amostra De Inconel 718 Sem A Presença De Revestimento.....	38
Figura 17 - Sinais Obtidos Na Análise Via Ultrassom	39
Figura 18 - Região Da Zona Morta Observada Durante Os Ensaios Com O Ultrassom.	41
Figura 19 - Imagens Obtidas Durante A Análise De Porosidade No Microscópio Ótico.....	43
Figura 20 - Gráfico Que Relaciona A Velocidade De Propagação Do Som Em Relação A Porosidade Dos Revestimentos Cerâmicos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros De Deposição Variáveis Para O Processo Aps	31
Tabela 2 – Parâmetros De Operação Do Pulse Reciver.	34
Tabela 3 – Resultado Da Leitura Das Espessuras.....	37
Tabela 4 – Resultado De Tempos De Voo.....	40
Tabela 5 – Resultados Das Medidas De Velocidade De Propagação Do Som.....	40
Tabela 6 – Valores De Porosidade Medidos Por Microscopia Ótica	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO GERAL.....	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3	JUSTIFICATIVA.....	9
2	REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA	11
2.1	REVESTIMENTO SUPERIOR (TOP-COAT).....	11
2.2	CAMADA DE LIGAÇÃO (BOND-COAT).....	13
3	ULTRASSOM	15
3.1	PROPRIEDADES DO ENSAIO	16
3.1.1	Tipos de Ondas	16
3.1.2	Velocidade.....	17
3.1.3	Comprimento de Onda	18
3.1.4	Reflexão Sônica.....	19
3.1.5	Atenuação Sônica.....	20
3.1.6	Campo Sônico	21
3.2	CABEÇOTES	23
3.3	TÉCNICAS DE INSPEÇÃO	24
4	POROSIDADE EM REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA	25
4.1	EFEITOS DA POROSIDADE	25
4.2	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO NÍVEL DE POROSIDADE	25
4.3	ANÁLISE DE POROSIDADE VIA ULTRASSOM.....	25
5	MATERIAIS E MÉTODOS	30
5.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	30
5.2	ENSAIO POR ULTRASSOM	32
5.2.1	Metodologia de Ensaio	32
5.2.2	Metodologia de Cálculo	35
5.3	ENSAIO DE MICROSCOPIA ÓTICA.....	36
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6.1	Resultados do ensaio de ultrassom.....	37
6.2	Resultado da Microscopia ótica.....	42
6.3	Comparação entre as velocidades e porosidades.....	44
7	CONCLUSÕES	46
7.1	DISPOSIÇÕES GERAIS	46
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
7.3	RECOMENDAÇÕES	47
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

Turbinas a gás são máquinas térmicas utilizadas industrialmente tanto para a geração de energia quanto para propulsão de aeronaves. Esses equipamentos trabalham a elevadas pressões e temperaturas e tais condições requerem mecanismos que viabilizam a operação dessas máquinas.

Revestimentos de Barreira térmica são revestimentos empregados nos componentes da seção quente de turbinas a gás com a finalidade de diminuir os efeitos das altas temperaturas e como consequência aumentar a vida útil de tais componentes. Esses revestimentos apresentam uma estrutura em camadas sendo a primeira delas de um composto cerâmico e uma camada secundária de um composto metálico, a qual tem função de proporcionar uma melhor adesão entre a cerâmica e o metal de base dos componentes.

Para uma melhora no efeito de isolamento térmico poros e micro trincas são introduzidos controladamente na estrutura da parte cerâmica desses revestimentos, porém uma quantidade inadequada ou uma irregularidade na distribuição pode afetar negativamente a longevidade e a funcionalidade dos mesmos.

Tanto para o controle da quantidade e uniformidade dos poros após a deposição do revestimento quanto para o monitoramento durante os ciclos de operação da turbina, uma forma de determinar a porosidade sem danificar o revestimento se faz necessário.

Dentre os ensaios não destrutivos existentes, o ensaio de ultrassom apresenta uma forte aplicabilidade na indústria devido a sua portabilidade, versatilidade bem como uma boa velocidade de ensaio.

Existem várias técnicas e formas de se realizar o ensaio de ultrassom. Porém a mais utilizada no âmbito industrial é a técnica pulso eco com cabeçote monocristal, pois dentre as técnicas de inspeção por ultrassom esta é a mais simples.

Por fim, este trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade da aplicação desta técnica com eficiência na análise de porosidade de revestimentos de barreira térmica.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade do ensaio de ultrassom utilizando a técnica pulso eco aplicada na estimativa da quantidade de poros de revestimentos de barreira térmica depositados por plasma.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as velocidades de propagação som, para diferentes valores de porosidade, em um composto cerâmico à base de zircônia parcialmente estabilizada com ítria, depositado por plasma, utilizando a técnica pulso eco com cabeçote monocristal.
- Medir os diferentes valores de porosidade obtidos na deposição do revestimento cerâmico utilizando imagens obtidas por microscopia ótica.
- Analisar a relação entre a variação da velocidade de propagação do som em relação ao aumento da porcentagem de porosidade, e com isso validar ou não a técnica utilizada para a análise de porosidade em revestimentos de barreira térmica.

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido à grande utilização de turbinas a gás tanto na indústria aeronáutica quanto em indústrias de energia, uma forma de aumentar a eficiência bem como diminuir o número de reparos e manutenções tem um papel muito importante da redução de custos com tais equipamentos.

Revestimentos de barreira térmica tem a função de proteger alguns componentes das turbinas a gás, e um controle efetivo da porosidade é de vital importância para o funcionamento adequado das turbinas também para aumento da vida útil desses revestimentos.

Os ensaios não destrutivos são ideais para o controle de turbinas a gás uma vez tais equipamentos apresentam um custo bastante elevado, e o controle de seus parâmetros e componentes sem danificá-los é de fundamental importância.

O ensaio de ultrassom é largamente aplicado em diversos ramos da indústria seja na inspeção de defeitos, medição de espessura e até mesmo na análise de propriedades mecânicas e físicas de materiais.

Dentre as técnicas de ensaio de ultrassom, a técnica pulso-eco realizada com cabeçote monocristal é amais utilizada na indústria devido à sua simplicidade, versatilidade e os bons resultados obtidos.

O presente trabalho tem a intenção de aumentar os conhecimentos existentes na área de ensaios de ultrassom aplicado em revestimentos de barreira térmica a fim de proporcionar um maior controle das características dessas estruturas.

2 REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA

Também chamados de Thermal Barrier Coating's ou apenas TBC's, tais revestimentos foram inicialmente desenvolvidos pela indústria aeronáutica com a finalidade de estender a vida útil de componentes da secção quente de turbinas a gás, protegendo-os contra fadiga térmica, gradientes de temperatura, trincas, corrosão, oxidação e erosão (MEHERWAN, 2006).

Revestimentos de barreira térmica são constituídos por uma fina camada de cerâmica (Top-Coat) e uma fina camada metálica (Bond-Coat), e geralmente são depositados sobre superfícies metálicas de superligas de níquel ou cobalto (substrato ou metal de base). A estrutura de um revestimento de barreira térmica depositado por plasma pode ser visualizada na figura 1.

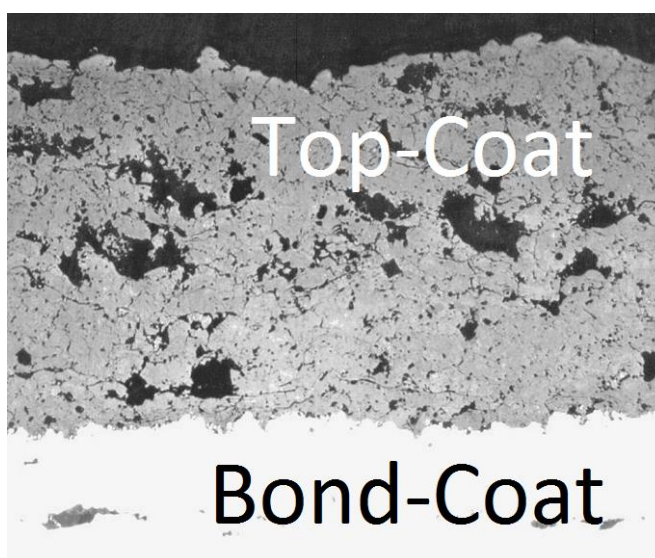


Figura 1 - Estrutura Típica de Um Revestimento de Barreira Térmica
Fonte: Adaptado de Siebert et al., 1990.

2.1 REVESTIMENTO SUPERIOR (TOP-COAT)

É de conhecimento geral que compostos cerâmicos apresentam boas propriedades de isolamento térmico. Porém como é possível ver na figura 2, dentre os materiais cerâmicos avaliados, a zircônia (ZrO_2) apresenta uma menor condutividade térmica, bem como uma menor variação desta condutividade em relação a variação da temperatura. É devido a esses fatos que cerâmicas a base de

zircônia são os materiais mais utilizadas em revestimentos de barreira térmica (REED, 2006).

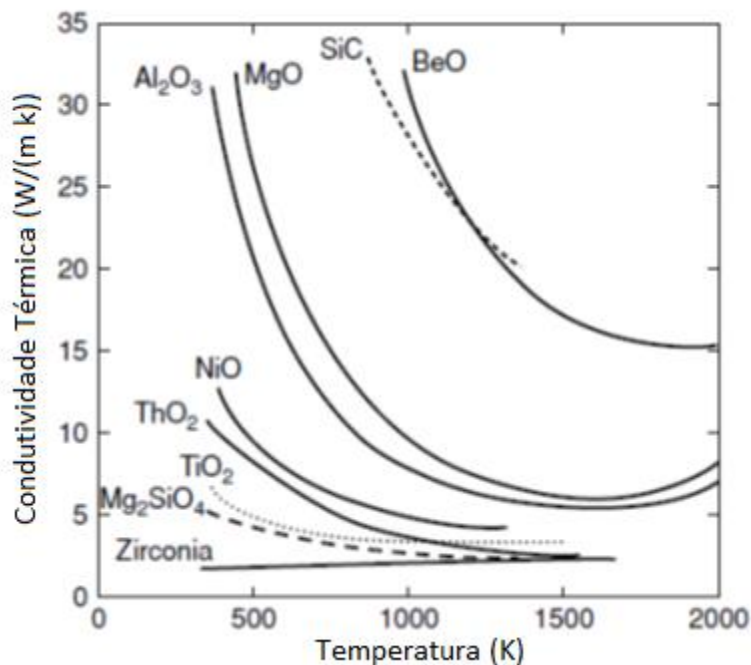


Figura 2 - Gráfico de Condutividades Térmicas em Função da Temperatura
 Fonte: Adaptado de Reed (2006).

Porém segundo Reed (2006), na década 70 a NASA descobriu que adicionando cerca de 7% de ítria (Y_2O_3) à zircônia, uma melhor resistência a ciclos térmicos era alcançada, e tal composto foi denominado como Zircônia Parcialmente estabilizada com ítria (7YSZ).

Uma camada de 300 μ m de 7YSZ pode reduzir até 150 °C a temperatura do metal de base (MEHERWAN, 2006) e atualmente, como encontrado nos trabalhos de Rogé et al. (2002), Sibert et al. (1999), e Crutzen et al. (1996), o processo mais comum para depositá-la é o Atmospheric Plasma Sprayed, também chamado apenas de plasma APS.

Segundo Pawlowski (2008), o processo de deposição por plasma consiste em injetar uma suspensão de pó em um jato de plasma, então as partículas, após serem fundidas e aceleradas pelo jato, atingem a superfície, formando assim o revestimento. Na figura 3 é possível visualizar o sistema e os principais componentes de uma tocha de plasma.

