UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação

MESTRADO PROFISSIONAL
TECNOLOGIA EM QUÍMICA E BIOQUÍMICA
RAFAEL CARLUCCI TAVARES

Investigação da força de união de juntas
aparafusadas com o auxílio da técnica de
ultrassom

Versão Corrigida da Dissertação

São Paulo

Data do Depósito na SPG:
26/07/2017

RAFAEL CARLUCCI TAVARES

**Investigação da força de união de juntas
aparafusadas com o auxílio da técnica de
ultrassom.**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Química da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Mestre em Ciências–
Área de concentração: Tecnologia em
Química e Bioquímica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski

São Paulo
2017

AGRADECIMENTO(S)

Agradeço a Deus pela sabedoria e perseverança que me possibilitou.

Minha família e esposa Juliana Salvino Tavares, pelo incentivo e compreensão por não poder estar presente em todos os momentos desejados, devido à dedicação necessária para a conclusão deste trabalho.

Pelas amizades e suporte de todos que de forma direta ou indireta me auxiliaram no ingresso do mestrado.

Em especial a Thiago Ramos, Dan Yamashita pelo suporte e dúvidas sanadas dos desafios específicos encontrados.

Timoteo Oliveira pelo suporte e experiência compartilhada agindo como um excelente coorientador.

Marcos Lassen e Vivian Nagura pelo suporte técnico quanto às confecções de amostras utilizadas nesta dissertação.

Marcos Silveira, Michael Matz e Cesar Filipini que foram os gestores na Volkswagen que permitiram o mestrado profissional.

Ao meu orientador Julio Cezar Adamowski pela paciência e extrema contribuição intelectual.

A coordenadora do mestrado profissional Denise S. Petri pelo incentivo.

Agradeço a Volkswagen Fábrica de Veículos automotores do Brasil por me possibilitar o mestrado profissional.

E aos amigos de trabalho os quais acompanharam este desafio, Valdir Berloff, Maria Elisa Ferreira, Luiz Cláudio de Paula, Jeferson Ferreira e ao Benedito Duarte.

*"O maior desafio que enfrentamos
hoje, e que existe em cada
organização, é a necessidade de
novas maneiras de pensar."
Leland Russel*

RESUMO

Tavares, R.C. **Investigação da força de união de juntas aparafusadas com o auxílio da técnica de ultrassom**. 2017. 100p. Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em Química e Bioquímica. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

O presente estudo propõe investigar o método para estimar a força exercida pelo parafuso na junta aparafusada, propondo uma possível substituição a célula de carga convencional. Com base na técnica pulso-eco ultrassônico, verificando o tempo de propagação da onda em um parafuso retificado antes e após ser submetida a uma carga normal. A diferença de tempo correlacionada à força medida pela célula de carga foi realizada após a aplicação de um torque de aperto na região elástica da fixação. As amostras de parafuso foram retificados nas suas extremidades paralelas, o aparelho ultrassônico com transdutor de 5MHz de 6mm de diâmetro foi acoplado magneticamente sob o parafuso utilizando gel a base d'água como acoplante, para assim verificar o deslocamento, no tempo, do sinal do eco que é detectado por um limiar de amplitude desse sinal, o tempo de voo do pulso-eco longitudinal no meio isotrópico foi o objeto do estudo para correlacionar com a força medida em uma célula que mede força (kN). A diferença do tempo do pulso ultrassônico foi causado por um esforço longitudinal após um torque aplicado na região elástica de resistência mecânica do parafuso na junta simulada, utilizando um equipamento que basicamente é formado por célula de carga longitudinal e torcional com torquímetro eletrônico transdutorizado para efetuar o aperto gradativo. Este equipamento é atualmente usado para verificar o atrito de elementos roscados e as interações de inúmeras possibilidades de superfícies de contato, tais quais porcas e parafusos, conforme fórmulas da norma ISO16047.

Palavras-chave: Ultrassom, pulso-eco, força, parafuso, porca.

ABSTRACT

Tavares, R.C.) **Investigation of the clamp force of bolted joints with the aid of the ultrasound technique.** 2017.100p. Professional Master's Thesis – Graduate Program in Chemistry and Biochemistry. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

The present study proposes to investigate the method to estimate the force exerted by the screw in the bolted joint, proposing a possible replacement to the conventional load cell. Based on the pulse-echo technique ultrasonic, checking the wave propagation time in a rectified screw before and after being subjected to a normal load. The time difference correlated to the force measured by the load cell was performed after the application of a tightening torque in the elastic region of the fixation. The screw samples were rectified at their parallel ends, the ultrasonic apparatus with a 5MHz of 6mm diameter was magnetically coupled under the screw using water-based gel as a coupling, to thereby verify the time shift of the echo signal that is detected by a threshold amplitude of that signal, the flight time of the pulse-echo in the isotropic medium was the object of the study to correlate with the force measured in a cell that measures force (kN). The difference of the time of the ultrasonic pulse was caused by a longitudinal effort after a tightening torque applied in the elastic region of mechanical resistance of the screw in the simulated joint, using equipment that basically is formed by cell of longitudinal and torsional load with electronic transduced torque wrench to define the gradual tightening. This equipment is currently used to check the friction of threaded elements and the numerous possibilities of contact surfaces, such as nuts and bolts, according to ISO16047 formulas.

Keywords: Ultrasound, echo-pulse, force, bolt, nut.

LISTA DE SÍMBOLOS

z	posição do espaço da partícula
f	frequência
τ	período
l	comprimento do material
λ	comprimento da onda
t	tempo
c	velocidade acústica
c_{pe}	velocidade pulso eco
Z	Impedância acústica do material
ρ	densidade específica do material
D	Diâmetro do transdutor
θ	ângulo de divergência
α	atenuação acústica
D	distância entre as faces retificadas emissor refletor
A_1	Amplitude 1
A_2	Amplitude 2
A_3	Amplitude 3
F	Força
K	constante elástica da mola
Δ	variação
x	comprimento mola
E	módulo de Young
σ	tensão
ε	coeficiente de deslocamento
l_f	comprimento final
l_i	comprimento inicial
A	área da secção sobre tensão
c_s	velocidade cisalhamento
c_l	velocidade longitudinal
ν	coeficiente de Poisson.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TOF	Método do tempo de voo, (Time of Flight Method)
DIN	Instituto Alemão para Normas (DeutschesInstitutfürNormung)
ISO	Organização Internacional de Normatização (International Organization for Standardization)
USB	Porta Univesal (Universal Serial Bus)
Rp0,2	Limite de escoamento permanente

