

Correlação entre ultrassom e dureza em liga de alumínio-silício A356 fundida e tratada termicamente

Marcos Xavier de Oliveira^{1*}

¹IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

*marcos_xavier@hotmail.com

(Recebido em 22/11/2019; revisado em 10/03/2020; aceito em 07/12/2020)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho investiga a possibilidade do uso da técnica de análise por ultrassom como uma alternativa aos ensaios convencionais de dureza, tendo como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de ligas de alumínio-silício através de ensaio não destrutivo. Além disto, este método de avaliação apresenta-se como uma alternativa mais rápida e econômica para o controle de qualidade de produtos produzidos em larga escala. O material escolhido para o desenvolvimento desse estudo foi a liga de alumínio A356 fundida e tratada termicamente, muito utilizada nas indústrias automotiva e aeroespacial. Neste estudo observou-se uma correlação direta e positiva entre dureza e velocidade ultrassônica para a liga alumínio A356.

Palavras-chave: Ultrassom; dureza; alumínio.

Abstract:

This work researches the possibility of using ultrasound analysis technique as an alternative to conventional hardness tests to evaluate the mechanical properties of aluminum-silicon alloy. The development of this evaluation method can be presented as a faster and cheaper alternative for the control of product quality in production lines. The material chosen for the development of this study was the aluminum-silicon A356 transformed by casting and heat treatment processes due to its great utilization in the automotive and aerospace industry. In this study, a direct and positive correlation was observed between hardness and ultrasonic speed for the aluminum alloy A356.

Keywords: Ultrasound; hardness; aluminum.

1. Introdução

Atualmente a busca por materiais mais leves com alta performance mecânica é essencial para a redução de peso dos automóveis e, conseqüentemente, o desenvolvimento de veículos automotivos com alta eficiência e baixo consumo energético. A indústria, em geral, vem aplicando um alto investimento, através de pesquisa acadêmica ou em seus centros tecnológicos, para o desenvolvimento de novos materiais que possam substituir os atuais em desempenho, porém com menor peso específico, contribuindo para a redução no consumo de combustível.

Como exemplo deste processo de substituição, pode-se citar as ligas de alumínio que vem sendo utilizadas em substituição a materiais mais densos como o ferro e o aço, em componente como carcaças e tampas de motores, caixas de engrenagens, bombas de óleo e bombas de água, sem comprometer a performance do produto. Em uma pesquisa, realizada pelo Institut für Kraftfahrzeuge (Instituto para Veículos Motorizados) da Universidade de Aachen, na Alemanha, constatou-se que o material mais efetivo na diminuição da massa de veículos são as ligas de alumínio. Segundo o estudo, as ligas de alumínio oferecem potencial de redução de peso

de até 40% em grande parte dos componentes automotivos [1].

O desenvolvimento de novos materiais é uma área amplamente estudada atualmente. A utilização desses novos materiais pelas indústrias, deve passar por uma bateria de testes químicos, físicos, mecânicos e dinâmicos para atestar a performance dos produtos com as novas matérias-primas. Estes testes podem ser realizados internamente ou em laboratórios especializados, em sua maioria são testes destrutivos os quais demandam custos de processos e ou com produtos consumidos.

Entre os testes para análise de propriedades mecânicas, um dos mais utilizados é o teste de dureza que pode ser aplicado a diversos materiais. O teste de dureza pode ser realizado direto na superfície do produto, ou em uma seção do perfil da peça em corpos de prova. As especificações são variadas dependendo do material e ou da norma requerida para realização do teste. Em alguns casos, a confecção de corpos de prova demanda algum tempo ocasionando uma certa demora na obtenção dos resultados.

Na análise de propriedades mecânicas atualmente existem várias técnicas que possibilitam o ensaio de

materiais sem a necessidade de destruição dos produtos. Estes ensaios são conhecidos como testes não destrutivos, como por exemplo, análise por ultrassom, vibração transversal, ondas de tensão, corrente parasita, ressonância mecânica, raio x, entre outros. A utilização de cada técnica varia conforme as características do material e precisão da análise. Outra vantagem dessas novas técnicas em comparação aos testes destrutivos convencionais é a maior rapidez na obtenção dos resultados, já que não existe a necessidade de confecção de corpos de prova sendo a análise realizada diretamente na peça.

Em uma análise por ultrassom, por exemplo, pode-se determinar a dureza do material através de valores de velocidade e atenuação ultrassônicas pela matriz de rigidez em diferentes orientações de propagação, pois a velocidade de propagação da onda está relacionada com as constantes elásticas e densidade do material [2].

Visando acelerar os testes de materiais em processos produtivos e reduzir o número de descartes de produção, neste trabalho será analisada a dureza da liga de alumínio - silício A356 através da técnica não-destrutiva de ultrassom. Também serão realizados testes de dureza convencional, os quais serão correlacionados com os resultados da análise por ultrassom, para definir a assertividade e precisão da técnica não-destrutiva para o material e processo em questão.

Estudos anteriores foram realizados na tentativa de associar técnicas de análise por ultrassom e propriedades mecânicas em diversos tipos de materiais, dentre estes estudos destacam-se Bouda et al.[3], Hsia e Chou [4] e Uzun e Bilge [5]. Estes trabalhos apresentam estudos que correlacionam dureza com parâmetros ultrassônicos em metais (aço baixo e médio carbono).