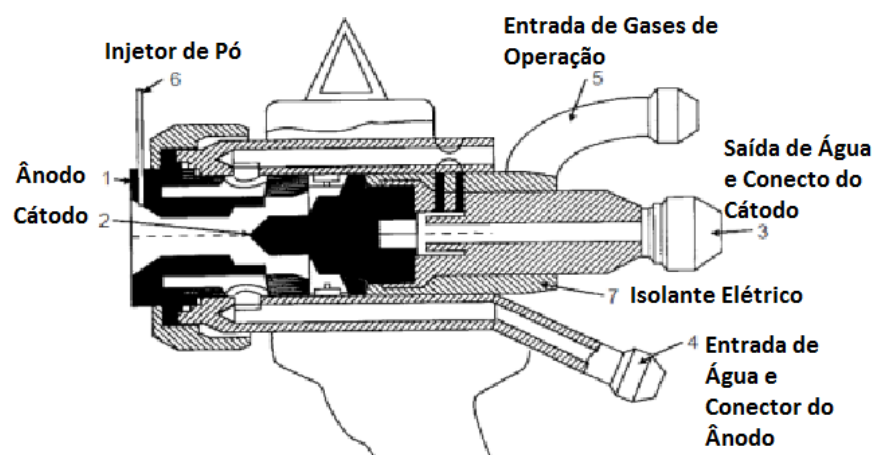


Figura 3 - Sistema de Uma Tocha de Plasma
Fonte: Adaptado de Pawlowski (2008).

2.2 CAMADA DE LIGAÇÃO (BOND-COAT)

A diferença entre os coeficientes de expansão térmica da camada cerâmica e do metal base das palhetas da turbina acarreta na formação de stress térmico no revestimento durante os ciclos de operação das turbinas (REED, 2006). Para diminuir esse efeito, uma camada intermediária à cerâmica e ao metal base é depositada e tal material deve ser selecionado para assegurar a compatibilidade entre a cerâmica e o metal base (REED, 2006). Segundo Reed (2006) o bond-coat ainda tem função de diminuir o efeito de oxidação do metal base.

O bond-Coat, como assim é chamado, é um revestimento metálico com cerca de 100 μm de espessura. Geralmente é um composto na forma MCrAlX, onde “M” corresponde ao elemento níquel (Ni) ou cobalto (Co) e “X” é um elemento adicionado em menores proporções sendo o mais comum deles o ítrio (Y) (REED, 2006).

Atualmente o meio de deposição mais comum para Bond-coats é o HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Segundo Pawlowski (2008), o processo de deposição por HVOF é caracterizado pela injeção de um fluido combustível juntamente com oxigênio em uma câmara de combustão, então ocorre a ignição e os gases são acelerados passando pelo bocal em direção ao barril onde o pó é adicionado. Na figura 4 é possível visualizar o sistema e os principais componentes de uma HVOF.

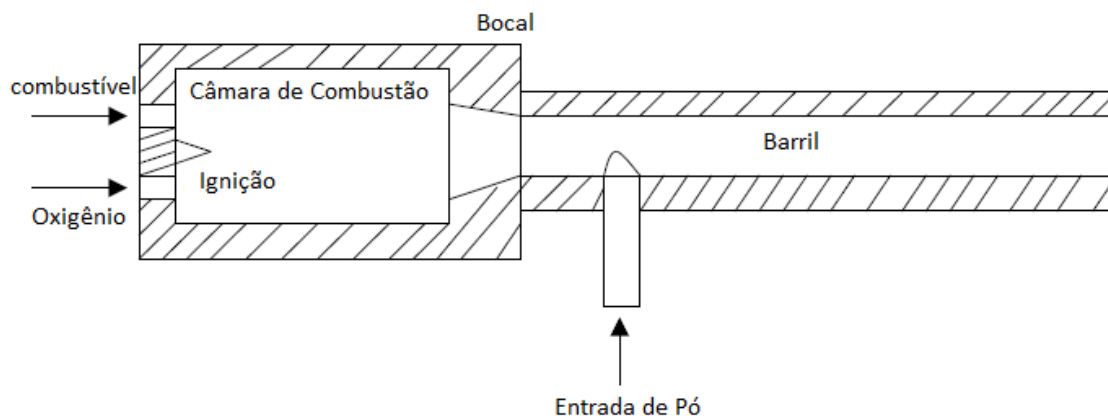


Figura 4 - Sistema de Uma Tocha HVOF
Fonte: Adaptado de Pawlowski (2008).

Segundo Pawlowski (2008), revestimentos depositados por HVOF possuem porosidades inferiores à 1% e uma espessura média que varia entre 100 e 300 μm , porém para a aplicação de bond-coats espessuras na casa dos 100 μm são mais frequentemente utilizadas, como se pode observar no trabalho de Rogé et al (2002).

3 ULTRASSOM

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que consistem na oscilação de partículas atômicas ou moleculares em torno de sua região de equilíbrio (SANTIN, 2003). Ondas ultrassônicas são assim chamadas, pois apresentam uma frequência de vibração acima de 20 KHz e portanto, são inaudíveis para os seres humanos (SANTIN, 2003).

Segundo Martin (2012), o ensaio de ultrassom é um ensaio não destrutivo que consiste em introduzir energia sonora na forma de ondas ultrassônicas para o interior de materiais. Então a onda propaga-se e ao encontrar uma descontinuidade ou interface, parte da energia é refletida, e essa parcela de energia refletida gera sinais na tela do equipamento. A partir desses sinais é possível então obter informações como localização, profundidade, espessura, tamanho, e orientação do objeto que se deseja analisar.

Santin (2003) cita algumas vantagens e desvantagens do ensaio de ultrassom. Dentre as vantagens as principais são:

- Alta sensibilidade na detecção de descontinuidades internas e superficiais;
- Alta confiabilidade na determinação da posição, tamanho e formato de descontinuidades;
- Resultados instantâneos durante o ensaio;
- Pode ser utilizada em superfícies pintadas ou com revestimentos metálicos e não metálicos; e
- Equipamentos de pequeno porte que oferecem excelente portabilidade.

Já dentre as desvantagens as principais são:

- Requer treinamento e experiência dos profissionais;
- Necessidade do uso de acoplante; e

3.1 PROPRIEDADES DO ENSAIO

3.1.1 Tipos de Ondas

As ondas sonoras podem ser classificadas de acordo com o modo como uma partícula vibra em relação à direção que a onda sonora se propaga (MARTIN, 2012). Segundo Martin, é possível diferenciar cinco maneiras como uma onda pode se propagar: ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais, ondas Lamb e ondas Creeping.

Neste trabalho foram utilizadas emissões de ondas longitudinais, as quais também podem ser chamadas de ondas compressivas e podem se propagar tanto em sólidos, quanto em líquidos e em gases (SANTIN, 2003). Este tipo de onda ultrassônica é o mais amplamente usado na inspeção de materiais (SANTIN, 2003).

Esse modo de propagação consiste na produção alternada de zonas de compressão e rarefação nas quais as partículas transmitem vibração movendo-se no mesmo sentido de propagação da onda (MARTIN, 2012). A Figura 6 ilustra o modo de propagação das ondas longitudinais.

As distâncias entre duas zonas de compressão ou de rarefação determinam o comprimento da onda (ANDREUCCI, 2011).

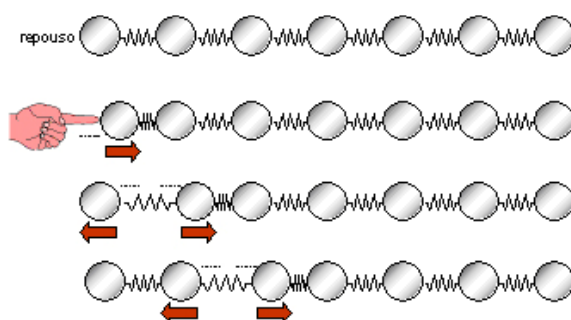


Figura 5 - Modo de Propagação de Uma Onda Longitudinal
Fonte: Andreucci (2011).

3.1.2 Velocidade

O som viaja com diferentes velocidades em diferentes materiais (HELLIER, 2003). Segundo Hellier, (2003) é possível dizer que o som se propaga mais rapidamente em metais do que em gases, porém também é verdadeiro dizer que o som se propaga com diferentes velocidades para cada tipo de metal.

Essa variação de velocidade, ao contrário do que se pode pensar, é independente das características da onda, como frequência ou comprimento de onda, mas sim das propriedades do meio em que ela se propaga (SANTIN, 2003). Por exemplo, se duas ondas de diferentes comprimentos e frequências forem geradas num mesmo meio, elas irão se propagar com a mesma velocidade. Por outro lado, se duas ondas com as mesmas características forem geradas em meios diferentes, suas velocidades serão também diferentes.

As duas principais características que afetam a velocidade de propagação do som são a densidade e a elasticidade do material (HELLIER, 2003). A velocidade é dependente de quão rapidamente uma partícula pode passar seu estado de vibração para as partículas próximas (HELLIER, 2003) logo quanto maior for a rigidez entre essas partículas mais fácil será essa transmissão de movimento. Além disso, quanto mais leves forem essas partículas ou menos partículas estiverem ocupando um determinado volume, em outras palavras quanto menos denso for o material, mais rápido ocorrerá a transmissão dessa vibração, logo materiais com maior módulo de elasticidade e menor densidade terão maior velocidade de propagação do som (HELLIER, 2003).

Segundo Martin (2012) A velocidade de propagação para ondas compressivas pode ser calculada pela equação 1:

$$V_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \sigma)}{\rho \cdot (1 + \sigma) \cdot (1 - 2\sigma)}} \quad (1)$$

Onde:

V_l = velocidade de propagação do som em ondas compressivas

E = módulo de Young

σ = coeficiente de Poisson

ρ = densidade do material

Vale salientar que um mesmo material pode apresentar diferentes velocidades de propagação do som se estiver submetido a diferentes temperaturas ou a diferentes processos de fabricação e tratamentos térmicos, além disso, para materiais anisotrópicos a velocidade também varia de acordo com direção com que se realiza o ensaio (MARTIN, 2012).

3.1.3 Comprimento de Onda

Outra propriedade de onda importante para detecção de defeitos por ultrassom é o comprimento de onda. Usualmente, o comprimento de onda é descrito como a distância entre dois vales ou dois picos sucessivos de uma onda, sendo representado pela letra grega λ (lambda) (HELLIER, 2003). O comprimento de onda pode ser calculado por uma relação entre a velocidade de propagação da onda e a frequência de vibração, conforme a equação 3:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

Onde:

λ = Comprimento de onda

V = velocidade de propagação do som

f = frequência de vibração

A determinação do comprimento de onda é de extrema importância, pois segundo Martin (2012) apenas defeitos com dimensões maiores que metade de um comprimento de onda podem ser detectados pelo teste de ultrassom. Por tanto, conhecendo o tamanho crítico de defeito que se deseja identificar, é possível então determinar a frequência necessária a ser aplicada no teste.

Por exemplo, em um ensaio em um aço carbono cuja velocidade de propagação do som é de 5900m/s e utilizando um transdutor de 5 MHz o comprimento da onda ultrassônica emitida será de aproximadamente 1,2 mm, logo somente defeitos maiores que 0,6 mm poderão ser detectados com facilidade.