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da região sobre tensão e medição usando o ultrassom.....	15
Figura 2: Onda transversal e a partícula do material.....	18
Figura 3: Onda longitudinal em um meio finito.....	19
Figura 4: Esquema ilustrado da região de campo próximo e distante relacionado a intensidade relativa do pulso ultrassônico.....	22
Figura 5: Representação esquemática de uma parede emissora de onda.....	23
Figura 6: Propagação de ondas acústicas geradas a partir de um transdutor circular elucidando a interação das ondas de borda (gerados na periferia do transdutor) e a onda direta. Quando o tempo e a distância da fonte geradora aumentam as ondas de borda tendem a se propagarem em fase com a onda emitida no eixo axial.....	24
Figure 7: Aspecto de construção de um transdutor mono elemento.....	25
Figura 8: Figura a) esquema do acoplamento do transdutor de ultrassom e ecos relacionando a espessura do objeto já na figura; b) foto da tela do osciloscópio mostrando a amplitude do sinal retificado dos ecos atenuados sem escala.....	25
Figura 9: Representação em blocos do funcionamento do equipamento Lecoeur US KEY.....	26
Figura 10: Esquema de medição do parafuso sem carga normal.....	27
Figura 11: Etapas a), b), c) processamento de sinal modo A-Scan.....	28
Figura 12: Curva de tratamento térmico de ligas metálicas.....	36
Figura 13: Representação parafuso utilizado nos ensaios deste trabalho.....	39
Figura 14: Gráfico Torque Nm x Ângulo até alongamento do parafuso.....	40
Figura 15: Representação porca flangeada de acordo com ISO 1661.....	42
Figura 16: Equipamento Schatz conforme ISO 16047.....	43
Figura 17: Posicionamento das peças para ensaio da porca esticando o parafuso.....	44
Figura 18: Foto equipamento US-key.....	45
Figura 19: Foto transdutor com capa magnética.....	46
Figura 20: Posicionamento do transdutor de ultrassom no parafuso.....	47
Figura 21: Posicionamento parafuso com transdutor de ultrassom com a porca e soquete para ensaio.....	48
Figura 22: Parafuso em dispositivo antes e depois da retifica.....	49
Figura 23: Porca com agente deslizante e flocos de zinco alumínio em conjunto com parafuso e a placa de encosto utilizada.....	50
Figura 24: Ensaio tração torção do parafuso apertado pela porca.....	51
Figura 25: Aperto de 1kN em 1kN até atingir 40kN.....	52
Figura 26: Valores referentes em tempo us das amplitudes dos pulsos 1, 2, 3.....	53
Figura 27: Destaque para a região de coleta de dados experimentais antes e após as sucessivas cargas de 1kN.....	54
Figura 28: Reta de regressão referente às diferenças de tempo inicial e a carga correspondente da Amplitude 1.....	55
Figura 29: Reta de regressão referente a diferença de tempo inicial e a respectiva carga da Amplitude 2.....	56
Figura 30: Reta de regressão da diferença entre o tempo inicial e a respectiva carga da Amplitude 3.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Metal, velocidade e densidade.....	20
Tabela 2: Composição química dos parafusos com classe de resistência 4.6 a 12.9.....	35
Tabela 3: Tabela de propriedades mecânicas para parafusos em termos de tensão (Mpa), valor de escoamento a 0,2%.	37
Tabela 4: Limite de ruptura mínima parafusos em esforço longitudinal.....	38
Tabela 5: Prova de carga mínima de ruptura da porca de acordo com diâmetro, passo e classe de resistência.	41
Tabela 6: Composição Química das porcas conforme classe e passo da rosca.....	41
Tabela 7: Propriedades mecânicas das porcas medidas através de dureza Vickers, Brinell e Rockwell.....	42

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
1.1. Visão geral.....	14
2. Motivação.....	16
3. Objetivos.....	17
4. Ultrassom.....	18
4.1. Ondas transversais.....	18
4.2. Ondas longitudinais.....	19
4.3. Velocidade do som no meio e temperatura.....	20
4.4. Campo próximo, campo distante, ângulo de divergência, diretividade e onda plana.....	21
4.5. Ondas de borda:.....	23
4.6. Atenuação sonora.....	24
4.7. Método pulso ecoe transdutor de ultrassom mono elemento.....	24
4.8. Equipamento funcionando no modo de amplitude (A-Scan).....	26
4.9. Velocidade pulso eco.....	29
5. Força.....	30
5.1. Lei de Hooke da mola.....	30
5.2. Módulo de Young e coeficiente de Poisson.....	30
5.3. Cisalhamento.....	31
5.4. Relações velocidade cisalhamento, módulo elástico (E), coeficiente de poisson(ν) e densidade específica (ρ).....	32
6. Parafuso.....	34
6.1. ISO 898-1.....	34
6.2. Limites mínimos ruptura parafuso:.....	37
7. Porca.....	40
7.1. ISO 898-2.....	40
8. Aparato experimental.....	43
Figura 19: Foto transdutor com capa magnética.....	46
9. Esforço combinado.....	51
9.1. Comparar ensaio DTT escoamento e valor mínimo prova de carga.....	51
10. Ensaio realizado carga Schatz horizontal x Torque x Tempo de voo.....	52
10.1. Ensaio Schatz horizontal.....	52

10.2. Onda tempo de voo retificada.....	53
11. Conclusão.	58
12. Trabalhos futuros.	59
13. Referências bibliográficas.	60
14. Material para consulta.	61
SÚMULA CURRICULAR	62

1. Introdução.

1.1. Visão geral.

Em processos de fixação de juntas de engenharia, o que faz a união do conjunto é a força que o parafuso gera na fixação após um torque aplicado. Em uniões aparafusadas, o que garante a fixação é a força que o parafuso exerce sobre as partes atuando conjuntamente com o atrito de maneira a evitar a soltura do elemento fixador. Para tal, os parafusos e porcas geralmente possuem medidas de torques tabelados para cada aplicação, para isso é necessário garantir que os esforços de trabalho baseados nos cálculos dos carregamentos solicitantes, não causem movimentos relativos entre os componentes, não excedam o limite de resistência do material das contra peças e não alongue demasiadamente o parafuso.

A influência dos atritos entre diferentes materiais e revestimentos após a aplicação de um torque inadequado, pode comprometer o resultado da força de união desejada de forma a comprometer a segurança do projeto. Dessa forma, o trabalho propõe-se a fazer um estudo da investigação da força do parafuso na união de juntas aparafusadas com o auxílio da técnica de ultrassom. O ultrassom, através da técnica pulso-eco, permite estabelecer uma medida direta do comprimento do parafuso antes e depois do aperto, considerando-se apenas a diferença do tempo de propagação da onda no meio. Visto que o alongamento do parafuso é um fator crítico durante o aperto, onde geralmente deseja-se mantê-lo em um regime elástico ou próximo da região elasto-plástica, mensurar a força de aperto usando um método rápido, confiável e torna-se muito útil.

O uso da técnica de ultrassom oferece um método de medição complementar ao uso do torquímetro, que por sua vez, só oferece uma medida direta do torque sem levar em conta outros esforços combinados oriundos do atrito que existe entre a junção das partes. Com o advento da automação, pode-se realizar análise gráfica do aperto, porém variáveis de construção como escoamento da peça que está sendo apertada ou a ferramenta que está plastificando pode ser erroneamente interpretada graficamente, devido aos esforços combinados desconhecidos ou não mensurados.

Figura 1: Representação esquemática da região sobre tensão e medição usando o ultrassom.

Testes normalizados específicos são utilizados para determinar o limite crítico de falha do parafuso causado por esses esforços combinados em função do torque x ângulo, porém a cada mudança de aplicação há necessidade latente de se refazer os ensaios para reproduzir esse novo cenário. Isto nem sempre é viável em situações práticas de engenharia ou análise de falhas. A técnica de ultrassom pode contribuir como uma ferramenta de análise para auxiliar na interpretação dos fenômenos que está ocorrendo na junta aparafusada (figura 1). Na figura 1(a) é uma representação da peça ainda sem aperto, posicionada de forma que sofrerá uma tensão sobre a região demarcada e também a propagação do pulso ultrassônico representado pela seta vermelha. A figura 1 (b) demonstra a diferença do comprimento da extremidade, em vermelho, embora a tensão se encontre na região l_k , com o mesmo pulso ultrassônico transmitido, porém o tempo de deslocamento é maior, devido a diferença entre o comprimento final e inicial ter sido alterado, após o aperto aplicado.