Em Tariq et al.[6] é realizada a caracterização de três ligas de alumínio da série 2xxx (AA 2014, AA 2024 e AA 2219) tratadas termicamente, por corrente parasita e técnicas de ultrassom. Em Rosen [7] foram realizados estudos na tentativa de correlacionar dureza com velocidade e atenuação ultrassônica também para a liga alumínio - cobre 2024 após três processos de envelhecimento por precipitação distintos.

Neste estudo a análise por ultrassom será realizada através do método pulso-eco utilizando um transdutor normal com ângulo de incidência de 0° (zero grau), o qual emite ondas longitudinais no material, recebendo como resposta parâmetros de velocidade acústica e a atenuação sônica. Será utilizado o transdutor com frequência de ondas de 4 MHz.

2. Metodologia

2.2 Fusão da liga de alumínio

Os lingotes de A356 (Al-7Si-0,3Mg) foram fundidos em um forno basculante modelo Striko, com capacidade para fusão de 4 toneladas de liga. A temperatura no processo de fusão foi de 750°C, a qual foi rigidamente controlada. Outro fator controlado no processo de fusão foi a limpeza do óxido formado sobre a superfície do material líquido, para evitar inclusões nas amostras.

Nesta fase do processo foi verificada a composição química do material e nos casos pertinentes foram realizadas correções da composição química no processo seguinte.

2.3 Tratamento de desgaseificação da liga

O material foi vazado do forno de fusão para um cadinho e levado por empilhadeira até a estação de desgaseificação. No processo de desgaseificação ocorre a remoção de gás hidrogênio dissolvido no metal líquido, através da injeção de gás nitrogênio (N₂). Durante o processo também é adicionado ao metal líquido um fluxo escorificante, que é responsável pela elevação de óxidos para a superfície do metal os quais são removidos ao fim do processo.

2.3 Fundição das amostras em coquilha

A fundição das 16 amostras utilizadas neste estudo foi realizada com a utilização de uma coquilha confeccionada com ferro fundido em formato cônico, e as dimensões dos corpos de prova conforme figura 1.

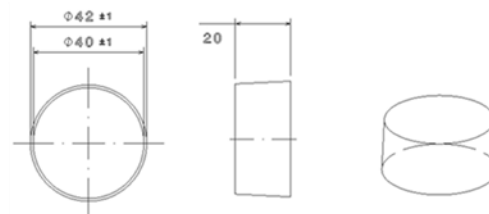


Figura 1 – Desenho com dimensional dos corpos de prova.

A coquilha utilizada como molde permanente foi pintada internamente com tinta cerâmica Dycote 39, e pré-aquecida a uma temperatura de 450°C, a cada amostra a temperatura da coquilha foi verificada utilizando-se um pirômetro ótico. Na confecção das 16 amostras a temperatura da coquilha ficou entre 450°C e 480°C, o tempo de solidificação do material foi de aproximadamente 2 minutos. As amostras após destacadas do molde foram colocadas em um recipiente com água a temperatura ambiente para resfriamento.

2.4 Tratamento térmico

As amostras foram submetidas ao tratamento térmico T6, solubilização e envelhecimento artificial. O tratamento térmico de solubilização foi realizado à temperatura de 540°C, com duração de cinco 300 minutos, em seguida as amostras foram resfriadas em água à temperatura de 60°C, com agitação, permanecendo dentro do tanque por 5 minutos. A temperatura de saída das amostras foi aproximadamente 60°C. No envelhecimento artificial as amostras foram divididas em 4 grupos, todos os grupos foram envelhecidos artificialmente a temperatura de 155°C diferenciando o tempo de permanência de cada grupo em 0, 180, 360 e 720 minutos. Após envelhecimento as peças foram arrefecidas ao ar ambiente.

2.5 Usinagem

As bases superiores e inferiores das amostras foram usinadas em um torno modelo TU2040. O processo de usinagem foi realizado para garantir o paralelismo entre as faces. As amostras foram fixadas com a face inferior paralela a base do equipamento, e a face superior (maior deformação) foi usinada. Em seguida, a altura das amostras foi dimensionada com paquímetro digital e a base superior foi fixada paralelamente a base do equipamento, assim usinando a face inferior das amostras. Em todo o processo tomou-se o cuidado para que a altura de cada amostra estivesse dentro da medida estimada de $20 \pm 2,0$ milímetros, conforme figura 1.

3. Caracterização das amostras

3.1 Densidade

A densidade foi determinada através do princípio de Arquimedes, metodologia baseada no princípio do empuxo para o cálculo da densidade real da amostra. Onde o peso do corpo de prova é medido a seco e submerso em água e realiza-se a divisão do peso seco pelo peso submerso, obtendo-se a densidade do material. Uma balança analítica do fabricante Marte modelo AS500C, com precisão de 0,01g, foi utilizada para efetuar a pesagem das amostras e a temperatura da água e ambiente 25°C .

3.2 Composição química

A caracterização química das amostras foi realizada por um espectrômetro de emissão óptica do fabricante Espectromax. As amostras foram lixadas em politriz metalográfica, para eliminar irregularidades na superfície, antes da realização das análises. Realizou-se três medidas em cada uma das amostras e calculou-se a média aritmética simples de cada um dos elementos encontrados. Os testes foram realizados conforme norma ISO 17025 [8].

3.3 Metalografia

As análises metalográficas foram realizadas nas seções transversais das amostras, a preparação foi realizada a partir do lixamento da superfície utilizando lixa de grana 120, 320, 800 e 1200, seguido de polimento com pasta de diamante $1 \mu\text{m}$ e atacadas quimicamente com uma solução de 5% de ácido fluorídrico. As micrografias foram obtidas utilizando um sistema de aquisição de imagens composto por microscópio ótico do fabricante Leitz Wetzlar, equipado com uma câmera Optika modelo 4083 B5.