3.1.4 Reflexão Sônica

A Reflexão é um fenômeno inevitável quando se trata da transmissão da energia sonora entre dois meios distintos. Segundo Andreucci (2011), quando uma onda sonora atinge a interface entre 2 materiais, uma parcela dela é transmitida e outra parcela é refletida, sendo que o tamanho dessas parcelas irá depender das propriedades de cada material. Por exemplo, em uma interface aço – ar, a energia refletida é praticamente 100%, porém já para uma interface aço – água, a energia refletida é de 88% da energia total (HELLIER, 2003). De modo geral quanto mais distintas forem as características acústicas entre os dois materiais, maior será a parcela de energia refletida (HELLIER, 2003).

É a partir da reflexão que se torna possível a detecção de defeitos em materiais através do ensaio de ultrassom. Quando uma onda sonora atravessa um metal e encontra alguma descontinuidade, como uma trinca ou até mesmo inclusões não metálicas, parte ou 100% da energia sonora será refletida, e essa energia refletida é o que nos informa a presença ou não dessas descontinuidades (HELLIER, 2003).

A característica que determina a quantidade de energia refletida ou transmitida é chamada de impedância acústica (SANTIN 2003), e pode ser definida como sendo o produto entre a massa específica de material pela sua respectiva velocidade do som (HELLIER, 2003).

Ao mesmo tempo em que o fenômeno da reflexão é o que torna possível a detecção de descontinuidades, ele também pode ser considerado um problema quando se trata da transmissão do feixe sonoro do transdutor para o material. Pois, como se sabe, nenhuma superfície é perfeitamente lisa, logo pequenas regiões de ar, por menor que sejam, irão existir se o transdutor for simplesmente encostado na peça que se deseja ensaiar, e como dito anteriormente 100% da energia será refletida em uma interface metal – ar.

Acoplantes tem como principal finalidade excluir qualquer camada de ar que possa existir entre as superfícies do cabeçote e do material em ensaio (MARTIN, 2012). Os acoplantes consistem em uma fina camada de um líquido ou de uma substância pastosa. Os mais usuais em ensaios por contato são a água, óleos, glicerina, graxas e outros produtos líquidos ou pastosos (SANTIN, 2003).

Segundo Martin (2012) os principais parâmetros na seleção do acoplante são: uma boa inércia química, boa molhabilidade, viscosidade adequada, facilidade de remoção, compatibilidade de impedância acústica com o transdutor e a peça, baixa atenuação e baixo custo. Ainda com relação a seleção do acoplante Santin (2003) recomenda que para materiais mais rugosos um acoplante com maior viscosidade deve ser selecionado.

3.1.5 Atenuação Sônica

A energia do feixe sônico recebido por um transdutor é consideravelmente menor que a intensidade inicial de transmissão (SANTIN, 2003). Segundo Martin (2012) e Santin (2003), isso ocorre principalmente por dois efeitos, o primeiro deles é a própria característica geométrica de propagação do feixe a qual proporciona a dispersão do mesmo e será discutida mais a fundo na seção 3.1.6 desse trabalho, o segundo efeito, o qual é denominado de atenuação, se dá basicamente pela diferença de impedâncias acústicas entre interfaces, absorção e espalhamento das ondas ultrassônicas, além das perdas devido ao efeito da difração.

A primeira forma de atenuação, a qual é abordada na seção 3.1.4 desse trabalho, trata-se da reflexão sofrida pelo feixe ultrassônico devido à diferença de impedâncias acústicas quando o mesmo atravessa uma interface entre duas substancias diferentes.

O segundo tipo de atenuação é conhecida por absorção e ocorre basicamente pela conversão da energia mecânica em energia térmica (SANTIN, 2003). Martin (2012) explica que quando uma onda ultrassônica se propaga agitando as partículas de um material, tais partículas colidem com partículas adjacentes tornando assim possível a conversão na energia mecânica da onda em calor no material. A absorção aumenta de maneira proporcional à frequência (MARTIN, 2012).

A terceira causa de atenuação é o espalhamento da onda ultrassônica que ocorre quando um feixe sônico atinge discontinuidades cristalinas, tais como os contornos de grão e inclusões não metálicas, estas discontinuidades tendem a desviar pequenas quantidades de energia para fora do feixe principal (SANTIN, 2003). Quando o tamanho de grão é muito menor que um comprimento de onda, o efeito de espalhamento pode ser desprezado, porém para tamanhos de grão acima

de 0,1 comprimentos de onda o espalhamento pode prejudicar a confiabilidade do teste (SANTIN, 2003).

Segundo Santin (2003), os efeitos de interferência que também podem ser chamados de difração, ocorrem quando uma frente de onda passa pela borda de uma superfície refletiva, então ela contorna a borda de uma maneira similar a um feixe de luz que contorna um objeto opaco. Quando o refletor é muito pequeno comparado com o feixe, como um poro ou uma inclusão, a onda curva-se ao redor das bordas produzindo um padrão vibratório diferente na zona imediatamente atrás deste (SANTIN, 2003).

3.1.6 Campo Sônico

O Princípio de Huygens estabelece que a energia irradiada a partir de um ponto propaga-se em todas as direções, com uma frente de onda assumindo o formato esférico, e a sua intensidade decrescendo com o quadrado da distância (SANTIN, 2003).

Andreucci (2011) descreve um cristal piezelétrico gerador de ondas ultrassônicas sendo formado por infinitos pontos oscilantes de forma que cada ponto produz ondas que se propagam no meio. E segundo Santin (2003) esse fato faz com que as frentes de ondas percam seu formato esférico devido à interferência que cada frente de onda promove uma sobre as outras. A Figura 6 ilustra o campo sônico nas proximidades de um cristal.

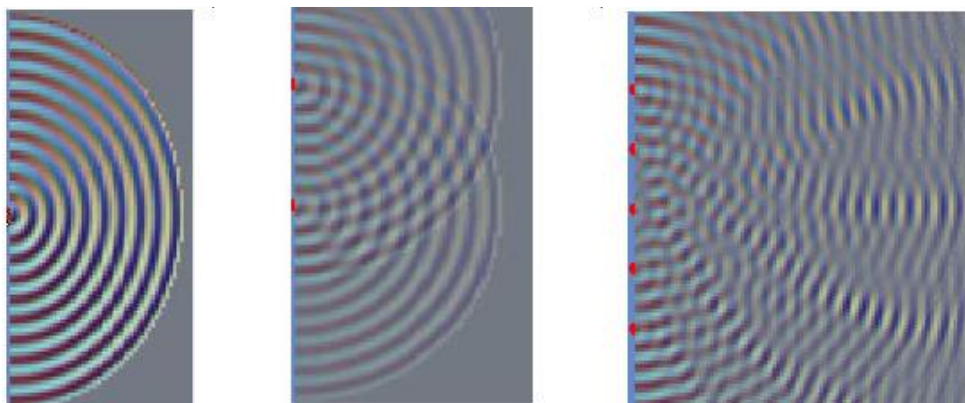


Figura 6 - Campo Sônico nas Proximidades do Cristal Piezelétrico
Fonte: Adapado de Andreucci (2011).

Conforme as frentes de ondas se afastam do cristal, as interferências vão diminuindo, e começam a se tornar uma única frente de onda assumindo a forma de um feixe sônico (ANDREUCCI, 2011). Esse feixe sônico é convenientemente separado em três regiões, o campo próximo, a zona de transição e o campo distante, assim como pode ser visualizado na figura 7.

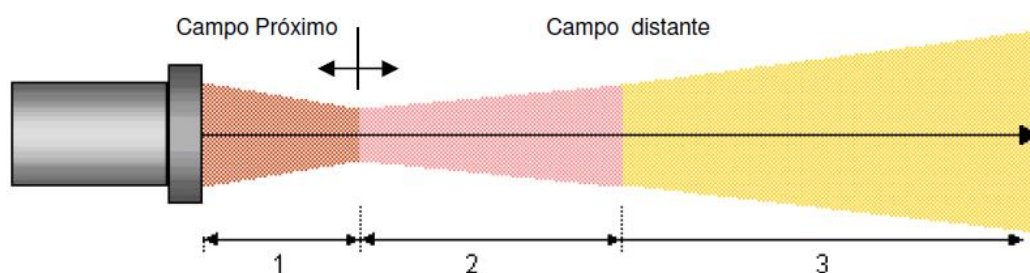


Figura 7 - Representação de um Feixe Sônico.
Fonte: Andreucci (2011).

A interferência entre as ondas esféricas resulta em um sistema de máximos e mínimos de intensidade na região próxima ao transdutor (MARTIN, 2012). Segundo Santin (2003), essa região que se caracteriza por uma grande variação da intensidade sônica é chamada de campo próximo.

Martin (2012) descreve que o campo próximo apresenta largura próxima ao diâmetro do cristal, porém, tal largura é reduzida até o final do campo próximo, deixando o feixe no formato de um cone convergente. Santin (2003) afirma que o ponto onde o feixe apresenta um valor máximo de pressão sonora representa o fim do campo próximo, além disso, que tal ponto irá depender das dimensões do cristal, das características do meio e da frequência sonora.

A partir do limite do campo próximo, a variação da pressão sônica devido às interferências deixa de existir, e então o feixe começa a divergir (SANTIN, 2003), a região logo após o campo próximo apresenta um ângulo de divergência variável e por esse motivo é chamada de região de transição (SANTIN, 2003).

A partir de uma distância aproximada de 3 vezes o tamanho do campo próximo a divergência do feixe passa a ocorrer com um ângulo constante e queda da pressão sônica assume valor proporcional ao inverso da distância, e essa região é chamada de campo distante (SANTIN, 2003).

3.2 CABEÇOTES

Santin (2003) descreve os cabeçotes como sendo os dispositivos responsáveis pela emissão e recepção das ondas sônicas. Um cabeçote padrão é composto por um ou dois cristais piezelétricos, bloco atenuador, face protetora e pela carcaça (SANTIN, 2003).

O principal componente de um cabeçote é o cristal piezelétrico. Tal componente tem a função de converter energia elétrica em ondas acústicas e vice-versa (SANTIN, 2003).

Santin (2003) classifica os cabeçotes de acordo com ângulo de emissão do feixe sônico, com a quantidade de cristais e também os divide entre cabeçotes de contato e por imersão.

O cabeçote empregado neste trabalho consiste em um cabeçote de incidência normal, esse tipo de cabeçote emite ondas ultrassônicas longitudinais e perpendiculares em relação à superfície (MARTIN, 2012), segundo Santin (2003) este é o cabeçote mais usual em inspeção ultrassônica. O modelo construtivo de um cabeçote normal pode ser visualizado na figura 8.

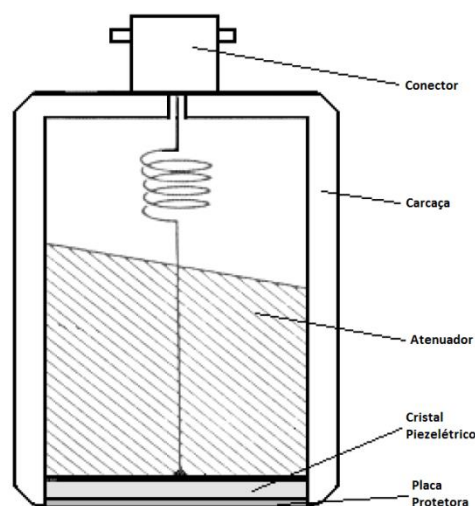


Figura 8 - Cabeçote de Incidência Normal
Fonte: Adaptado de Hellier (2003).

A grande desvantagem desse tipo de cabeçote é que o pulso inicial sempre é mostrado na tela do aparelho (SANTIN, 2003). Esse fato faz com que exista uma região, próxima à superfície da peça, onde não é possível detectar discontinuidades, e por isso é chamada de zona morta. Cabeçotes com uma menor

duração de pulso, ou com frequências mais altas, apresentam uma menor zona morta (MARTIN, 2012).