2. Motivação.

Os tipos de ondas mecânicas em um meio isotrópico são derivados das constantes elásticas do mesmo. No caso do meio de propagação da onda sonora ser também contínuo e homogêneo, todas as suas propriedades mecânicas dependem apenas de duas constantes elásticas independentes que podem ser extraídas da matriz simétrica dos tensores de tensão e de deformação. Os materiais dos parafusos usados nas uniões de juntas aparafusadas possuem essas características, de forma que as suas propriedades mecânicas são tabeladas e normalizadas.

No caso de uma onda acústica longitudinal propagando-se em uma barra circular idealmente comprida, existe ainda uma relação direta com o módulo de elasticidade (Young) e a massa específica do material. Tendo em vista essa relação de dependência, é possível medir com precisão a deformação longitudinal elástica do parafuso submetido ao aperto apenas medindo-se o tempo de propagação do eco refletido do sinal pulsado da onda longitudinal, e assim, determinar a força exercida pelo parafuso.

Sabendo-se o alongamento real do parafuso, é possível controlar melhor a força de aperto requerido pelo projeto independentemente do atrito entre as partes, cuja medida pode variar também por causa da complexidade dos fenômenos inerentes aos mecanismos e superfícies que causam o atrito. Nesse sentido, o trabalho propôs-se a investigar o emprego da técnica de ultrassom pulso-eco para ser usada como critério de controle da força após o aperto de juntas aparafusadas.

Sendo assim, existe uma relação direta entre as constantes elásticas do material e a velocidade de propagação das ondas longitudinal e transversal do material. Tendo em vista a relação de dependência o módulo de cisalhamento com constantes de Lamê, cisalhamento, e Poisson.

3. Objetivos.

O objetivo principal desse trabalho é estudar e estabelecer uma relação de dependência existente entre as medidas por ultrassom de deformação longitudinal elástica de um parafuso, submetido a um aperto controlado, com os dados normalizados gerados de uma célula de carga controlada conforme a norma ISO16047.

4. Ultrassom.

4.1. Ondas transversais.

Figura 2: Onda transversal e a partícula do material.

Fonte: KINO, 1987.

As ondas transversais, também conhecidas como ondas de cisalhamento, é onde o movimento de uma partícula no meio é transversal à direção de propagação, como ilustrado na figura 2, as ondas de cisalhamento estão associadas à flexão ou curvatura de um material (por exemplo, uma haste de torção). Verificamos que os planos das partículas mantêm-se na mesma distância entre elas, movendo-se verticalmente.

As vibrações se propagam ao longo do material, sendo a energia transmitida no material a uma velocidade finita.

O comprimento de onda λ corresponde à menor distância no eixo z entre duas partículas cujas amplitudes de deslocamento sejam idênticas. O período τ corresponde ao tempo necessário para a onda percorrer uma distância λ , ou seja, a onda completa um ciclo de oscilação, sendo a frequência (f) e o período (τ):

$$f = 1/\tau \quad (1)$$

A velocidade c de propagação da onda é igual à distância percorrida (l) em uma unidade de tempo (t) (ADAMOWSKI, 2004), ou seja:

$$c = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{\tau} = \frac{l}{t} \quad (2)$$

4.2. Ondas longitudinais.

Figura 3: Onda longitudinal em um meio finito.

Fonte: KINO, 1987.

As ondas longitudinais, também conhecidas como ondas de compressão, é a onda na qual o movimento de uma partícula no meio acústico é apenas na direção da propagação. Assim, quando uma força é aplicada ao meio acústico, o meio se expande ou se contrai na direção z , como mostrado na figura 3.

Neste contexto, uma partícula é um elemento de volume grande o suficiente para conter milhões de moléculas de modo que seja contínuo em relação à sua periferia e pequeno o bastante para que grandezas como os deslocamentos de amplitude sejam constantes nesta partícula.

As variações periódicas das partículas geram uma pressão no meio, a oscilação ocorre na medida em que as partículas interagem entre si, como ilustrado na Figura 3.

4.3. Velocidade do som no meio e temperatura.

Nos meios isotrópicos temos a velocidade da onda transversal e longitudinal, a velocidade do meio está relacionada às constantes elásticas do material e também a impedância acústica descrita da seguinte maneira:

$$Z = \rho * c \quad (3)$$

Onde a impedância do meio (Z) é o índice que relaciona a densidade do material (ρ) e a velocidade finita de propagação da onda no meio (c), a unidade de medida de Z é Rayl (expressa em N.s.m^{-3}).

Tabela 1: Metal, velocidade e densidade

Metal	c (m/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$
Aço ao carbono recozido	5940	7,85
Aço microligado recozido	5950	7,86
Aço microligado temperado	5900	7,80
Aço 52100 recozido	5990	7,83
Aço 52100 temperado	5890	7,80
Aço inoxidável 302	5660	7,90
Aço inoxidável 304L	5640	7,90
Aço inoxidável 410	5390	7,67
Alumínio 1100-O	6350	2,71
Cobre 110	4700	8,90
Magnésio liga M1A	5740	1,76
Titânio com. Puro	6100	4,50

Autor: Fonseca2005.

A relação da densidade do material com a multiplicação da sua velocidade (tabela 1) é possível verificar a sua impedância acústica de acordo com a fórmula (3), o índice da impedância acústica determina se teremos transmissão e ou reflexão da onda acústica em relação à interface dos materiais envolvidos.

Uma das influências da velocidade no meio é a temperatura, no caso de materiais sólidos, a pequena variação da temperatura é pouco significativa, na prática em aços a velocidade longitudinal decai em 1m/s para cada aumento de 1°C (KRAUTKRAMER, 1990). Em locais com baixa variação de temperatura esse valor de velocidade pode ser considerado desprezível.

4.4. Campo próximo, campo distante, ângulo de divergência, diretividade e onda plana.

As regiões que determinam a aplicabilidade do ultrassom, para diferentes objetivos, é o posicionamento do feixe de ultrassom o qual não é uniforme. O feixe ultrassônico se divide em campo próximo (zona de Fresnel) e campo distante (zona de Fraunhofer).

A última posição do campo próximo ou região de Fresnel é determinada por:

$$Zona\ de\ Fresnel = N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4)$$

Na região de Fresnel tem-se posições onde a intensidade da pressão da onda é máxima, assim para a região compreendida entre a face do transdutor e a posição determinada pela equação 4. Na última posição as ondas de borda e as emitidas entram em fase e possibilitam melhor resolução gráfica quando o objetivo for realizar imagens, topografias (análise de defeitos em metais, por exemplo). No caso de realização de medidas tais como espessura de camada, distância das descontinuidades ou comprimento dos materiais, a informação importante é o ângulo de divergência do feixe ultrassônico, pois o mesmo determina a região que as bordas da peça medida serão refletidas. O ângulo de divergência (θ) está relacionado da seguinte maneira:

$$\text{sen}\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

Nota-se que o ângulo de divergência inicia-se a partir da região de campo próximo, quanto maior o ângulo do feixe acústico mais divergente é e menos concentrado estará o campo acústico, quanto menor o ângulo de divergência menos divergente é o feixe acústico e mais concentrado será o campo acústico no material analisado, essa relação define a diretividade do campo acústico (Krautkramer, 1990) (figura 4).

Figura 4: Esquema ilustrado da região de campo próximo e distante relacionado a intensidade relativa do pulso ultrassônico.

Fonte: Takahashi, R.

Depois da região de Fresnel, a intensidade da onda cai de forma exponencial e é conhecida como região de Frounhofer, porém é a zona de divergência do feixe ultrassônico com maior espalhamento da pressão das ondas acústicas até a sua atenuação.