3.4 Dureza

Ensaio de dureza Brinell foram realizados nas amostras, conforme norma ASTM E10-10 [19]. Para realização dos testes foi utilizado um durômetro de bancada Reicherter. A seção transversal da amostra foi preparada utilizando lixa de granulometria 120, para planificar a superfície de medição. Em cada corpo de prova foram medidos 3 pontos, posicionados de maneira equidistante, com esfera penetradora com raio de 20mm partindo do centro do corpo de prova.

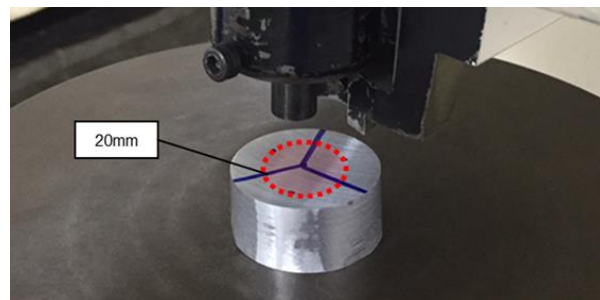


Figura 2 – Corpo de prova destacando circunferência utilizada como referência para realização das três medidas de dureza.

3.5 Ensaio de ultrassom

O método utilizado para análise de ultrassom foi o pulse-eco e o equipamento usado foi o GE Krautkramer USM-36 equipado com transdutor monocristal normal Sonatest SFF4-10 de 4MHz. Os ensaios de ultrassom foram realizados para a medida da velocidade e atenuação sônica. Utilizou-se uma resina de silicone como fluido acoplante entre transdutor e amostra. Também foi utilizado um valor de ganho ajustado fixo para todas as amostras no valor de 44 dB.

4. Resultados e discussão

4.1 Densidade

A densidade média obtida considerando as 16 amostras foi de $2,68 \pm 0,003 \text{ g/cm}^3$. Foram realizadas 3 medições em cada amostra e o valor de densidade para a amostra é a média aritmética das três medições. Com base nos valores obtidos foram realizados os cálculos estatísticos para o desvio padrão (0,00573), coeficiente de variação (0,21346), erro padrão (0,00143), erro amostral (0,00281) e o intervalo de confiança ($2,68 \pm 0,003$). Através do coeficiente de variação de 0,21% verificou-se que os dados são homogêneos e apresentam baixa dispersão. A densidade encontrada de $2,68 \text{ g/cm}^3$ é bem próxima a densidade teórica para a liga A356, onde na literatura encontramos valores entre $2,68 \text{ g/cm}^3$ e $2,70 \text{ g/cm}^3$.

4.2 Composição química

A tabela 1A apresenta o resultado da análise de composição química para as dezesseis amostras. Os valores encontrados na composição química estão dentro do intervalo que caracteriza a liga de alumínio A356, e os resultados obtidos na análise estão de acordo com as exigências da norma SAE J452 [9] (tabela 1B).

4.3 Metalografia

Nas micrografias, figuras 3, observa-se uma microestrutura tipicamente de ligas Al-Si fundidas em molde permanente.

Tabela 1 - Composição química para as 16 amostras (A) e (B) nominal A356 (SAE J452)

AMOSTRA	Si	Fe	Mg	Cu	Ti	Mn	Zn	Ca	Ni	Cr	Pb	Sn	Sr	P	Al	
1	6,8700	0,1090	0,2900	0,0002	0,1160	0,0018	0,0098	0,0014	0,0024	0,0020	0,0059	0,0066	0,0167	0,0053	92,5796	
2	6,8100	0,1120	0,2940	0,0002	0,1120	0,0017	0,0080	0,0032	0,0010	0,0022	0,0039	0,0021	0,0173	0,0049	92,6450	
3	7,3400	0,1230	0,3120	0,0002	0,1100	0,0019	0,0077	0,0016	0,0012	0,0022	0,0043	0,0026	0,0163	0,0049	92,0886	
4	7,3600	0,1250	0,2780	0,0002	0,1060	0,0011	0,0087	0,0012	0,0010	0,0022	0,0043	0,0022	0,0169	0,0049	92,1052	
5	7,3000	0,1180	0,3050	0,0002	0,1110	0,0018	0,0071	0,0015	0,0010	0,0022	0,0042	0,0017	0,0165	0,0047	92,1418	
6	6,9800	0,1100	0,2530	0,0002	0,1170	0,0014	0,0084	0,0014	0,0010	0,0022	0,0037	0,0033	0,0164	0,0048	92,5137	
7	7,1200	0,1220	0,3150	0,0002	0,1100	0,0021	0,0077	0,0011	0,0010	0,0022	0,0043	0,0033	0,0164	0,0049	92,3062	
8	7,1300	0,1220	0,3170	0,0002	0,1110	0,0017	0,0076	0,0010	0,0010	0,0022	0,0044	0,0025	0,0159	0,0049	92,2946	
9	7,4300	0,1240	0,2750	0,0002	0,1070	0,0017	0,0085	0,0012	0,0011	0,0022	0,0037	0,0024	0,0162	0,0048	92,0383	
10	7,2800	0,1160	0,3040	0,0002	0,1100	0,0022	0,0078	0,0011	0,0010	0,0022	0,0041	0,0016	0,0164	0,0049	92,1649	
11	7,2700	0,1160	0,2550	0,0003	0,1040	0,0014	0,0096	0,0010	0,0010	0,0022	0,0031	0,0011	0,0156	0,0050	92,2304	
12	7,5800	0,1170	0,2680	0,0012	0,1020	0,0018	0,0108	0,0009	0,0010	0,0022	0,0031	0,0014	0,0170	0,0050	91,9056	
13	7,4700	0,1200	0,2660	0,0011	0,0979	0,0012	0,0101	0,0011	0,0010	0,0022	0,0028	0,0010	0,0167	0,0050	92,0206	
14	7,4000	0,1120	0,2460	0,0011	0,1080	0,0017	0,0098	0,0012	0,0010	0,0022	0,0024	0,0014	0,0167	0,0048	92,1084	
15	6,8700	0,1110	0,2580	0,0012	0,1090	0,0028	0,0107	0,0010	0,0010	0,0022	0,0028	0,0022	0,0173	0,0048	92,6235	
16	7,2400	0,0903	0,2200	0,0002	0,0972	0,0025	0,0071	0,0006	0,0017	0,0022	0,0026	0,0023	0,0161	0,0046	92,3289	
MÉDIA	7,2156	0,1155	0,2785	0,0004	0,1080	0,0018	0,0087	0,0013	0,0011	0,0022	0,0037	0,0023	0,0165	0,0049	92,2560	
DESVIO PADRÃO	0,2242	0,0082	0,0274	0,0004	0,0054	0,0004	0,0012	0,0006	0,0004	0,0000	0,0009	0,0013	0,0005	0,0001	0,2218	
Elemento	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti	Al								
% em peso	6,5 - 7,5	0,25 - 0,45	0,20 máx.	0,20 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.	0,20 máx.	0,10 máx.	0,20 máx.	Balço						