3.3 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

Martin (2012) classifica as técnicas de inspeção de acordo com o tipo e disposição dos cabeçotes utilizados, além disso as técnicas podem ser por contato ou imersão e modos automáticos e manuais.

Neste trabalho A técnica de inspeção utilizada foi a pulso eco por contato. Santin (2003) descreve o pulso eco como sendo este o método mais utilizado por ser de fácil aplicação, pois exige poucos equipamentos e por apenas necessitar de acesso a uma das superfícies. Ele é baseado no princípio que quando um pulso sônico emitido por um transdutor encontra uma interface, ele é parcial ou totalmente refletido, então esse pulso refletido retorna ao transdutor que o transforma em energia elétrica e posteriormente em um sinal na tela do aparelho (SANTIN 2003).

Uma particularidade do método pulso eco quando empregado em superfícies opostas paralelas é o surgimento de ecos fundos múltiplos e espaçados uniformemente, porém com um decréscimo de amplitude (MARTIN 2012). Segundo Martin (2012), esses ecos ocorrem pelo fato de quem nem toda a energia que efetivamente é transmitida do cabeçote para o material retorna ao cabeçote, o feixe sônico sofre múltiplas reflexões dentro da peça até que seja totalmente extinguido pela absorção do cabeçote e pelos efeitos de atenuação.

Outra particularidade deste método, como o próprio nome sugere, é o uso de pulsos curtos de som, em vez de ondas contínuas. Um pulso refere-se a um grupo de ondas curtas, sendo que, não há presença de ondas antes ou após ele (MARTIN, 2012).

Um transdutor de ultrassom geralmente é excitado por um pulso de tensão com tempo inferior a 10 μ s, durante esse intervalo o transdutor atinge uma amplitude máxima de vibração na sua frequência nominal (MARTIN, 2012). Segundo Martin 2012, uma boa resolução exige um pulso curto e uma alta energia de saída.

4 POROSIDADE EM REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA

4.1 EFEITOS DA POROSIDADE

Segundo Olikier et al 2008 a condutividade térmica dos revestimentos são afetadas não somente pela quantidade de porosidade mas também pelo formato dos poros. Olikier et al 2008 afirmam que a condutividade térmica dos revestimentos cai com o aumento da quantidade e tamanhos dos poros.

Porém no estudo realizado por Siebert et al. (1999), eles afirmam que o modulo de elasticidade nos revestimentos também caí com o aumento da porosidade e com o aumento no tamanho dos poros. E esse decréscimo no modulo de elasticidade acarreta numa redução da longevidade dos revestimentos de barreira térmica.

4.2 PARÊMETROS QUE INFLUENCIAM NO VÍVEL DE POROSIDADE

Segundo kulkarni et al. (2003), a quantidade de poros aumenta com o aumento do tamanho de partícula e segundo eles isso se deve a redução da eficiência de fusão das partículas e também devido a um aumento na fragmentação dos splats.

Além do tamanho de partícula kulkarni et al. (2003) e Prystay et al. (2001) afirmam que a velocidade e temperatura de partícula são outros dois parâmetros de extrema importância no estudo de porosidade em revestimentos de barreira térmica.

Prystay et al. (2001) descrevem que tanto o aumento da temperatura de partícula quanto o aumento na velocidade de partícula, acarretam em uma diminuição significativa da porosidade.

4.3 ANÁLISE DE POROSIDADE VIA ULTRASSOM

Como descrito anteriormente, uma quantidade inadequada ou uma distribuição desigual de porosidade pode afetar negativamente a durabilidade e funcionalidade dos revestimentos de barreira térmica. Portanto, há uma necessidade da utilização de técnicas de ensaios não destrutivos para medir o nível e uniformidade de porosidade.

Segundo Rogé et al. (2002), para um dado material, desde que haja uma relação direta entre a sua densidade e o nível de porosidade, a velocidade de ultrassom pode ser utilizada para estimar o nível de porosidade. A velocidade de ultrassom em cerâmicas porosas e revestimentos depositados por processo de aspersão térmica a plasma tende a decrescer linearmente conforme o nível de porosidade do revestimento aumenta (Rogé et al., 2002).

A velocidade longitudinal de ultrassom é dependente do módulo de elasticidade, da densidade do material e do coeficiente de Poisson (Liang et al., 2012). A densidade dos revestimentos cerâmicos é diretamente e linearmente dependente do seu nível de porosidade, porém como é possível ver na equação 1, a densidade é inversamente proporcional à velocidade longitudinal do ultrassom, o que leva a pensar em um primeiro momento que a sua velocidade aumenta com uma menor densidade. Porém, esse fato não ocorre, e isso é explicado, pois os poros e microtrincas que proporcionam essa diminuição da densidade também acarretam em uma queda brusca das propriedades mecânicas do material, sendo neste caso mais específico o módulo de elasticidade (Crutzen et al., 1996). O decréscimo acentuado do módulo de elasticidade torna este o elemento de maior relevância sobre a variação da velocidade de ultrassom, com isso é possível explicar o decréscimo da velocidade quando se aumenta o nível de porosidade nesse tipo de estrutura.

Segundo B. Sibert et al. (1999), revestimentos de barreira térmica apresentam uma microestrutura não homogênea e anisotrópica. Por esse motivo um dos melhores métodos para se determinar o módulo de elasticidade nesse tipo de estrutura é realizado por indentação esférica, como a descrita no trabalho de Eskner et al. (2004).

Em vários dos trabalhos avaliados é comum a adoção de um coeficiente de Poisson constante entre 0.25 e 0.20, independentemente do nível de porosidade. Segundo Liang et al. (2012), Tal medida acarreta um pequeno erro, menor que 5%. Portanto, se tomado o coeficiente de Poisson como uma constante, as únicas propriedades que influenciam na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, sendo afetadas pela porosidade, são a densidade e o módulo de elasticidade.

Devido à relação direta entre a densidade e a porosidade, estas se tornam as principais propriedades para se determinar a porcentagem de poros em

estruturas de revestimentos cerâmicos. A densidade dos revestimentos é um parâmetro difícil de obter em campo, porém em laboratório ela pode ser calculada facilmente pelo método de Archimedes, como realizado por Crutzen et al. (1996), desde que se conheça o peso e o volume da camada de revestimento. Ambos esses parâmetros podem ser obtidos realizando uma análise comparativa entre amostras similares com e sem revestimento. A relação entre o nível de porosidade e a densidade é expressa pela equação 3:

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

Onde:

P : é a porosidade

ρ : é a densidade do revestimento poroso

ρ_0 : é densidade do revestimento sem porosidade

Caso a densidade e o módulo de elasticidade do material adotado como revestimento sejam conhecidos, a velocidade de propagação de ondas longitudinais pode ser calculada pela equação 1.

A velocidade de ultrassom também pode ser determinada de forma experimental dividindo a espessura do revestimento pelo tempo que um pulso sônico leva para atravessar essa espessura (Rogé et al. 2002). A espessura do revestimento pode ser obtida utilizando o ensaio por correntes parasitas. Já o tempo de voo é obtido pela leitura dos sinais no osciloscópio no ensaio de ultrassom.

Rogé et al. (2002), descreve de forma clara o procedimento e os problemas na obtenção do tempo de voo. A Figura 9 representa de forma esquemática um digrama dos ecos obtidos em um ensaio de ultrassom pelo método pulso eco numa amostra de metal revestido com material cerâmico. O eco “A” representa a reflexão do pulso sônico na interface ar/revestimento, já os ecos C1 e C2 representam a reflexão do pulso sônico na interface formada entre o revestimento e o metal de base, e por fim o eco “B” é oriundo da reflexão na interface metal base/ar no fundo da amostra.

Como descrito por Rogé et al. (2002), os ecos A, C1 e C2 muitas vezes se sobrepõem, tornando difícil a sua diferenciação, esse fato acontece devido o

comprimento de onda na frequência utilizada ser relativamente grande em relação a espessura do revestimento. O recurso utilizado tanto por Rogé et al. (2002), quanto Crutzen et al. 1996 e por Liang et al. (2012), para superar esse problema e obter o tempo do ultrassom no revestimento, foi realizar a medição do tempo de toda a amostra revestida, e subtrair desse valor o tempo obtido realizando o ensaio em uma amostra sem o revestimento, com isso é possível obter o resultado indiretamente mesmo sem a visualização do eco na interface entre o revestimento e o metal de base.

A resolução dos ecos é dependente da espessura (do revestimento e do metal de base) e da frequência utilizada no ensaio, sendo que um acréscimo na frequência promove uma melhor resolução dos ecos. Porém, devido à elevada atenuação do revestimento, frequências muito altas se tornam impróprias de se utilizar. Conforme constatado nos trabalhos avaliados, as frequências utilizadas nos ensaios de ultrassom na técnica pulso eco de incidência normal variavam em torno de 10 e 20 MHz.

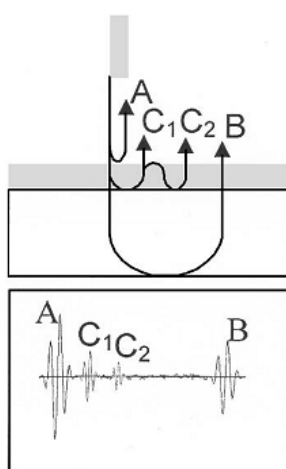


Figura 9 - Diagrama Esquemático dos Ecos Ultrassônicos em Uma Superfície Revestida
Fonte: Rogé et al., 2002.

Devido à dificuldade em avaliar tanto a densidade quanto o módulo de elasticidade do revestimento em campo, o uso das equações que relacionam essas propriedades com a porosidade torna-se inviável. A solução mais adequada utilizada por Rogé et al. (2002) foi plotar graficamente os resultados experimentais de percentual de porosidade, obtidos por metalografia e pelo método de Arquimedes, em relação à variação da velocidade de ultrassom, uma vez que elas são na prática linearmente dependentes. Com isso, os valores de porosidade podem

ser facilmente estimados em campo apenas com a medição da velocidade do ultrassom. A Figura 10, retirada e adaptada de Rogé et al. (2002) mostra diferentes valores de porosidade e suas respectivas velocidades de ultrassom para um revestimento de zircônia estabilizada com 8% ítria. Tais valores de porosidade, nas amostras I5-1 à I5-4, foram obtidos por ensaio metalográfico e também por informações fornecidas pela empresa que realizou a deposição do revestimento.

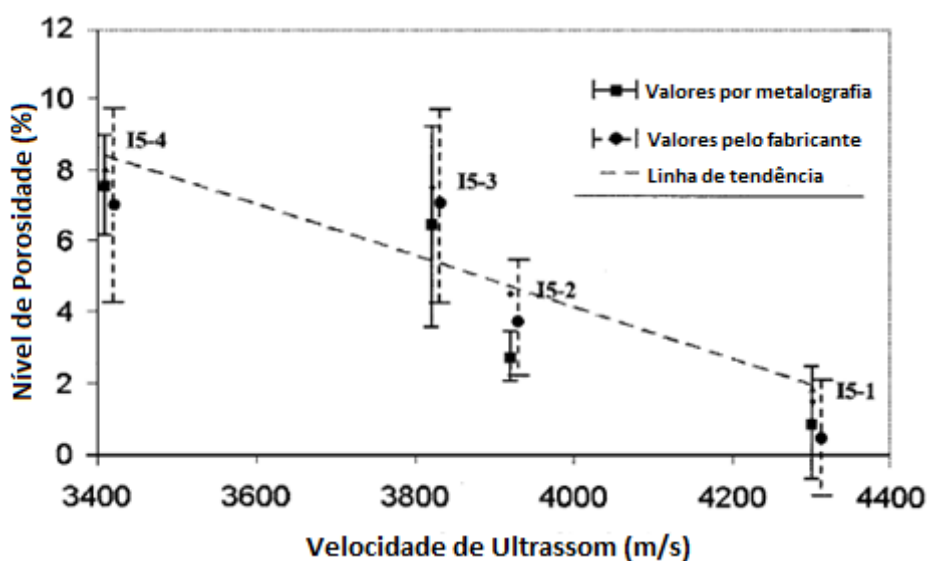


Figura 10 - Variação da Velocidade em Relação à Variação da Porcentagem de Poros
Fonte: Adaptado de Rogé et al., 2002.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo irá abordar os materiais e metodologia os quais foram utilizados na preparação das amostras bem como a metodologia, os materiais necessários para os ensaios de ultrassom e para a análise de porosidade via Microscopia Óptica. A figura 11 ilustra de forma esquemática a sequência de procedimentos adotados para a realização deste estudo.