A diretividade do sinal acústico de um transdutor pode ser medida, a partir da frequência, velocidade de propagação da onda, comprimento de onda e diâmetro do transdutor, conhecendo essas características e dimensões do parafuso, pode-se confinar a onda dentro do objeto em estudo, sem que ocorra interferência das faces laterais do mesmo, podemos esperar assim uma emissão e reflexão com boa amplitude e sem interferências das extremidades da peça, caso ocorra a interferência haverá dificuldade para interpretar os dados devido as reflexões laterais.

4.5. Ondas de borda:

Segundo o princípio de Huygens, cada ponto da face do transdutor se comporta como uma fonte, com todos os pontos vibrando de forma uniforme e com a mesma frequência, ou seja, cada ponto da face do transdutor emite uma onda independente que irá gerar regiões onde teremos ondas construtivas e destrutivas, tal princípio foi tratado matematicamente por Fresnel (figura5) (KRAUTKRAMER,1990).

Figura 5: Representação esquemática de uma parede emissora de onda.

Fonte: Krautkramer, 1990

Com o tratamento matemático dado por Fresnel, determina-se que na última posição do campo próximo têm-se ondas planas, em fase e com grande pressão acústica, a partir deste ponto a pressão acústica decai de forma exponencial como apresentado na figura 4 (campo distante).

Figura 6: Propagação de ondas acústicas geradas a partir de um transdutor circular elucidando a interação das ondas de borda (gerados na periferia do transdutor) e a onda direta. Quando o tempo e a distância da fonte geradora aumentam as ondas de borda tendem a se propagarem em fase com a onda emitida no eixo axial.

Fonte: Adamowski, 2004

4.6. Atenuação sonora

A atenuação sonora α em dB/m nos meios isotrópicos se dá pela multiplicação do logaritmo de base 10 multiplicado por 20 pela relação da amplitude consecutiva de pulsos ultrassônicos, por se tratar da avaliação do eco, a distância avaliada (d) em metros (m) é o dobro medido mecanicamente, como demonstrada na fórmula a seguir:

$$\alpha = \frac{1}{2d} \cdot 20 \cdot \log \frac{A_1}{A_2} \quad (6)$$

Quando forem utilizados aços carbono, devido o tamanho de grão de perlitas no material, deve-se utilizar frequências de ultrassom menores ou iguais a 5 MHz nos testes (Krautkramer, J.; Krautkramer, H; 1990). No caso da atenuação sonora as amplitudes consecutivas são verificadas graficamente no painel do osciloscópio, ou sinal elétrico do ultrassom compilado em computadores.

4.7. Método pulso ecoe transdutor de ultrassom mono elemento

Dentre os tipos de transdutores de ultrassom existe o transdutor mono elemento:

Figure 7: Aspecto de construção de um transdutor mono elemento.

Fonte: Oliveira, 2015.

No caso do método pulso eco o mesmo transdutor de ultrassom emite o pulso e também o recebe aplicando pulsos periódicos, as seguintes reflexões podem ser vistas com menor intensidade devida a respectiva atenuação do meio.

Figura 8: Figura a) esquema do acoplamento do transdutor de ultrassom e ecos relacionando a espessura do objeto já na figura; b) foto da tela do osciloscópio mostrando a amplitude do sinal retificado dos ecos atenuados sem escala.

Fonte: Krautkramer, J.; Krautkramer, H; 1990.

4.8. Equipamento funcionando no modo de amplitude (A-Scan).

Um transdutor é utilizado tanto para emitir como para receber a reflexão da onda emitida. O tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda (eco) é proporcional à profundidade de penetração da onda no material avaliado, possibilitando o mapeamento unidimensional de interfaces na direção de propagação da onda acústica. Segue abaixo um diagrama em blocos de um equipamento no Modo (A-Scan) (ADAMOWSKI,2004).

Trata-se de um equipamento de ultrassom portátil com conexão via porta universal de computadores USB-(Universal Serial Bus) utilizado nesta pesquisa:

Este equipamento é um emissor e receptor de sinal que funciona em dois modos:

-Modo pulso eco: utilizado com transdutor de ultrassom mono elemento onde a mesma conexão de transmissor é também o receptor programado com um atraso de tempo entre a emissão e recepção do sinal elétrico.

-Modo emissor e receptor “pitch and catch”, utilizado com transdutor duplo elemento ou par de transdutores mono elemento, onde cada cerâmica estará conectada no emissor ou no receptor de sinal elétrico que funciona geralmente em modo contínuo de transmissão e recepção de sinal.

Figura 9: Representação em blocos do funcionamento do equipamento Lecoeur US KEY.

Fonte: Lecoeur,2010.

A seguir, um esquema representativo da conexão do transdutor no equipamento “US-Key”, e a conexão do aparelho no computador onde na tela do monitor mostra a oscilação do pulso ultrassônico.

Figura 10: Esquema de medição do parafuso sem carga normal.

Fonte: Autor.

Um detalhe importante na figura 10 é a representação do acoplamento do transdutor de ultrassom sobre a face retificada de um parafuso seguido das setas representativas do sinal emitido e refletido, o qual o pulso avaliado, ou seja, o eco do pulso, percorreu 2 vezes o comprimento longitudinal da peça

Após o acoplamento magnético do transdutor na peça com ajuda de gel acoplante a base d'água, para correta transmissão do pulso ultrassônico, é necessário realizar alguns passos para avaliação do sinal no modo A-Scan no display do computador:

Figura 11: Etapas a), b), c) processamento de sinal modo A-Scan.

Fonte: Autor.

Nota-se que o sinal que aparece no osciloscópio da figura 11 a) representa o pulso sem filtro, com oscilação senoidal, a figura 11 b) é o mesmo pulso com sinal retificado e a figura 11 c) o sinal retificado com rejeição de sinais, ruídos ou reflexões da peça os quais não se deseja avaliar, no caso uma supressão de sinais com menos de 29% de amplitude. Nesta série de figuras é verificado o decaimento gradativo do sinal devido a atenuação do meio, a periodicidade encontrada e o tempo de propagação entre a emissão do sinal e a sua reflexão, no caso está sendo avaliado as 3 reflexões dos pulsos ultrassônicos emitidos.

4.9. Velocidade pulso eco.

O pulso emitido na face do objeto a ser analisado e o retorno do mesmo percorre duas vezes a distância pelo tempo do eco computado (Krautkramer, H), por esse motivo a relação da velocidade do pulso emitido (c_{pe}) válida é:

$$c_{pe} = \frac{2l}{t} \quad (7)$$

5. Força.

5.1. Lei de Hooke da mola.

A lei de Hooke generalizada para sistemas lineares significa que a relação de deformação em uma mola em conjunto com sua constante elástica, determina qual a força que esta sendo exercida no conjunto:

$$F = K. \Delta x \quad (8)$$

Como os materiais isotrópicos possuem constantes elásticas específicas, o que indicará a presença de que há uma força sendo aplicada sobre um objeto, será a variação do comprimento do objeto Δx .

5.2. Módulo de Young e coeficiente de Poisson.

O módulo de elasticidade do material é a razão entre a deformação na direção da carga que esta sendo aplicada, ainda na região elástica, sendo a máxima tensão que suporta o material sem sofrer deformação permanente. Essa relação foi definida como módulo de Young (E).

Já a deformação transversal que ocorre no material submetido a carga longitudinal, é medida pelo coeficiente de Poisson (ν), esse coeficiente está relacionado ao módulo de Young e calculada em relação ao sentido ortogonal a deformação extencional, quando se está comprimindo o material o sentido ortogonal é de expansão, quando se está esticando o material o sentido ortogonal é de contração.