4.3 Metalografia

Nas micrografias, figuras 3, observa-se uma microestrutura tipicamente de ligas Al-Si fundidas em molde permanente. Uma fase mais clara com morfologia tipicamente dendrítica formada basicamente por Al α e uma região mais escura formada por partículas de morfologia esférica composta pela fase eutética interdendrítica modificada do silício. Nas imagens também são observadas outras partículas de morfologia

mais irregular que provavelmente são precipitados intermetálicos tipo FeMg3Si6Al8 (escrita chinesa) e Fe2Si2Al9 (lâminas). Em Silva [10] foi realizado um estudo para análise de propriedades mecânicas e microestrutura da liga A356 e os mesmos compostos foram observados. Os intermetálicos Fe2Si2Al9 (lâminas) são concentradores de tensão no material, causando fragilidade em ligas de alumínio-silício contendo alto teor de ferro.

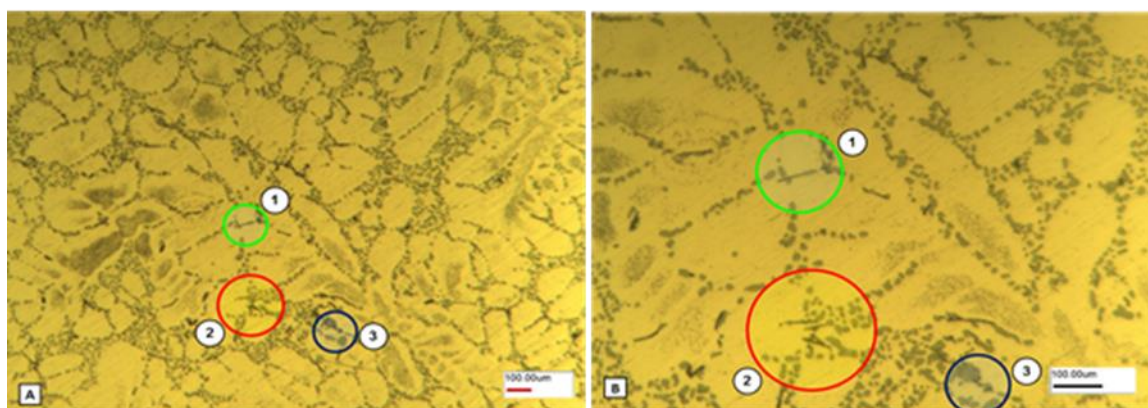


Figura 3 – Micrografias da amostra não envelhecidas - (a) microestrutura apresenta intermetálicos Fe₂Si₂Al₉ (lâminas) em verde (1), FeMg₃Si₆Al₈ (escrita chinesa) em vermelho (2) e silício não modificado em azul (3) com ampliação de 100X e (b) apresenta a mesma microestrutura com ampliação de 200X.

4.4 SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing)

Em ligas de alumínio, as propriedades mecânicas são fortemente influenciadas pelo espaçamento interdendrítico. Em Merlin [11] é relacionado o espaçamento interdendrítico com os valores de energia de impacto, resistência mecânica, escoamento e alongamento, onde observou-se que para uma

microestrutura mais fina (com menor espaçamento interdendrítico) obtém-se valores altos de resistência mecânica. No estudo realizado por Mateso [12] para uma liga de latão, a mesma correlação entre SDAS e resistência a tração foi observada.

Neste estudo não foram observadas variações consideráveis no SDAS das amostras analisadas. Os valores médios encontrados para tempos de

envelhecimento de 0, 180, 360 e 720 minutos foram respectivamente de 29,9µm, 26,7µm, 29,7µm e 29,0µm, com um erro amostral médio de ± 2µm.