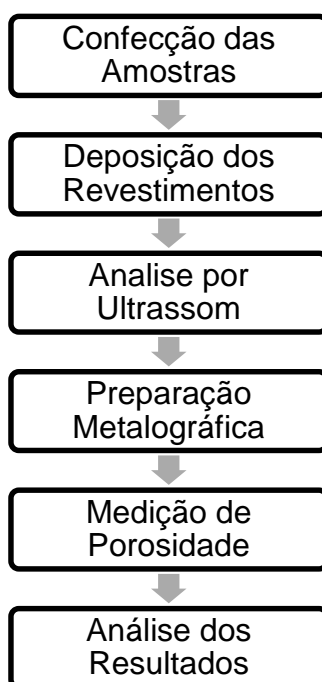


Figura 11 – Fluxograma do procedimento experimental adotado.
Fonte: Autoria Própria.

5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização dos ensaios foram confeccionadas amostras cilíndricas de Inconel 718 com aproximadamente 10 mm de espessura e um diâmetro de uma polegada. Um total de 10 amostras foi preparado para a realização dos ensaios.

Para facilitar a aderência do revestimento metálico, foi realizado sobre a superfície das amostras um jateamento abrasivo com oxido de alumínio branco e então as amostras foram encaminhadas para o processo de deposição.

A deposição dos revestimentos foi realizada em parceria com a empresa Revesteel Metalização, situada em Pinhais – PR. Previamente foi depositado pelo processo HVOF o revestimento metálico NI 343 da Praxair, o qual é constituído de

uma liga comercial de NiCrAlY. O equipamento utilizado na deposição foi o Sulzer Metco modelo Diamond Jet 2700. Todas as amostras foram depositadas com os mesmos parâmetros de deposição e com uma espessura média de aproximadamente 100 μm .

Como revestimento cerâmico foi depositado a liga comercial da Praxair ZRO 236-1, esse revestimento é composto de Zircônia (ZrO_2) parcialmente estabilizada com 7% de ítria (Y_2O_3) e 1,7% de óxido de háfnio (HfO_2). A deposição do Top-Coat foi realizada pelo processo plasma APS. O equipamento utilizado foi o Sulzer Metco modelo 9MB Plasma Spray Gun.

Com a finalidade de se obter diferentes quantidades de poros, foram realizadas 5 variações de parâmetros durante a deposição totalizando com isso 2 amostras por parâmetro. A variação dos parâmetros se deu basicamente pela alteração dos valores de corrente, voltagem e da taxa de alimentação do equipamento. Devido ao sigilo de pesquisa a descrição de cada parâmetro está expressa na tabela 1 de forma representativa no formato de sinais negativos e positivos, onde os sinais negativos representam os menores valores na configuração do equipamento de deposição e os sinais positivos representam os maiores valores na configuração do equipamento de deposição.

Tabela 1 – Parâmetros de Deposição Variáveis Para o Processo APS

Item	Par. 1	Par. 2	Par. 3	Par. 4	Par. 5
Taxa de Alimentação	-	-	-	+	+
Corrente (A)	-	+	+	-	+
Tensão (V)	-	-	+	-	+

Fonte: Autoria Própria

Após a deposição dos revestimentos as amostras foram enviadas de volta para a UTFPR-PG para a realização do ensaio de ultrassom. As amostras após receberem a deposição dos revestimentos podem ser visualizadas na figura, 12 onde está presente uma amostra de cada parâmetro. Na sequência dos ensaios de ultrassom, o qual a metodologia será discutida posteriormente, as amostras foram encaminhadas para a preparação metalográfica, e posteriormente foram analisadas no microscópio óptico



**Figura 12 – Amostras utilizadas no ensaio de ultrassom após a deposição dos revestimentos.
Fonte: Autoria Própria.**

Apenas uma amostra de cada parâmetro foi preparada para a análise no microscópio óptico. A preparação metalográfica consistiu em cortar as amostras perpendicularmente em relação à superfície de deposição, porém para não danificar o revestimento, foi utilizada uma máquina de corte de precisão modelo ISOMET 4000 da marca BUEHLER. Posterior ao corte, as amostras foram embutidas a frio em moldes de resina epoxy.

O lixamento das amostras foi realizado com discos de lixamento de diamante com 50 e 8 μm e o polimento se deu por meio de suspensão de diamante com 3 e 0,25 μm . Por final, foi realizada uma etapa de acabamento com sílica coloidal de 0,04 μm . Tanto as etapas de lixamento quanto as de polimento foram realizadas em politriz automática.

5.2 ENSAIO POR ULTRASSOM

Os ensaios de ultrassom foram realizados nas dependências do laboratório de materiais e caracterização metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

5.2.1 Metodologia de Ensaio

Inicialmente as espessuras totais das amostras (E_{tot}), que corresponde a espessura do metal de base somada com o bond-coat e top-coat, foram medidas com um micrômetro devidamente calibrado. As medidas foram realizadas

exatamente na região central das amostras, justa a qual onde também foram realizados os ensaios com ultrassom e correntes parasitas.

Em seguida, a tomada de medida das espessuras totais dos revestimentos (Erev) foi realizada com o ensaio de correntes parasitas. As medidas foram realizadas também na região central das amostras. Realizou-se um total de 5 medidas para cada amostra, minimizando assim incertezas de medições. O equipamento de correntes parasitas utilizado no ensaio foi o modelo Nortec 500D da marca Olympus com uma sonda modelo Nortec SL/300Hz-10kHz, sendo que tais equipamentos podem ser visualizados na figura 13.

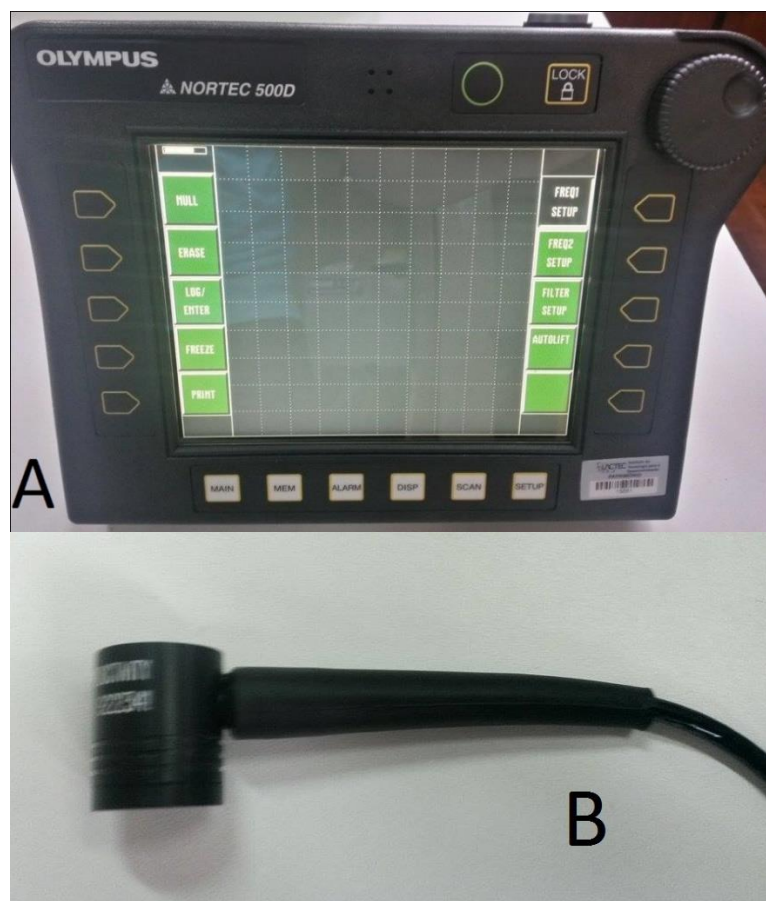


Figura 13 - “A” equipamento de correntes parasitas Olympus Nortec 500D, “B” Sonda Nortec SL/300HZ-10KHz.

Fonte: Autoria Própria

Vale salientar que a espessura obtida no ensaio de correntes parasitas é a espessura total do revestimento, ou seja, é a soma do top-coat com o bond-coat, e foi essa a espessura utilizada para realizar o cálculo de velocidade do som. Tal ação acarretará em um erro no cálculo correto da velocidade, uma vez que o bond-coat

apresenta uma velocidade de propagação do som diferente do top-cot, porém espera-se que tal erro não seja significativo quando se for analisar a variação da velocidade de propagação do som em relação a variação da porosidade, uma vez tendo uma boa uniformidade do bond-coat o único fator que irá influenciar na variação da velocidade de propagação do som será a variação da porosidade.

No que diz respeito ao ensaio de ultrassom, os equipamentos utilizados estão apresentados na figura 14, onde estão presentes o pulse-reciver Olympus 5077PR (A), o osciloscópio digital da Agilent modelo DSO-X 2022^a (B) e o cabeçote monocristal de incidência normal da Olympus modelo V327 de 10 MHz (C). Os parâmetros dos equipamentos foram ajustados de acordo com a tabela 2. Nesta tabela nota-se que parâmetros como o ganho e frequência de emissão do pulso foram elevados ao máximo devido a forte atenuação provocada pelos revestimentos. Por fim, glicerina foi utilizada como acoplante devido à sua inércia química em relação aos revestimentos e à sua facilidade de remoção.

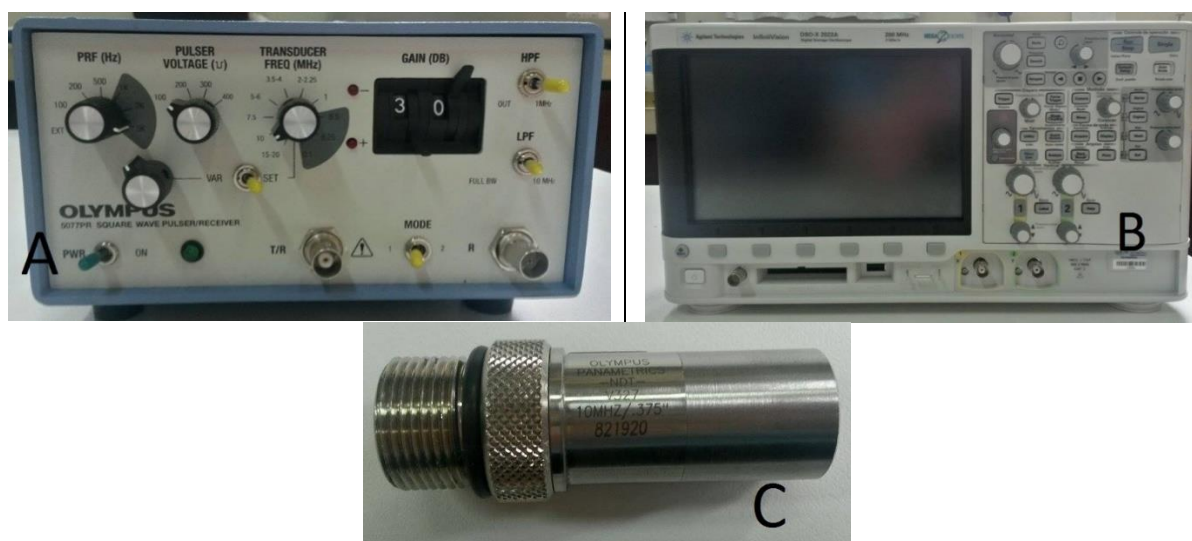


Figura 14 - “A” Pulse/Reciver Olympus 5077PR, “B” Osciloscópio Agilent 2022A, “C” Cabeçote monocristal Olympus V327-10MHz.