A fórmula do módulo do Young é:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

Onde o coeficiente de deformação é expresso pela relação de comprimento final menos o comprimento inicial da peça dividido pelo comprimento inicial:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (10)$$

E por fim a tensão é a força exercida sobre a área da peça:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Sendo assim o módulo de Young pode ser escrito como:

$$E = \frac{F.l_i}{A.(l_f-l_i)} \quad (12)$$

Com o método do cálculo da velocidade pulso-eco (7) do ultrassom a velocidade constante do meio, sendo o tempo de propagação final maior que o tempo de propagação inicial de um corpo sujeito a tração normal, deixando em evidência a variável força (F) em função de módulo de elasticidade em carregamento normal e a diferença da variável tempo inicial e tempo final, temos:

$$F = \frac{E.A.(t_f-t_i)}{t_i} \quad (13)$$

Para aços o módulo de elasticidade constante $E = 207 \text{ GPa}$, e o coeficiente de Poisson $\nu = 0.30$ (REEDY JR., 1997).

5.3. Cisalhamento.

O módulo de cisalhamento (G) do material é relacionado da seguinte maneira:

$$G = \frac{E}{2.(1+\nu)} \quad (14)$$

Conhecendo o módulo de elasticidade (E) do material e o coeficiente de Poisson(ν) é possível relacionar todas as constantes elásticas do material.

5.4. Relações velocidade cisalhamento, módulo elástico (E), coeficiente de poisson(ν) e densidade específica (ρ).

A relação da velocidade cisalhamento se correlacionando diretamente com ultrassom, também pode ser correlacionada com o módulo de Young e densidade específica do material da seguinte maneira (KINO, 1987):

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (15)$$

Porém está relação só é válida para propagação em uma barra que possui a dimensão da seção transversal menor do que meio comprimento de onda.

Outra correlação encontrada na literatura (Kino,1987) é a relação da velocidade cisalhante com a velocidade longitudinal, em relação ao coeficiente de Poisson (ν) do material, da seguinte maneira:

$$\frac{c_s}{c_l} = \sqrt{\frac{0,5-\nu}{1-\nu}} \quad (16)$$

O módulo de Young pode ser descrito em função das velocidades longitudinais (c_l) e cisalhante (c_s) da seguinte maneira:

$$E = \rho \cdot \frac{c_l^2 - 2c_s^2}{\left(\frac{c_l}{c_s}\right)^2 - 1} \quad (17)$$

Por fim o coeficiente de Poisson pode também ser descrito em funções das velocidades conforme a seguir:

$$\nu = \frac{c_l^2 - 2c_s^2}{c_l^2 - c_s^2} \quad (18)$$

Portanto conhecendo a velocidade longitudinal do material(c_l) e sua densidade específica (ρ), é possível conhecer a sua constante de proporcionalidade longitudinal elástica (E) e coeficiente de deformação transversal (ν).

6. Parafuso.

6.1. ISO 898-1.

A norma ISO898-1 fornece padrões relacionados a composição química, resistência mecânica, ensaios para controle e certificação das exigências relacionadas a confecção dos parafusos.

Segundo a norma referente a parafuso neste caso a ISO898-1, os parafusos são classificados por classe de resistência em números divididos por pontos, o número digitado a direita do ponto significa a tensão nominal de ruptura da peça, o segundo número a esquerda do ponto significa a porcentagem nominal do escoamento da peça em relação ao valor de ruptura, o valor padronizado para cálculo é como no exemplo a seguir:

Calasse 10.9:

Multiplica-se $10 \times 100 = 1000$ Mpa, tensão de ruptura nominal mínima

Multiplica-se o $1000 \times 90\% = 900$ Mpa tensão de escoamento nominal mínima.

Seguem as tabelas referentes aos padrões estabelecidos na norma ISO898-1 para parafusos:

Tabela 2: Composição química dos parafusos com classe de resistência 4.6 a 12.9

Classe de Resistência	Material e tratamento térmico	Tolerâncias composição química (matéria prima) %					Temperatura de tempera
		C		P	S	B	°C
		mín.	máx	máx	máx	máx	mín
4.6	Aço carbono ou aço carbono com aditivos	-	0,55	0,05	0,06	Não especificado	-
4.8							
5.6		0,13	0,55	0,05	0,06		
5.8		-	0,55	0,05	0,06		
6.8		0,15	0,55	0,05	0,06		
8.8	Aço carbono com aditivos (exemplo: B, Mn, Cr) temperado e revenido	0,15	0,4	0,025	0,025	0,003	425
	ou						
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025		
	ou						
	Liga de aço temperado e revenido	0,2	0,55	0,025	0,025		
9.8	Aço carbono com aditivos (exemplo: B, Mn, Cr) temperado e revenido	0,15	0,4	0,025	0,025	0,003	425
	ou						
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025		
	ou						
	Liga de aço temperado e revenido	0,2	0,55	0,025	0,025		
10.9	Aço carbono com aditivos (exemplo: B, Mn, Cr) temperado e revenido	0,2	0,55	0,025	0,025	0,003	425
	ou						
	Aço carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025		
	ou						
	Liga de aço temperado e revenido	0,2	0,55	0,025	0,025		
12.9	Liga de aço temperada e revenida	0,3	0,5	0,025	0,025	0,003	425
12.9	Aço carbono com aditivos (exemplo: B, Mn, Cr) temperado e revenido	0,28	0,5	0,025	0,025	0,003	380

Fonte: ISO 898-1, 2013.

A resistência mecânica dos parafusos depende da composição química da peça em relação ao tratamento térmico realizado conforme curva de tratamento térmico da liga metálica. Basicamente a elevação e tempo de choque térmico do material altera a estrutura do material e aumenta ou diminui a resistência mecânica (medida no caso em dureza Rockell). Após o choque térmico da peça é realizado um revenimento para homogeneização da textura do material.

Figura 12: Curva de tratamento térmico de ligas metálicas.

Fonte: ISO 898-1, 2013.

Dependendo o tratamento térmico temos as classes diferentes dos parafusos e propriedades mecânicas quanto à resistência a ruptura, escoamento, tensão e alongamento (ductilidade do material).

Tabela 3: Tabela de propriedades mecânicas para parafusos em termos de tensão (Mpa), valor de escoamento a 0,2%.

No.	Propriedade física ou mecânica		Classe de resistência										
			4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9	
								d<16mm	d>16mm	d<16mm			
1	Tração, R _m , MPa	nom	400		500		600		800		900	1000	1200
		min	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220	
2	Menor resistência, R _{el} , MPa	nom	240	-	300	-	-	-	-	-	-	-	-
		min	240	-	300	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Tensão a 0,2% do alongamento não proporcional, R _{p0,2} , MPa	nom	-	-	-	-	-	640	640	720	900	1080	
		min	-	-	-	-	-	640	660	720	940	1100	
4	Tensão a 0,0048d do alongamento não proporcional do comprimento	nom	-	320	-	400	480	-	-	-	-	-	
		min	-	340	-	420	480	-	-	-	-	-	
5	Tensão sobre prova de carga	nom	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970	
	S _{p,nom} /R _{elmin} ou		0,94	0,91	0,93	0,9	0,92	0,91	0,91	0,9	0,88	0,88	
6	Porcentagem de alongamento depois da fratura de peças testadas em máquinas de tração	min	22	-	20	-	-	12	12	10	9	8	
7		min	-					52		48	48	44	
8		min	-	0,24	-	0,22	0,2	-	-	-	-	-	
9	Solidez da cabeça		Sem fratura										
10	Dureza Vickers, HV F _≥ 98N	min	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	
		máx	220				250	320	335	360	380	435	
11	Dureza Brinell, HBW F=30D ²	min	114	124	147	152	181	245	250	286	316	380	
		máx	220				238	316	331	355	375	429	
12	Dureza Rockwell, HRB	min	67	71	79	82	89	-					
		máx	95,0					99,5	-				
	Dureza Rockwell, HRC	min	-				-	22	23	28	32	39	
		máx	-				-	32	34	37	39	44	
13	Dureza de superfície, HV 0,3	máx	-					-			390	435	
14	Descarbonetação HV 0,3	máx	-					h			h	h	
15	Zona da rosca sem descarbonetação, E, mm	min	-					1/2H ₁			2/3H ₁	3/4H ₁	
	profundidade da completa descarbonetação na rosca, G, mm	máx	-					0,015					
16	Redução da dureza após novo revenimento, HV	máx	-					20					
17	Torque de ruptura, M _B , Nm	min	-					de acordo com a ISO 898-7					
18	Força de impacto, K _v , J	min	-		27	-		27	27	27	27	aleatório	
19	Integridade da superfície		ISO 6157-1									ISO 6157-3	

Fonte: ISO 898-1,2013.