4.5 Dureza

Neste estudo optou-se por utilizar o método de dureza Brinell (HB) por este ser o mais utilizado em materiais metálicos, por apresentar uma escala contínua e ser amplamente aceito e padronizado. Para a realização dos ensaios uma esfera de raio 20mm partindo do centro da amostra, foi utilizada como referência para realização das medidas de dureza. Em cada uma das dezesseis amostras foram realizadas 3 medições, e o resultado de cada amostra é a média aritmética das três medições.

Os valores obtidos nos ensaios de dureza para a liga A356 fundida em molde permanente nos estados bruto

Tabela 2 - Valores de dureza, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), erro padrão (EP), erro amostral (EA) e o intervalo de confiança (IC), obtidos através de cálculos estatísticos para as amostras do grupo A, B, C e D.

AMOSTRA	A ₁ (HB)	A ₂ (HB)	A ₃ (HB)	A _x (HB)	MÉDIA	DP	CV	EP	EA	IC
1	66,20	67,50	66,20	66,63	66,46	2,092	3,148	1,046	2,050	66,5 ± 2,0
2	64,90	66,20	61,20	64,10						
3	64,90	62,40	68,80	65,37						
4	68,80	70,20	70,20	69,73						
5	67,50	71,70	68,80	69,33	74,07	2,882	3,891	1,441	2,824	74 ± 2,8
6	70,20	76,30	76,30	74,27						
7	76,30	74,90	76,30	75,83						
8	76,30	77,90	76,30	76,83						
9	76,30	74,70	76,30	75,77	80,40	2,889	3,593	1,445	2,831	80,4 ± 2,8
10	83,00	84,90	79,60	82,50						
11	84,90	84,90	79,60	83,13						
12	83,00	81,30	76,30	80,20						
13	88,70	84,90	88,70	87,43	89,64	1,779	1,984	0,889	1,743	89,6 ± 1,7
14	86,80	97,20	92,80	92,27						
15	88,70	92,80	88,70	90,07						
16	86,80	86,80	92,80	88,80						

A norma SAE J452 [9] apresenta valores de dureza Brinell para ligas alumínio – silício tratadas termicamente entre 65 e 95 HB, para tempos de envelhecimento artificial de seis horas. Neste estudo, todos os valores de dureza obtidos estão de acordo com os valores especificados em norma.

As amostras do grupo A apresentaram os menores valores de dureza dentre os quatro grupos 66,46 HB, devido estas amostras não passarem pelo processo de envelhecimento artificial. No grupo B a média de dureza foi de 74,07 HB, o baixo valor de dureza pode ser explicado pelo tempo reduzido de envelhecimento de apenas 180 minutos. A média de dureza obtida para o grupo C com tempo de envelhecimento de 360 minutos, tempo de tratamento indicado pela norma SAE J452 [9], foi de 80,40 HB. Observa-se que a média de dureza para este grupo está exatamente no centro da margem estabelecida pela norma.

de fusão e tratada termicamente, para os diferentes tempos de envelhecimento, estão conforme os valores estabelecidos pela norma SAE J452 e de acordo com os valores encontrados em Silva [10].

Como nas análises anteriores, os corpos de prova foram divididos em quatro grupos com quatro amostras em cada grupo. As amostras do grupo A (1, 2, 3 e 4), não passaram pelo processo de envelhecimento artificial. O grupo B (5, 6, 7 e 8) as amostras passaram pelo processo de envelhecimento artificial por 180 minutos. No grupo C (9, 10, 11 e 12) as amostras passaram pelo processo de envelhecimento artificial de 360 minutos, e o grupo D (13, 14, 15 e 16) as amostras passaram por 720 minutos de envelhecimento artificial. A tabela 2 apresenta os valores de dureza Brinell para cada amostra.

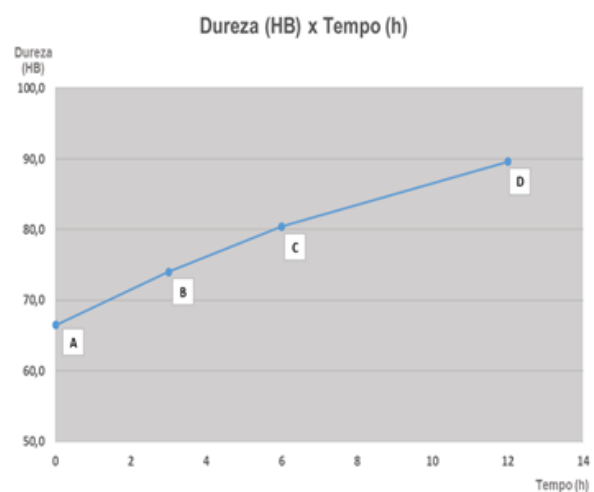


Figura 4 - Gráfico com valores de dureza para as amostras de cada grupo.

As amostras do grupo D apresentaram o maior valor médio de dureza entre todos os grupos 89,64 HB, este valor situa-se próximo do valor máximo de dureza

especificado pela norma SAE J452 [9]. Para o grupo D esperava-se um valor de dureza menor, pois imaginou-se que o tempo de envelhecimento de 720 minutos causaria um superenvelhecimento na liga, o qual seria responsável por uma redução na resistência mecânica do material.

Em Silva [10] observou-se o efeito do superenvelhecimento na liga A356 modificando o parâmetro de temperatura. No entanto, na alteração do parâmetro de tempo para 720 minutos, este fenômeno não foi observado. A figura 4 apresenta um gráfico de dureza em função do tempo de envelhecimento para as amostras dos grupos A, B, C e D.