Fonte: Autoria Própria

Tabela 2 – parâmetros de operação do pulse reciver.

Parâmetro	Posição
Pulse repetition Frequency	5000
Pulse Voltage	100
Transducer Frequency	10 MHz
Gain	+20 A +40
HPF	1 MHz
LPF	FULL BW
Mode 1	1

Fonte: Autoria Própria

Inicialmente foi realizado o ensaio em uma amostra de inonel 718 sem a presença dos revestimentos, com isso foi possível medir a velocidade de propagação do som do metal de base das amostras ($V_{m.b}$).

Em seguida foi realiza a leitura dos tempos de voo (TOF), ou seja o tempo que o som leva para atravessar cada amostra revestida, e que para o nosso caso específico foi chamado de tempo total (T_{tot}). Realizou-se a tomada de medida na região central das amostras, e um total de 5 medidas foram feitas em cada amostra, e o tempo final de cada amostra foi considerado como a média aritmética entre as 5 medidas.

5.2.2 Metodologia de Cálculo

Devido à fina espessura dos revestimentos, a determinação dos parâmetros necessários para a avaliação da velocidade do som nos revestimentos não ocorre de maneira direta. Para o cálculo de velocidade serão necessários os valores de espessura dos revestimentos (E_{rev}) e do tempo que o som leva para atravessar essa espessura (T_{rev}).

Para determinar a espessura do revestimento (E_{rev}) foi utilizado o ensaio de correntes parasitas. Já para se determinar o tempo que o som demora em atravessar somente o revestimento (T_{rev}) foi necessário ter como base a velocidade de propagação do ultrassom no metal de base ($V_{m.b}$), a espessura do metal DE base ($E_{m.b}$) e o tempo que som leva para atravessar toda a amostra revestida (T_{total}).

Para determinar a velocidade de propagação do som no metal de base ($V_{m.b}$) adotou-se uma amostra sem revestimento. Já a espessura do metal de base ($E_{m.b}$) de cada amostra já revestida obteve-se subtraindo a espessura do revestimento (E_{rev}), medida no ensaio de correntes parasitas, da espessura total de cada amostra (E_{total}) obtida na medição por micrômetro. Por fim, o tempo que o ultrassom leva para atravessar toda a amostra (T_{total}) foi obtido no ensaio de ultrassom, o qual estabelecido como sendo a metade do tempo entre a emissão do pulso e o primeiro eco de fundo na tela do osciloscópio.

Uma vez tendo estas três variáveis (espessura do metal de base ($E_{m.b}$), espessura do revestimento (E_{rev}) e velocidade de propagação do ultrassom no metal de base ($V_{m.b}$)), nos possibilitou então calcular o tempo que o ultrassom leva para atravessar o revestimento (T_{rev}). Para isso deve-se calcular primeiramente somente

o tempo que o som leva para atravessar o metal de base ($T_{m.b.}$), utilizando a espessura e a velocidade. Com isso, utilizando a equação 5, pode-se calcular tempo que o som leva para cruzar apenas o revestimento.

$$T_{rev} = T_{total} - T_{m.b.} \quad (4)$$

Uma vez obtido o tempo que o som leva para atravessar o revestimento e a sua espessura, é possível então calcular a velocidade de propagação do som no revestimento de barreira térmica pela equação 6.

$$V_{rev} = E_{rev} / T_{rev} \quad (5)$$

5.3 ENSAIO DE MICROSCOPIA ÓTICA

O ensaio de microscopia ótica foi realizado apenas com o intuito de se quantificar o percentual de poros presente no top-coat das amostras analisadas, nenhuma análise de influência dos parâmetros de deposição ou de morfologia dos poros será abordada neste trabalho.

Para isso, imagens com quatrocentas vezes de aumento foram retiradas dos revestimentos cerâmicos através de microscopia ótica. Em seguida as imagens foram analisadas no software AnalySIS.

Para isso as imagens foram alteradas para tons de preto e cinza além de receber um controle de contraste, com isso, através da função de análise de fases, o software foi capaz de identificar a porcentagem de cerâmica e poros presentes nos revestimentos.

Um total de 5 pontos de cada amostra foi analisado e então foi feita a média aritmética simples resultando em um único valor de porosidade para cada parâmetro de deposição adotado.

6 RESULTADOS E DISCUÇÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de ultrassom, o qual também engloba as medições de espessuras realizadas com micrômetro e ensaio de correntes parasitas, os resultados das análises realizadas com o microscópio óptico e por fim o resultado do comparativo final entre o resultado obtido com o ultrassom.

6.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRASSOM

Como apresentado nos capítulos anteriores, para o cálculo da velocidade de propagação do som nos revestimentos, além do tempo de voo obtido durante o ensaio de ultrassom também foram realizadas medições de espessura das amostras e de seus respectivos revestimentos.

As medidas das espessuras totais de cada amostra, as quais foram obtidas com o auxílio de um micrômetro, estão expressas na tabela 3. Na mesma tabela, também são apresentados os resultados referentes às espessuras dos revestimentos de cada uma das amostras obtidos no ensaio de correntes parasitas.

Tabela 3 – Resultado da leitura das espessuras.

Parâmetro	Amostra	Espessura total (mm)	Espessura TBC (mm)
1	1	10,85	0,403
1	2	10,83	0,422
2	1	11,11	0,492
2	2	10,59	0,481
3	1	10,75	0,487
3	2	10,76	0,487
4	1	10,61	0,385
4	2	10,6	0,447
5	1	10,96	0,513
5	2	10,87	0,514

Fonte: Autoria Própria

Após a obtenção das espessuras, iniciou-se os ensaios de ultrassom. Para se obter um padrão apenas do metal de base, foi realizado o ensaio de ultrassom em uma amostra de Inconel 718 sem qualquer tipo de revestimento com a finalidade de se determinar a velocidade de propagação do som. Esta amostra possuía um diâmetro de 1 polegada e uma espessura de aproximadamente 10,44 mm, qual pode ser visualizada na figura 15

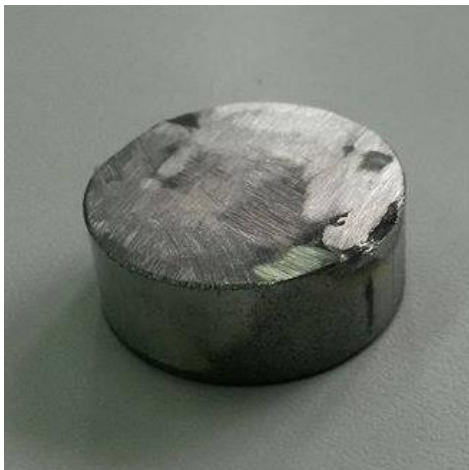


Figura 15 - Amostra de Inconel 718 sem a presença de revestimento
Fonte: Autoria própria

A imagem da figura 16 foi obtida na tela do osciloscópio durante o ensaio de ultrassom na amostra sem revestimento. Tanto a região de início quanto a região final do pulso utilizadas para a medida estão demarcadas por uma linha vermelha na imagem da figura 16, além disso o tempo obtido na tela do osciloscópio o qual corresponde ao dobro do tempo de voo na amostra analisada está delimitado pelo círculo verde, o qual pode ser visualizado no lado direito da figura 16.

Com um tempo de voo de $1,77448 \mu\text{s}$ e uma espessura de $10,44\text{mm}$ foi possível determinar a velocidade de propagação para o Inconel 718, a qual foi constada como sendo de aproximadamente 5881 m/s .

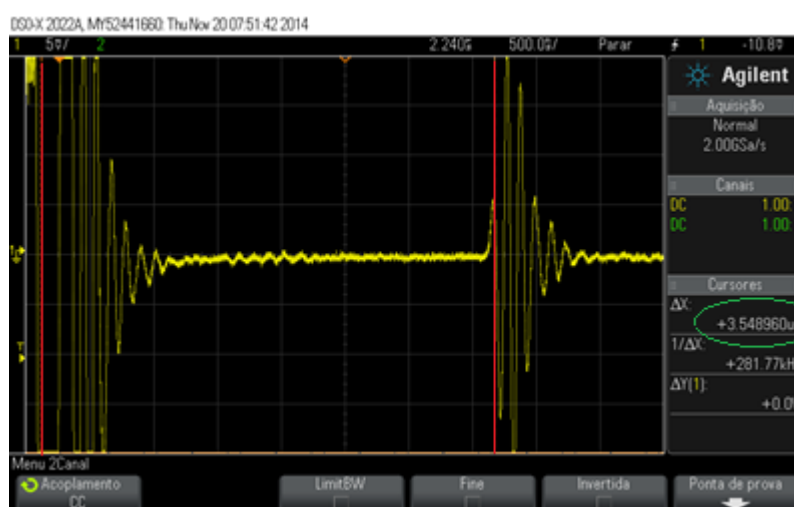


Figura 16 - Imagem da tela do osciloscópio durante o ensaio de ultrassom na amostra de Inconel 718 sem a presença de revestimento
Fonte: Autoria Própria

Posteriormente, com a finalidade de se determinar a velocidade de propagação do som nos revestimentos cerâmicos, nas amostras depositadas com os TBC's. A figura 17 apresenta leitura dos sinais obtidos na tela do osciloscópio durante o ensaio de ultrassom. As amostras depositadas com os parâmetros 1, 2, 3, 4 e 5 estão representadas respectivamente pelas imagens A, B, C, D e E. é possível ver na figura 17 que as regiões de inicial e final utilizadas para a obtenção do tempo de voo estão demarcadas por linhas vermelhas, além disso os tempos obtidos na tela do osciloscópio os quais correspondem ao dobro do tempo de voo nas amostras analisadas estão delimitados pelo círculo verde, os quais podem ser visualizado no lado direito de cada uma das imagens da figura 17.