6.2. Limites mínimos ruptura parafuso:

Segundo a norma ISO 898-1 a resistência à tração mínima de ruptura de um parafuso M10 classe 10.9, deve ser no mínimo de 60300N, porém o limite de escoamento permanente conhecido como ($R_{p0,2}$) será de 54520N, por essa razão valores inferiores a este valor é muito próximo a menor área de secção do parafuso, no caso 58mm² multiplicado pela resistência

mínima de ruptura (1400 MPa) e escoamento $R_{p0,2}$ (940 Mpa), a tabela 4 demonstra os valores mínimos de ruptura de acordo com a menor área de secção do parafuso.

Tabela 4: Limite de ruptura mínima parafusos em esforço longitudinal.

Rosca d	Área nominal sobre Tensão $A_{s,nom}$ mm^2	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
		Resistência mínima a ruptura $F_{m,min} (A_{s,nom} \times R_{m,min}), N$								
M3	5,03	2010	2110	2510	2620	3020	4020	4530	5230	6140
M3,5	6,78	2710	2850	3390	3530	4070	5420	6100	7050	8270
M4	8,78	3510	3690	4390	4570	5270	7020	7900	9130	10700
M5	14,2	5680	5960	7100	7380	8520	11350	12800	14800	17300
M6	20,1	8040	8440	10000	10400	12100	16100	18100	20900	24500
M7	28,9	11600	12100	14400	15000	17300	23100	26000	30100	35300
M8	36,6	14600	15400	18300	19000	22000	29200	32900	38100	44600
M10	58	23200	24400	29000	30200	34800	464000	52200	60300	70800
M12	84,3	33700	35400	42200	43800	50600	67400	75900	87700	103000
M14	115	46000	48300	57500	59800	69000	92000	104000	120000	140000
M16	157	62800	65900	78500	81600	94000	125000	141000	163000	192000
M18	192	76800	80600	96000	99800	115000	159000	-	200000	234000
M20	245	98000	103000	122000	127000	147000	203000	-	255000	299000
M22	303	121000	127000	152000	158000	182000	252000	-	315000	370000
M24	353	141000	148000	176000	184000	212000	293000	-	367000	431000
M27	459	184000	193000	230000	239000	275000	381000	-	477000	560000
M30	561	224000	236000	280000	292000	337000	466000	-	583000	684000
M33	694	278000	292000	347000	361000	416000	576000	-	722000	847000
M36	817	327000	343000	408000	425000	490000	678000	-	850000	997000
M39	976	390000	410000	488000	508000	586000	810000	-	1020000	1200000

Fonte: ISO 898-1,2013.

Para o parafuso M10 o diâmetro mínimo (flanco da rosca) é de 8,6mm representando uma área de $58mm^2$.

A geometria da cabeça hexagonal e corpo roscado seguem conforme a norma ISO 4017 representada na figura 13.

Figura 13: Representação parafuso utilizado nos ensaios deste trabalho.

Fonte: ISO 4017, 2014.

De acordo com a Norma ISO 4017, o parafuso M10 estava com comprimento antes da retifica de 72 mm aproximadamente, depois de retificado as medidas realizadas com micrômetro foram de aproximadamente 70,6mm. O revestimento utilizado no parafuso foi o zinco níquel eletrolítico com camada de 8 microm.

7. Porca.

7.1. ISO 898-2.

No aparato experimental foi necessário utilizar uma porca com classe de resistência igual ou superior ao do parafuso, pois as porcas possuem classe de resistência nominal, pela exigência do esforço longitudinal e uma equivalente resistência à compressão. No caso de uma porca M10 classe 10, a sua prova de carga longitudinal é maior ou igual ao valor mínimo da ruptura também longitudinal de um parafuso, assim é garantido que no aperto da combinação porca e parafuso, o parafuso alongue desde que tenha a classe igual ou inferior a da porca. Porém a junta aparafusada deve ser rígida e com menor deformação que os elementos fixadores. Em resumo o parafuso classe 10.9 terá acompanhado na fixação a porca classe 10 ou superior.

Figura 14: Gráfico Torque Nm x Ângulo até alongamento do parafuso.

Conforme a figura 14 o aperto realizado do conjunto na porca M10 classe 10 e Parafuso classe 10.9, se mostraram satisfatórios e a peça que alongou foi o parafuso, uma vez que ao desmontar o conjunto a porca não teve seus filetes deformados e o parafuso obteve.

Tabela 5: Prova de carga mínima de ruptura da porca de acordo com diâmetro, passo e classe de resistência.

Rosca D	Paço P	Prova de carga, N							
		04	05	5	6	8	9	10	12
M5	0,8	5400	7100	8250	9500	12140	13000	14800	16300
M6	1	7640	10000	11700	13500	17200	18400	20900	23100
M7	1	11000	14500	16800	19400	24700	26400	30100	33200
M8	1,25	13900	18300	21600	24900	31800	34400	38100	42500
M10	1,5	22000	29000	34200	39400	50500	54500	60300	67300
M12	1,75	32000	42200	51400	59000	74200	80100	88500	100300
M14	2	43700	57500	70200	80500	101200	109300	120800	136900
M16	2	59700	78500	95800	109900	138200	149200	164900	186800
M18	2,5	73000	96000	121000	138200	176600	176600	203500	230400
M20	2,5	93100	122500	154400	176400	225400	225400	259700	294000
M22	2,5	115100	151500	190900	218200	278800	278800	321200	363600
M24	3	134100	176500	222400	254200	324800	324800	374200	423600
M27	3	174400	229500	289200	330500	422300	422300	486500	550800
M30	3,5	213200	280500	353400	403900	516100	516100	594700	673200
M33	3,5	263700	347000	437200	499700	638500	638500	735600	832800
M36	4	310500	408500	514700	588200	751600	751600	866000	980400
M39	4	370900	488000	614900	702700	897900	897900	1035000	1171000

Fonte: ISO 898-2, 2012.

Tabela 6: Composição Química das porcas conforme classe e passo da rosca.

Rosca		Classe de resistência	Material e tratamento térmico	Composição química (matéria prima %)			
				C máx	Mn máx	P máx	S max
Rosca grossa	04		aço carbono	0,58	0,25	0,060	0,150
	05		aço carbono, Temp. Reven.	0,58	0,30	0,048	0,058
	5		aço carbono	0,58	-	0,060	0,150
	6		aço carbono	0,58	-	0,060	0,150
	8	High nut (estilo 2)	aço carbono	0,58	0,25	0,060	0,150
	8	Porca regular (estilo 1) $D \leq M16$	aço carbono	0,58	0,25	0,060	0,150
	8	Porca regular (estilo 1) $D \geq M16$	aço carbono	0,58	0,30	0,048	0,058
	9		aço carbono	0,58	0,25	0,060	0,150
	10		aço carbono, Temp. Reven.	0,58	0,30	0,048	0,058
	12		aço carbono, Temp. Reven.	0,58	0,45	0,048	0,058

Fonte: ISO 898-2, 2012.