Ultrassom: Do total de dezesseis amostras doze foram utilizadas nos ensaios de ultrassom, os corpos de prova 1, 5, 9 e 13 foram utilizados para as análises de microestrutura. Como nas análises anteriores os corpos de prova foram divididos em quatro grupos com três amostras cada.

O equipamento utilizado foi o GE Krautkramer USM-36 equipado com transdutor monocristal normal Sonatest SFF4-10 de 4MHz. Utilizou-se uma resina de silicone como fluido acoplante entre transdutor e amostras, e o valor de ganho ajustado fixo para todas as amostras de 44 dB.

4.6 Velocidade ultrassônica

Em geral, a velocidade de ondas sonoras em uma substância comporta-se de maneira que, quanto maior a frequência da onda menor é o seu comprimento, ou seja, essas duas grandezas apresentam uma relação inversamente proporcional. A velocidade ultrassônica em um sólido pode ser dada pela equação (1):

$$V = 2X/t \quad (1)$$

Nesta equação X é a espessura da amostra em teste, e t é o tempo de transmissão da onda ultrassônica. No cálculo de velocidade ultrassônica pelo método pulso-eco a espessura da amostra é um parâmetro de extrema importância, este valor é inserido como parâmetro inicial para realização do teste.

Assim como realizado no processo de análise de dureza, uma esfera de raio de 20mm partindo do centro da amostra, foi utilizada como referência para as medições de velocidade e atenuação ultrassônica, as medidas e a média estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de velocidade ultrassônica, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão, erro amostral e o intervalo de confiança para as amostras do grupo A, B, C e D.

AMOSTRA	A ₁ (m/s)	A ₂ (m/s)	A ₃ (m/s)	A _x (m/s)	MÉDIA	DP	CV	EP	EA	IC
2	6.434	6.423	6.537	6.465	6.490	18,21	0,28	10,51	20,61	6.490 ± 21
3	6.534	6.442	6.544	6.507						
4	6.557	6.533	6.406	6.499						
6	6550	6537	6527	6538	6520	22,42	0,34	12,94	25,37	6.520 ± 25
7	6536	6529	6533	6533						
8	6537	6526	6401	6488						
10	6556	6515	6476	6516	6526	23,41	0,36	13,52	26,49	6.526 ± 26
11	6541	6559	6410	6503						
12	6584	6521	6569	6558						
14	6588	6566	6526	6560	6597	63,75	0,97	36,81	72,14	6.597 ± 72
15	6527	6573	6531	6544						
16	6698	6681	6680	6686						

Na análise dos valores médios de velocidade ultrassônica dos quatro grupos, observa-se que conforme aumenta-se o tempo de envelhecimento artificial ocorre aumento no valor de velocidade ultrassônica, o que sugere que as duas grandezas apresentam um comportamento diretamente proporcional. Uma das possibilidades para explicar este fato é que no processo de envelhecimento artificial ocorre o aparecimento de precipitados, que aumentam seu tamanho e quantidade com o aumento do tempo de tratamento. Esses precipitados possivelmente facilitam o deslocamento da onda ultrassônica através do material reduzindo o tempo de percurso. Em Rosen [7] foram realizados estudos correlacionando dureza com velocidade e atenuação ultrassônica para ligas alumínio – cobre usando três processos de envelhecimento distintos, os resultados

deste estudo apresenta uma correlação positiva até um determinado valor de dureza.

Na análise de microestrutura utilizando microscópio ótico não foi possível visualizar esses precipitados, fato este já constatado por Oliveira [13], em estudo realizado para uma liga de alumínio similar a utilizada neste estudo. Em outros estudos foi possível observar estes precipitados em ligas de alumínio, em Rosen [7] foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) na observação de precipitados formados em uma liga de alumínio – cobre, e em Sajjadi et al. [14] a técnica utilizada foi de microscopia eletrônica de varredura (SEM) na observação de partículas de nano compósitos na liga A356.

Nas análises estatísticas foi observado que os valores médios entre os grupos A, B e C apresentam-se

próximos, com incremento para maiores tempos de processo do grupo A para o C. Isso demonstra que apesar de uma quantidade reduzida de amostras (3 por grupo), as medições não apresentaram grandes variações. No grupo D a variação nos valores de velocidade ultrassônica foi maior, e analisando individualmente as amostras percebeu-se que a amostra dezesseis apresentou valores de velocidade ultrassônica altos quando comparado as outras amostras. Isso ocasionou maiores variações, aumentando o valor do intervalo de confiança quando comparado aos outros três grupos. Em uma análise mais detalhada desta amostra verificou-se uma variação de espessura acima do padrão comparando-o com os demais corpos de prova, e também uma variação acentuada no paralelismo desta amostra.

Dentre os grupos de amostras é possível observar variações nas medidas de velocidade sônica entre amostras do mesmo grupo, que passaram pelo mesmo processo de envelhecimento artificial e também em medições realizadas no mesmo corpo de prova. Estas variações podem ser justificadas pela influência das características do material na propagação de ondas sônicas e tem como possíveis causas o módulo de elasticidade, a densidade, a quantidade das fases e os defeitos presentes no material. Em Fonseca [15] foi feita observação semelhante na análise de corpos cerâmicos.

Outro fator que pode gerar variações nas medidas de velocidade sônica é o processo de produção do corpo de prova. A não uniformidade no paralelismo das paredes das amostras pode levar a variação na espessura do corpo de prova, e como já mencionado anteriormente, isso também pode ocasionar desvios nos valores de velocidade sônica.