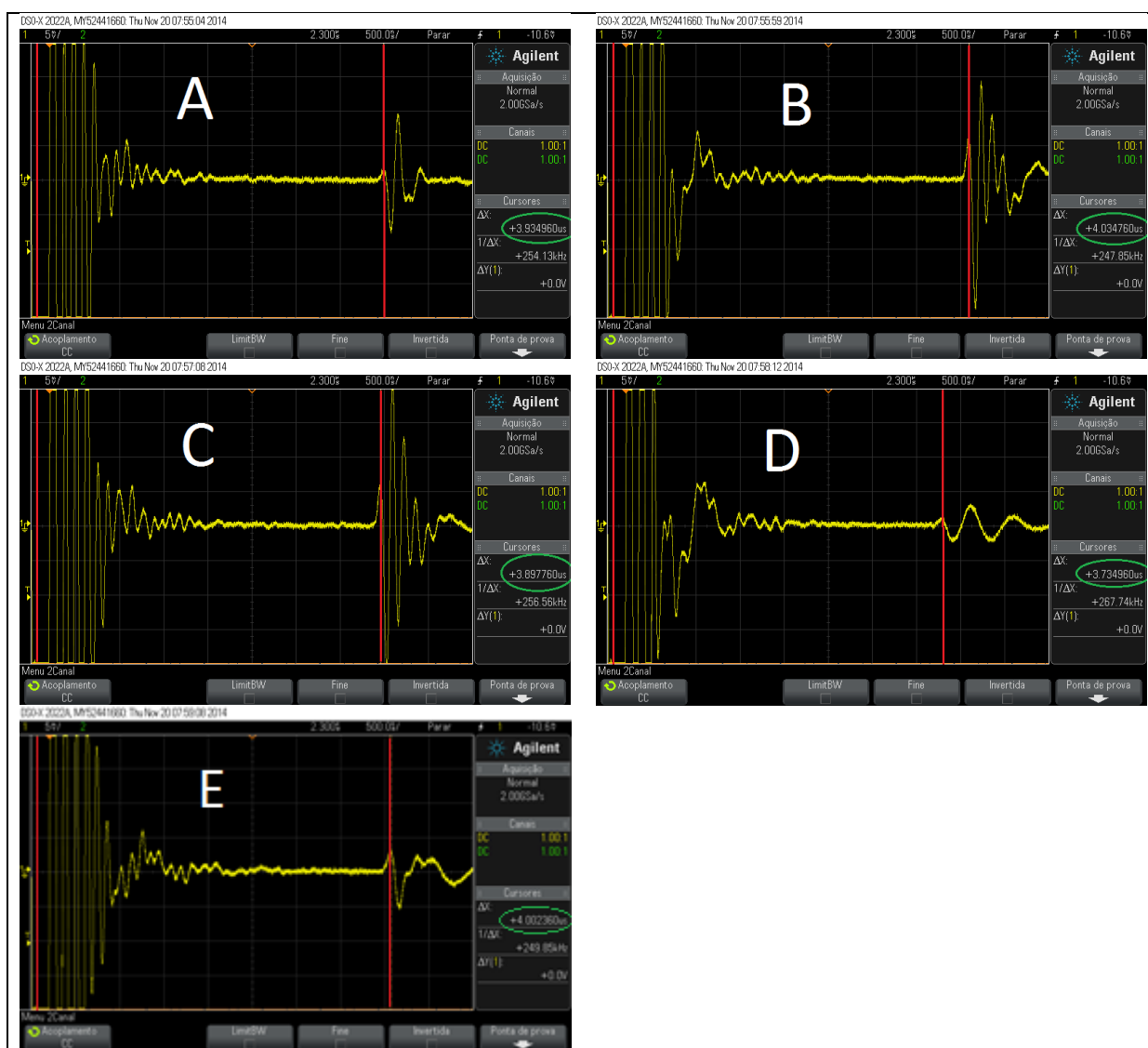


Figura 17 - Sinais obtidos na análise via ultrassom
Fonte: Autoria Própria

A partir das imagens acima é possível realizar 3 análises bastante interessantes, a primeira e principal delas é a de tempo de voo, a qual é necessária para o cálculo da velocidade de propagação do som, a segunda análise que pode ser feita é da atenuação do sinal ultrassônico sofrido por cada uma das amostras, e por fim também se pode realizar a medida da zona morta de inspeção para a técnica utilizada.

Com o resultado da análise de tempo de voo foi obtida a tabela 4.

Tabela 4 – Resultado De Tempos De Voo.

Parâmetro	Amostra	TOF (μ s)
1	1	1,9688
1	2	1,9729
2	1	2,0158
2	2	1,9167
3	1	1,9561
3	2	1,9490
4	1	1,9456
4	2	1,9805
5	1	2,0139
5	2	1,9992

Fonte: Autorial Própria

Com os resultados apresentados na tabela 4 e possível então calcular as velocidades de propagação do som para cada uma das amostras analisadas. Na tabela 5 estão apresentados o resultado do cálculo de velocidade para cada uma das amostras analisadas bem como a velocidade média de propagação de cada parâmetro de deposição.

Tabela 5 – Resultados Das Medidas De Velocidade De Propagação Do Som.

Parâmetro	Amostra	Velocidade (m/s)	Velocidade Média por Parâmetro (m/s)
1	1	2096 \pm 57	2086 \pm 34,19
1	2	2077 \pm 4	
2	1	2339 \pm 27	2387 \pm 76,56
2	2	2435 \pm 100	
3	1	2309 \pm 57	2359 \pm 60,86
3	2	2408 \pm 22	
4	1	1864 \pm 100	1812 \pm 83,93
4	2	1760 \pm 56	
5	1	2161 \pm 57	2159 \pm 38,48
5	2	2158 \pm 35	

Fonte: Autorial Própria

Durante o ensaio com o ultrassom também foi possível notar uma maior atenuação nas amostras 4 e 5. Esse fato está ligado a 2 principais fatores, o

primeiro deles é a quantidade de poros dos revestimentos, pois como se sabe poros são pequenos refletores do sinal ultrassônico promovendo microrreflexões do sinal a cada ponto, portanto uma maior quantidade de poros acarreta em uma maior quantidade de microrreflexões as quais tem por resultado uma maior atenuação do sinal ultrassônico. Por esse motivo a amostra 4 a qual apresenta a menor velocidade em decorrência da menor porosidade, conforme é apresentado no item 6.2 deste trabalho. Tal amostra sofreu uma forte atenuação do sinal ultrassônico em decorrência da porosidade.

Outro fator que contribui muito para a atenuação do sinal sonoro é a espessura do revestimento, pois quanto maior a espessura de um material atenuante, maior será a perda de sinal sonoro. Constatamos este fato na amostra 5, embora ela apresentou um valor intermediário de velocidade de propagação, o que indica uma menor quantidade de poros. Porém, conforme pode ser observada na tabela 3 ela apresentou a maior espessura dentre as amostras analisadas, e em decorrência disto também foi a que apresentou uma maior atenuação do sinal ultrassônico

Outra análise bastante interessante que pode ser feita a partir das imagens da figura 17 é o cálculo da zona morta de inspeção, ou seja, a espessura mínima que as amostras devem possuir para que os ecos de fundo não se sobreponham com o pulso ultrassônico inicial. Para isso foi tomado por base a imagem obtida durante a análise na amostra 5, a qual pode ser visualizada em detalhes na figura 19, onde a região demarcada em vermelho se caracteriza como a zona morta de inspeção.

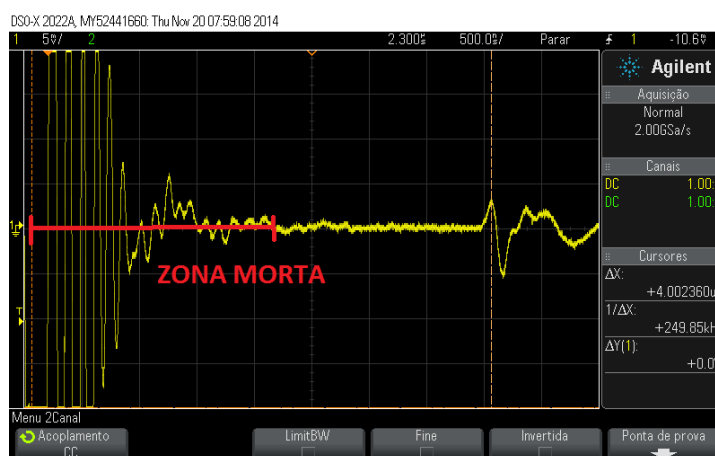


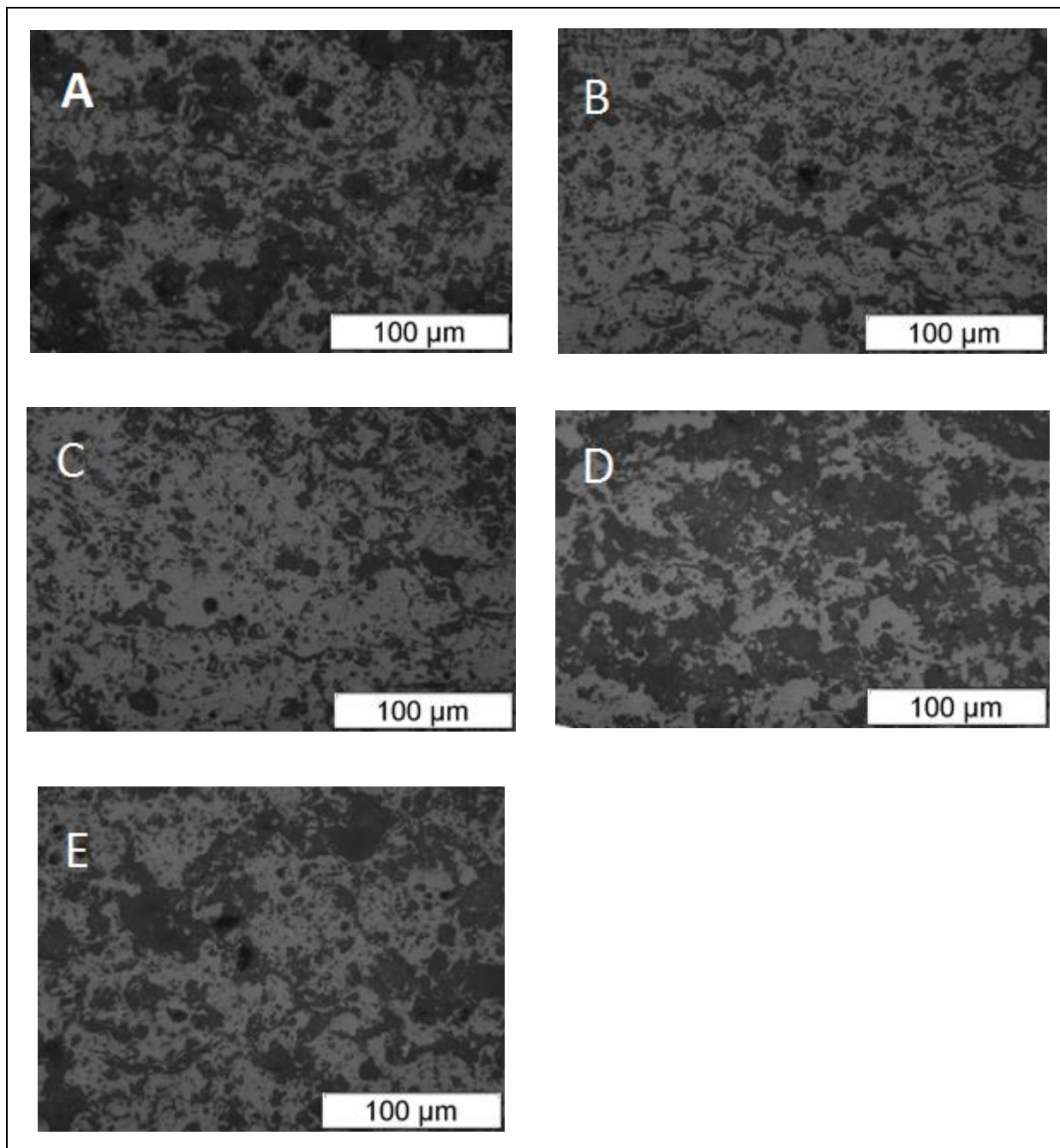
Figura 18 - Região da Zona morta observada durante os ensaios com o ultrassom.
Fonte: Autoria Própria

A zona morta da imagem da figura 18 vai até aproximadamente o ponto de $2\mu\text{s}$ indicado na tela do osciloscópio, isso significa que se a mesma amostra apresenta-se um TOF total de $1\mu\text{s}$, não seria possível realizar o ensaio de ultrassom com a mesma técnica e parâmetros. Para se calcular a espessura mínima que as amostras devem ter para que tal técnica seja aplicada, foi tomado por base a velocidade de propagação do Inconel 718, multiplicada pelo tempo de voo mínimo de $1\mu\text{s}$, resultando então uma espessura mínima de aproximadamente 5,5mm.