Tabela 7: Propriedades mecânicas das porcas medidas através de dureza Vickers, Brinell e Rockwell.

Rosca D	Classe de resistência															
	04		05		5		6		8		9		10		12	
	Dureza Vickers, HV															
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
M5<D<M16	188	302	272	353	130	302	150	302	200	302	188	302	272	353	295	353
M16<D<M39					146		170		233	253					272	
	Dureza Brinell, HB															
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
M5<D<M16	179	287	259	336	124	287	143	287	190	287	179	287	259	336	280	336
M16<D<M39					139		162		221	336					259	
	Dureza Brinell, HB															
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
M5<D<M16	-	30	26	36	-	30	-	30	-	30	-	30	26	36	29	36
M16<D<M39									-	36					26	
Integridade da superfície conforme ISO6157-2																

Fonte: ISO 898-2, 2012.

A dimensão da porca utilizada está conforme a ISO 1661 M10.

Figura 15: Representação porca flangeada de acordo com ISO 1661.

Fonte: ISO 1661.

O revestimento utilizado na porca foi flocos de zinco alumínio de 10 microm com agente deslizante de resina secativa.

8. Aparato experimental.

Os equipamentos utilizados neste trabalho foram:

-Schatz horizontal conforme requisitos da Norma ISO 16047.

Figura 16: Equipamento Schatz conforme ISO 16047.

Fonte: Site catálogo Schatz®

Onde:

- 1-Transdutor torque e ângulo.
- 2-Célula de carga longitudinal e torcional.
- 3-Processador de sinais.
- 4-Torquímetro.
- 5-Monitor computador.

Figura 17: Posicionamento das peças para ensaio da porca esticando o parafuso.

Fonte: ISO 16047,2005.

Descrição esquemática da figura 17:

- 1-Peça com dureza de 50HRC.
- 2-Porca que no caso é flangeada.
- 3-Parafuso retificado.
- 4-Célula de carga de compressão e torção.

- Emissor/receptor de ultrassom US-key Lecoeur frequência de aquisição do sinal elétrico.

Figura 18: Foto equipamento US-key.

Fonte: Catálogo Lecoeur.

O equipamento Lecoeur US-key tem taxa de amostragem de 80 MHz, o que significa um erro de medida utilizando um transdutor de 5 MHz com aproximadamente $0,0625\mu\text{s}$, pelo princípio de Netzer é necessário uma frequência de aquisição de sinais mínima duas vezes maior que a frequência de emissão de sinais, portanto o mínimo em aquisição necessário seria 10MHz.

-Transdutor monoelemento de 6 mm de diâmetro com 5 MHz de frequência da Krautkramer acoplado magneticamente no parafuso:

Figura 19: Foto transdutor com capa magnética.

Fonte: Autor.

Figura 20: Posicionamento do transdutor de ultrassom no parafuso.

Fonte: Autor.

Figura 21: Posicionamento parafuso com transdutor de ultrassom com a porca e soquete para ensaio.

Fonte: Autor.

-Parafuso M10 ISO 4017 sextavado retificado classe 10.9 conforme ISO898-1 revestido de zinco eletrolítico com camada de 8microm com comprimento retificado de 70,6mm aproximadamente.

Figura 22: Parafuso em dispositivo antes e depois da retifica.

Fonte: Autor.

-Porca M10 conforme ISO 1661 classe 10 conforme ISO 898-2 revestido com flocos de zinco alumínio de 10microm, com agente deslizante de resina secativa e placa de encosto em aço com dureza de 50 HRC.

Figura 23: Porca com agente deslizante e flocos de zinco alumínio em conjunto com parafuso e a placa de encosto utilizada.

Fonte: Autor.

9. Esforço combinado.

9.1. Comparar ensaio DTT escoamento e valor mínimo prova de carga.

Embora as normas ISO prevejam uma força de 60300N, a máxima força encontrada foi de aproximadamente 53000N. O escoamento se iniciou com aproximadamente 51000N, fato o qual limitou os ensaios com carga no parafuso em 40000N. Uma possível explicação é o esforço combinado de tração mais torção cisalhante no parafuso mudando assim o coeficiente de rigidez da peça.

Figura 24: Ensaio tração torção do parafuso apertado pela porca.

Fonte: Autor.

10. Ensaio realizado carga Schatz horizontal x Torque x Tempo de voo.

10.1. Ensaio Schatz horizontal.

Com a utilização do ultrassom e o software do equipamento foi possível tabular 246 dados de medidas entre tempo de voo e carga aplicada.

Os dados foram coletados com aperto gradativo do parafuso de 1kN em 1kN até atingir 40kN, garantindo a região elástica e os as relações do módulo de Young.

A temperatura ambiente foi de 21°C e o comprimento livre entre a porca e a cabeça do parafuso foi de 50mm.

Figura 25: Aperto de 1kN em 1kN até atingir 40kN.

Fonte: Autor

10.2. Onda tempo de voo retificada.

Com base na figura 26 foram coletados os valores em μs dos ecos relativos às medições gradativas de incremento de força. Os pulsos coletados estão retificados e com rejeição de ruídos de sinais conforme explicitado na figura 11.

Os valores coletados se referem ao tempo relativo à porcentagem (%) da maior amplitude do sinal, sendo assim os valores de tempo da amplitude 1 , amplitude 2 e amplitude 3.

Figura 26: Valores referentes em tempo us das amplitudes dos pulsos 1, 2, 3.

Fonte: Autor.

Figura 27: Destaque para a região de coleta de dados experimentais antes e após as sucessivas cargas de 1kN.

Fonte: Autor

Compilando os resultados da diferença de tempo entre a peça sem carga e as demais gradativamente aplicadas às cargas, calcularam-se as retas de regressão (figura 28, 29 e 30). A avaliação pelo método de mínimos quadrados gerando o modelo de regressão linear simples, nos mostra o quanto que os valores ensaiados são explicados pela reta calculada, qual o resíduo quadrático, isto é, a proporção de valores que é explicada pelo modelo variando de 0% a 100%, quanto mais próximo de 100% melhor a reta de regressão calculada explica os valores coletados e relacionados.

Também seu erro padrão, que é a variação para mais ou menos sobre o valor da equação estimada, em relação ao total de resultados entre si relacionados e plotados.

Estatisticamente valores de resíduo quadrático acima de 70% já representam uma aproximação aceitável da reta.

Figura 28: Reta de regressão referente às diferenças de tempo inicial e a carga correspondente da Amplitude 1.

Fonte: Autor.

No caso da amplitude 1, tivemos um erro padrão de aproximadamente 5kN para a carga de acordo com a expressão da reta e diferença de tempo da amplitude 1 e a carga aplicada, obtendo um resíduo quadrático de 83%.

Figura 29: Reta de regressão referente a diferença de tempo inicial e a respectiva carga da Amplitude 2.

Fonte: Autor.

No caso da amplitude 2, tivemos um erro padrão de aproximadamente 3kN para a carga de acordo com a expressão da reta e diferença de tempo da amplitude 2 e a carga aplicada, obtendo um resíduo quadrático de 92%.

Figura 30: Reta de regressão da diferença entre o tempo inicial e a respectiva carga da Amplitude 3.

Fonte: Autor.