Observando-se os valores teóricos de velocidade ultrassônica para o alumínio de 6.350 m/s em Fonseca [15] e comparando-o com os valores encontrados neste estudo de aproximadamente 6.500 m/s, verifica-se um aumento de aproximadamente 150 m/s. Esta diferença pode ser explicada devido ao valor teórico de velocidade ultrassônica apresentado em em Fonseca [15] considerar o alumínio 1100-0 como referência, uma liga 99% de alumínio.

4.7 Atenuação ultrassônica

A atenuação ultrassônica, simplificada, é a diminuição da energia da onda ultrassônica e ocorre basicamente por duas razões, pelas características intrínsecas dos materiais em que se propagam e pelo espalhamento do feixe ultrassônico. Para realização do cálculo do coeficiente de atenuação ultrassônica neste estudo, utilizou-se a seguinte equação (2):

$$A = \left| \frac{\Delta dB_M}{2X} \right| \quad (2)$$

Onde ΔdB_M é a média de três medições da variação entre picos de um eco que é dado em decibel (dB) e X é a espessura do corpo de prova em milímetros (mm). O resultado da equação A é coeficiente médio da atenuação ultrassônica, e sua unidade é decibel por milímetro (dB/mm). Na tabela 4 são apresentados os dados de atenuação:

Tabela 4 - Coeficiente de atenuação ultrassônica, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão, erro amostral e o intervalo de confiança para cada grupo.

AMOSTRA	ΔdB_1	ΔdB_2	ΔdB_3	ΔdB_M	Atenuação média (dB/mm)	MÉDIA	DP	CV	EP	EA	IC
2	-3,10	-4,30	-4,40	-3,93	0,09904	0,1004	0,0044	4,4080	0,0026	0,0050	0,1004 ± 0,005
3	-2,90	-4,30	-4,60	-3,93	0,09583						
4	-3,70	-4,00	-4,20	-3,97	0,10640						
6	-2,70	-3,60	-4,60	-3,63	0,08980	0,0919	0,0024	2,6635	0,0014	0,0028	0,0919 ± 0,003
7	-2,80	-3,90	-4,30	-3,67	0,09058						
8	-4,70	-3,30	-2,80	-3,60	0,09534						
10	-3,90	-4,30	-4,80	-4,33	0,11944	0,1155	0,0056	4,8639	0,0032	0,0064	0,1155 ± 0,006
11	-4,00	-4,00	-4,50	-4,17	0,10755						
12	-5,20	-3,20	-6,00	-4,80	0,11950						
14	-3,30	-4,40	-4,20	-3,97	0,09880	0,1254	0,0274	21,8409	0,0158	0,0310	0,1255 ± 0,031
15	-4,40	-4,40	-5,40	-4,73	0,11441						
16	-6,50	-7,30	-5,60	-6,47	0,16313						

Na análise dos valores de atenuação ultrassônica média, diferentemente do que foi observado nos dados de velocidade ultrassônica, não foi possível observar uma relação entre os valores de atenuação e o tratamento térmico realizado para cada grupo de amostras. As alterações nos tempos de envelhecimento artificial, não ocasionaram aumento ou redução nos valores de atenuação, o que indica um baixo ou inexistente grau de correlação entre estas grandezas. No entanto, observou-

se para a amostra número dezesseis o mesmo fenômeno ocorrido nas medições de velocidade ultrassônica. A amostra apresenta coeficiente de atenuação ultrassônica muito maior que as demais amostras do grupo.

4.8 Comparativo entre dureza e velocidade sônica

Neste estudo foi realizado uma análise de regressão, com o objetivo de buscar a natureza do relacionamento entre valores de dureza e velocidade ultrassônica

encontrados nos corpos de prova. Para análise de correlação entre as amostras foi utilizado o software estatístico Minitab 17, e o método de análise de dados utilizado foi o método de regressão linear.

De acordo com Souza [16] e Rodrigues et al. [17] a análise de regressão compreende avaliar dados amostrais para entender se e como duas ou mais variáveis relacionam-se entre si, tendo como resultado uma equação matemática que descreve o relacionamento entre essas variáveis.

Devido a uma falha no processo de produção da amostra número dezesseis, a qual apresentou uma grande variação nas medições de velocidade e atenuação ultrassônica, decidiu-se excluir os dados da amostra nas análises de correlação no intuito de minimizar a dispersão entre amostras. A Figura 5 apresenta gráfico relacionando os valores de dureza média e velocidade ultrassônica média no material, para cada grupo de amostras.

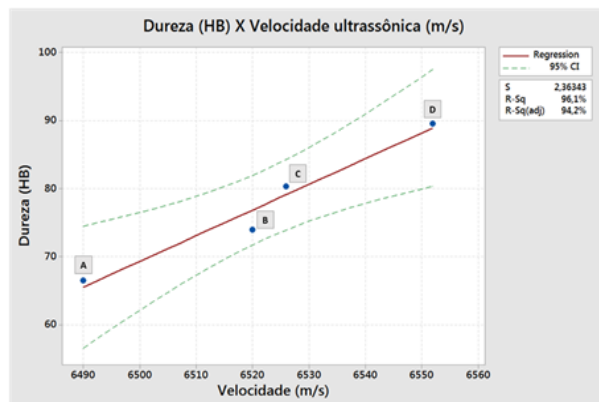


Figura 5 - Correlação entre valores médios de velocidade ultrassônica (m/s) e dureza Brinell (HB) para diferentes tempos de envelhecimento artificial.