Isso significa que amostras com revestimentos de barreira térmica que apresentem uma espessura do metal de base inferior a 5,5mm terão a leitura dos ecos de fundo prejudicados pela presença da zona morta. Ou seja, logo constamos que há um limite de espessura mínima para que a técnica utilizada seja aplicável, conforme configuração de equipamento e especificações do transdutor.

6.2 RESULTADO DA MICROSCOPIA ÓTICA

Como relatado anteriormente, a análise no microscópio óptico foi realizada com o intuito de se quantificar a porosidade do revestimento cerâmico das amostras. É possível realizar uma análise prévia apenas olhando para as imagens obtidas durante o ensaio, as quais então expressas na figura 19. As imagens A, B, C, D e E representam respectivamente os parâmetros de deposição 1, 2, 3, 4 e 5. Nesta figura também é possível identificar que as amostras depositadas com os parâmetros 2 e 3 apresentam uma menor quantidade de regiões onde a tonalidade da imagem é escura, fato qual indica uma menor presença de poros no revestimento. Por outro lado, nas amostras depositadas com os parâmetros 1 e 4 é possível notar um grande aumento na quantidade de regiões onde a tonalidade é mais escura, indicando portanto uma maior quantidade de poros em tais amostras.



**Figura 19 - imagens obtidas durante a análise de porosidade no microscópio ótico.
Fonte: Autoria Própria**

Porém, apenas uma análise visual não é o suficiente para se quantificar precisamente os poros. Visando então quantificar a porosidade, com o auxílio da ferramenta de análise de fases do software AnalySIS, foi realizado a quantificação dos poros dos revestimentos dado pela medida do percentual de zonas escuras nas imagens. O resultado de tal estudo está expresso na tabela 6, porém devido ao sigilo da pesquisa os valores apresentados retratam apenas a variação de

porosidade entre os parâmetros sendo que o valor de 0% de porosidade representa o parâmetro de deposição que forneceu o menor valor de porosidade.

Tabela 6 – Valores de Porosidade medidos por microscopia ótica

Parâmetro	Porosidade (%)
1	14,9 ± 0,82
2	0 + 0,82
3	2,08 ± 0,81
4	24,07 ± 1,56
5	8,67 ± 0,73

Fonte: Aatoria Própria

A partir da tabela 6 é possível constatar que a deposição do revestimento cerâmico com os parâmetros 1 e 4, assim como observado pela inspeção visual das imagens, apresentam a maior quantidade de poros. Além disso é possível que os parâmetros 2 e 3 forneceram valores bem próximos além de serem os parâmetros que apresentaram a menor porcentagem de poros dos revestimentos.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES E POROSIDADES

Procurando atender o principal objetivo deste trabalho, qual era o de avaliar se a técnica de inspeção por ultrassom era capaz de qualificar os revestimentos cerâmicos analisados de acordo com o seu percentual de poros, a seguir será apresentado este estudo. Para isso foram plotados no gráfico da figura 20 os valores de velocidade propagação do som em relação ao percentual de poros para cada parâmetro de deposição. Com este gráfico foi possível analisar a relação entre tais grandezas (Velocidade x Porosidade).

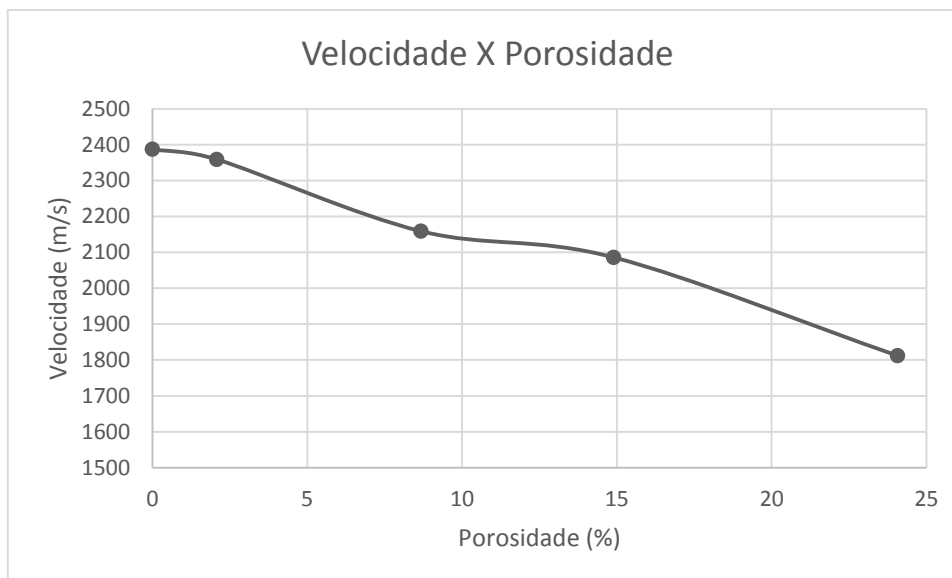


Figura 20 - Gráfico que relaciona a velocidade de propagação do som em relação a porosidade dos revestimentos cerâmicos
Fonte: Autoria Própria

Inicialmente é possível ver que a velocidade de propagação do som tende a decrescer conforme a porcentagem de poros aumenta na estrutura da parte cerâmica dos revestimentos de barreira térmica. Como descrito anteriormente, tal decréscimo da velocidade está ligado à redução do módulo de elasticidade em revestimentos mais porosos.

Outro fato interessante que pode ser observado na análise do gráfico 20, é que o decréscimo da velocidade ocorre de forma aproximadamente linear, chegando a apresentar um coeficiente de correlação entre os pontos de cerca de 0,98.

Por fim devido a boa relação obtida entre os dados de velocidade de propagação e percentual de poros de revestimentos cerâmicos é possível afirmar que a técnica utilizada é capaz de se estimar a quantidade de poros em revestimentos de barreira térmica a base de YSZ sendo estes depositados pelo processo de plasma APS.

7 CONCLUSÕES

7.1 DISPOSIÇÕES GERAIS

Com o presente trabalho foi possível observar que a técnica de ultrassom pulso eco utilizando um transdutor piezelétrico monocristal foi capaz de realizar leituras de tempos de voo em amostras de revestimentos de barreira térmica depositados por plasma.

Os revestimentos mais porosos e mais espessos provocaram uma maior atenuação do sinal ultrassônico dificultando assim a leitura dos sinais.

Pode-se concluir também que fato de se utilizar a espessura total do TBC, formado pelo bond-coat + top-coat para o cálculo de velocidade de propagação do som, não interfere em uma análise qualitativa da porosidade.

Além disto, também foi possível observar que a técnica adotada não é capaz de ser aplicada em objetos com espessuras inferiores à 5,5mm devido aos ecos de fundo se situarem na zona morta de inspeção do equipamento.

No que diz respeito a medição de porosidade via microscopia óptica, foi possível notar que a técnica empregada é capaz de quantificar a porosidade dos revestimentos com um baixo nível de incerteza.

Na sequência, tendo em mãos tanto os dados obtidos de velocidade de propagação do som quanto os valores de porosidade, foram possíveis correlacionar tais dados e perceber que a velocidade de propagação do som decai com aumento do percentual de poros dos revestimentos, e que além disso, esse decaimento ocorre de forma aproximadamente linear, fatos estes que estão de acordo com os estudos apresentados por Rogé et al. (2002).

Por fim, pode-se concluir que a técnica de ultrassom pulso eco, utilizando um cabeçote mono cristal de incidência normal à uma frequência de 10 MHz é capaz de qualificar revestimentos de barreira térmica depositados por plasma de acordo com a quantidade de poros presente na estrutura da parte cerâmica que compõem tais revestimentos.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de ondas ultrassônicas compressivas em revestimentos de barreira térmica podem ir bem mais além dos objetivos desse trabalho. Uma sugestão para trabalhos futuros é aprimorar o gráfico de velocidade em relação a porosidade para que se tenha uma maior precisão em análises quantitativas do percentual de poros.

Além disso, outro estudo bastante interessante seria uma abordagem analítica para o cálculo da velocidade com base na equação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. Com isso seria possível aferir o método experimental aqui abordado além de identificar possíveis falhas durante a execução do método.

Por fim, uma terceira e última sugestão seria aplicar o ensaio de ultrassom com ondas longitudinais em componentes reais de turbinas a gás, tentando superar as dificuldades impostas pela geometria de tais componentes.

7.3 RECOMENDAÇÕES

Durante os ensaios foi adotado uma amostra com dimensões bem definidas com a função de um bloco padrão, o que nos levou a obtermos resultados de forma mais precisa, diminuindo assim o tempo total do ensaio e diminuindo o erro entre as leituras. Recomenda-se portanto para estudos futuros a adoção de uma amostra padrão com dimensões, tempo de voo e resposta no osciloscópio bem definidos, com a finalidade de diminuir o tempo de ensaio e aumentar a precisão.

Para finalizar, outra recomendação importante é com relação a disposição dos cabos na bancada de trabalho, pois durante os ensaios foi notado que quando os cabos utilizados no equipamento eram expostos próximos a cabos energizados ocorria uma distorção na leitura dos sinais na tela do osciloscópio. Portanto, recomenda-se que o equipamento seja montado em uma bancada ampla a qual proporcione uma boa distribuição dos cabos de energia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Ultrassom**. Disponível em <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostilaus_2011.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2014.

CRUTZEN, H. P. et al. Ultrasonic characterization of thermal barrier coatings. **IEEE Ultrasonics Symposium**, p. 731-734. 1996.

ESKNER, M. et al. Measurement of the elastic modulus of a plasma-sprayed thermal barrier coating using spherical indentation. **Surface and Coatings Technology**, Stockholm, p.165-171. 2004.

HELLIER, C. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. New York: Mcgraw-hill, 2003.

KULKARNI, A. et al. Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings. **Materials and Engineering**, Stony Brook, p.100-111. 2003

LIANG, H. et al. Ultrasonic detection of delamination and material characterization of thermal barrier coatings. **Journal of Thermal Spray Technology**, p. 1184-1193. 2012.

MARTIN, C. C. **Ultrassom**. 1. ed. São Paulo: Abendi, 2012.

MEHERWAN, P. B. **Gas Turbine engineering handbook**. 3 ed. Burlington: Elsevier, 2006.

OLIKER, V. E. et al. Effect of the porous structure of thermal barrier coatings on their heat conductivity. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, Kiev, v. 47, p. 717-722, 2008.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

PRYSTAY, M. et al. Structure of plasma-sprayed zirconia coatings tailored by controlling the temperature and velocity of the sprayed particles. **Journal of Thermal Spray Technology**, Boucherville, v 10, p. 67-75, mar. 2001.

REED, R. C. **The superalloys: fundamentals and applications**. Cambridge: Cambridge University, 2006.

ROGÉ, B. et al. Nondestructive measurement of porosity in thermal barrier coatings. **Journal Of Thermal Spray Technology**, Ottawa, p. 530-535. 11 nov. 2002.

SANTIN, J. L. **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba (PR): Optagraf, 2003.

SIEBERT, B.; et al. Changes in porosity and young's modulus due to sintering of plasma sprayed thermal barrier coatings. **Journal of Materials Processing Technology**, Julich, p. 217-223. 1999.