No caso da amplitude 3, tivemos um erro padrão de aproximadamente 2kN para a carga de acordo com a expressão da reta e diferença de tempo da amplitude 3 e a carga aplicada, obtendo um resíduo quadrático de 98%.

11. Conclusão.

Este estudo mostrou que há uma relação linear entre o tempo de propagação no parafuso e a força de aperto. O dispositivo experimental composto pelo transdutor de ultrassom de pequenas dimensões, acoplado mecanicamente à cabeça do parafuso por um ímã permanente e acusticamente por um gel a base d'água, mostrou-se adequado para verificação da força de aperto na aplicação do parafuso. O equipamento pulso-eco utilizado também se mostrou muito apropriado devido sua interface via USB com um microcomputador e a interface gráfica simples para medição do tempo de propagação no parafuso. A técnica utilizada para determinar a chegada do eco foi baseada num limiar da amplitude do sinal do eco que provavelmente produziu um erro sistemático na determinação do tempo de propagação, pois depende do comprimento de onda e da amplitude do sinal. O fato de se utilizar o tempo em múltiplos ecos, no caso, o terceiro eco, melhorou a relação sinal ruído na obtenção do tempo de propagação da onda no interior do parafuso, mas não eliminou o erro sistemático devido à técnica de processamento de sinais baseada em limiar de amplitude. Há técnicas muito precisas de processamento de sinais para determinação do tempo de propagação, como a correlação cruzada, porém não foi utilizada neste trabalho, mas poderá ser aplicada futuramente utilizando-se o mesmo aparato experimental.

Avaliando os pulsos ultrassônicos utilizando método computacional de correlação cruzada pode-se obter o cálculo de força sem o auxílio da célula de carga, pois embora o conceito de módulo elástico esteja intrínseco e é uma característica do material, não foi utilizado neste estudo a sua relação para definir a carga pela propriedade do material.

12. Trabalhos futuros.

De acordo com o trabalho desenvolvido pode-se sugerir como trabalhos futuros:

- A aplicação de uma técnica de processamento digital de sinais para medir com grande precisão a variação do tempo de voo. A técnica poderia ser uma correlação cruzada e interpolação para obter precisão da ordem de nano segundo.

- Análise da relação entre as constantes elásticas do material e tempo de voo, determinando modelos analíticos e numéricos, comparando com resultados obtidos pela técnica pulso eco com ultrassom.

- Possibilidade de acoplar, colar, a cerâmica piezoelétrica para verificar se o sinal e a repetibilidade melhoram.

- Estimar através desta técnica de ultrassom fenômenos de superfície, o atrito total ou K-fator, de diferentes juntas rígidas e revestimentos superficiais conforme cálculo da ISO16047.

- Utilizar modelos numéricos, como métodos de elementos finitos, para determinar previamente os parâmetros, como propagação da onda acústica, o campo acústico no material, velocidade e constantes de elasticidade.

13. Referências bibliográficas.

ADAMOWSKI, J. C., “**Sensores: Tecnologias e Aplicações**”, 1 ed. São Paulo:AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2004 (ISBN 85-86686-30-1).(<http://www.lus.poli.usp.br/poli-usp/disciplinas/pmr2726-pmr5234>).

FONSECA, E: “**Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço ASTM A36 Laminado com o uso de ultra-som**”. Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2005.

KRAUTKRAMER, J. ; KRAUTKRAMER, H; “**Teste de ultrassom em materiais**”, 4ªEdição:Springer-Verlag New York, 1990.

OLIVEIRA, T. F.; “**Transdutores de ultrassom multielementos lineares flexíveis com sensor de curvatura para superfícies curvas**”, Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, 2015, p.17.

REEDYJR,E.D. e GUESS, T.R.,“**Sandia National Laboratories, Material and Structural Mechanics**” MS 0443, P.O. Box 5800, Albuquerque, New Mexico 87185-0443, U.S.A.International Journal of Fracture 88: p. 305–314, 1997.

KINSLER, L; FREY, A.; COPPENS, A; Sanders, J. ; “**Fundamentals of Acoustics**” 4th.John Wiley& Sons, p.189-190,1999.

ISO 898-1 Propriedades mecânicas de fixadores de aço carbono e ligas de aço - Parte 1: Parafusos,Suíça, 2013.

ISO 4017, Fasteners - Hexagon head screws- Fifth edition- Switzerland- 2014.

ISO 898-2 Propriedades mecânicas dos fixadores – Parte 2: Porcas com valores de prova de carga especificados – rosca grossa.

ISO 16047 –“**Fasteners- Torque/clamp force testing**”, Suíça, p. 9-11, 2005.

ISO 1661- “**Hexagon nuts with flange**”, Suíça, 1998

TAKAHASHI, R., <http://www.ricardotakahashi.com.br/ultracomportamento.html> 2017

KINO, G, S. “**Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing**”. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1987.

MANUAL US-KEY – LecoœurElectronique - France 2010 - www.lecoeur-electronique.com.

14. Material para consulta.

BROOK, M. V. –**“Ultrasonic Inspection Technology Development and Search Unit Design: Examples of Practical Applications”**, 2012.

HAAR, G. R.- **“Physical Principles of Medical Ultrasonics”**, Second Edition, 2004.

DIN 946 **“Determinação do coeficiente de atrito de parafusos e porcas sob condições especificadas”**.

VDI 2230-1 **“Cálculo sistemático de conexões aparafusadas altamente tensionadas”**, Rayleigh, lord: Theory of sound. London 1926.

MUNIZ, J.M. **“Fenômenos tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas”**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PEREIRA, A. H. A. **“Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades”**, ATCP Engenharia Física, 2010.

BLITZ, J. & SIMPSON, G., **“Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing”**, Chapman & may, 1996.

FONSECA, E. **“Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço astm A36 Laminado com uso de ultrassom”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

MÜTZENBERG, L. A. , VEIT, E. A. e SILVEIRA, F. L. , **“Elasticidade, plasticidade, histerese... e ondas”**, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, p. 307 - 313, 2004, www.sb_sica.org.br

ROCHA, O. B. S., **“Análise de Defeitos de Corrosão em Aços com Revestimentos Orgânicos Utilizando Ultrassom Focalizado e Ondas Superficiais”**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

UNFER, R., **“Construção e testes de máquinas de ensaios de torção plástica para levantamento do comportamento plástico de metais”**, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004.

MAK, D. K., GAUTHIER, J., **“Ultrasonic measurement of longitudinal and shear velocities of materials at elevated temperatures”**, ultrasonics, vol 31 n°4, p. 245-249,1993.

SCALASSARA, P. R., **“Análise de sinais de ultra-som usando decomposição autorregressiva e rastreamento de pólos”**, Universidade Estadual de Londrina, 2005.

SÚMULA CURRICULAR

DADOS PESSOAIS

Nome: Rafael Carlucci Tavares

Local e data de Nascimento: São Paulo, 08/08/1983.

1. EDUCAÇÃO

Colégio Anglo Portal do Engenho, Piracicaba, 2000.

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

Graduação Matemática.

FORMAÇÃO COMPLEMENTAR

2. Curso “Conceitos Gerais Sobre Torque” - Sociedade Americana de Engenharia (SAE-Brasil), São Bernardo do Campo – 2010.

3. Curso de “Black Belt-Lean6Sigma” - Seta Desenvolvimento Gerencial, São Paulo, 2010.

4. Ensaio de materiais e processos termoquímicos - Associação Brasileira de Metalurgia (ABM).

5. Cargo

Volkswagen do Brasil Ltda - Indústria de Veículos Automotores
Analista de laboratório 2011 até atualmente.

Palestras:

1. Palestra Scania Latin América Ltda – “Aplicação de ultrassom em parafuso” 17/6/2016.