No gráfico pode-se verificar uma correlação positiva entre as duas grandezas, indicando que à medida que se observa um aumento de velocidade ultrassônica do grupo A para o D seguido por um aumento de dureza no mesmo sentido.

O coeficiente de determinação (R-Sq), também chamado de R^2 , varia entre 0 e 1 e indica em porcentagem o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra. Nessa análise de correlação obteve-se um R^2 de 96,1% o que indica o sucesso na estimativa de correlação entre as duas variáveis.

R-Sq (adj) ou R quadrado ajustado é uma medida semelhante ao R^2 , mas que ao contrário deste, não aumenta com a inclusão de variáveis independentes não significativas e com pouco poder explicativo, usadas para aumentar o R^2 . Nesta análise de correlação o valor de R-Sq (adj) atingiu 94,2% concordando com o valor de R^2 .

S é o erro padrão da regressão, e indica o grau de dispersão dos erros de previsão dentro da amostra na hipótese de normalidade. Em outras palavras, S é a

variação máxima e mínima que pode ocorrer para o valor obtido. Na análise em questão o valor de S calculado foi de $\pm 2,36343$ HB. Outra variável importante na análise de correlação é o valor-P que está associada ao nível de significância da estimativa. Quanto menor for seu valor, maior é a confiança que se pode ter de que o coeficiente teórico não é igual a zero. Resumidamente para que a correlação possa ser confirmada como verdadeira o valor-P deve ser menor que 0,05, nesta análise o valor-P encontrado foi de 0,02. A equação (3) representa a equação da regressão linear obtida neste estudo, onde H é o valor de dureza e V o valor da velocidade ultrassônica.

$$H = -2384 + 0,3774V, \quad (3)$$

A provável causa da correlação positiva entre dureza e velocidade ultrassônica é que no processo de envelhecimento artificial, a temperatura é suficientemente alta para que ocorra a formação de precipitados, inicialmente coerentes e posteriormente semi-coerentes com a matriz. Estes precipitados semi-coerentes provocam distorções na matriz devido às diferenças de parâmetros de rede, resultando em um campo de tensões que dificultam a movimentação das discordâncias e endurecendo o material.

Nos estudos realizados por Rosen [7] para ligas de alumínio – cobre estes precipitados endurecedores (β') puderam ser visualizados através de imagens de microscopia eletrônica de transmissão (TEM), onde foi constatado que a presença destes precipitados elevou os valores de dureza do material.

Em Martin [18] é descrito que a velocidade sônica muitas vezes pode variar de acordo com o processo de fabricação ou com tratamentos térmicos sofrido pelo material. Neste estudo foi observado que o tempo de envelhecimento artificial provocou um aumento no valor de dureza e velocidade ultrassônica do material, indicando uma associação direta e positiva entre as duas variáveis.

4.9 Comparativo entre dureza e atenuação sônica

Também foi realizado um estudo de análise de regressão, seguindo o mesmo padrão daquele adotado para a análise de dureza e velocidade ultrassônica, para verificar a correlação entre os valores de dureza e atenuação ultrassônica encontrados nos corpos de prova. Seguindo o mesmo princípio, os dados referentes a amostra número dezesseis foram excluídos da análise de regressão linear já que está apresentou variações nas medições de velocidade e atenuação ultrassônica.

Segundo Fonseca [15] a variação do ganho serve para compensar a atenuação sônica e, geralmente, pode ser utilizado na análise de propriedades em materiais como uma grandeza diretamente proporcional à atenuação. Nesse estudo o valor do parâmetro de ganho ajustado foi mantido fixo em 44 dB. A Figura 6 apresenta o gráfico relacionando os valores de dureza média à atenuação ultrassônica média para cada grupo de amostras. Na observação do gráfico verifica-se que

existe pouca ou não existe relação entre as duas variáveis, não apresentando uma tendência positiva ou negativa de atenuação com o aumento de dureza dos corpos de prova.

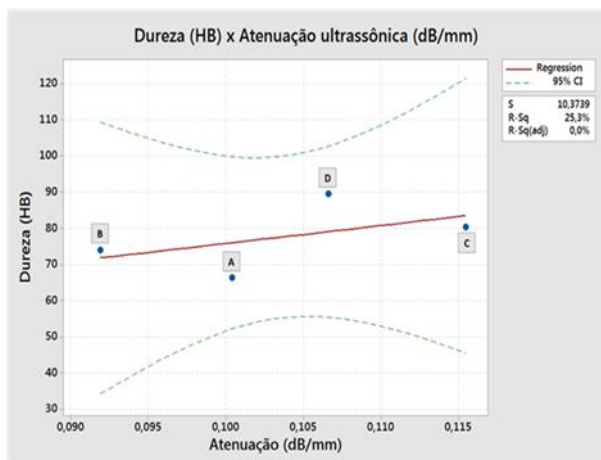


Figura 6 - Correlação entre valores médios de atenuação ultrassônica (dB/mm) e dureza Brinell (HB) para diferentes tempos de envelhecimento artificial.

O coeficiente de determinação (R-Sq) ou R^2 , na análise de correlação entre dureza e atenuação ultrassônica obteve-se um valor de 25,3% e o R-Sq (adj) ou R quadrado ajustado apresentou valor de 0%, indicando que a correlação entre as duas variáveis é nula ou muito baixa. Na análise do valor de S (erro padrão da regressão) calculado foi de $\pm 10,3739$ HB o que indica um alto erro padrão para a análise demonstrando incerteza na correlação. A análise do valor-P de 0,497 demonstra que a correlação não pode ser confirmada como verdadeira, já que este apresentou valor muito acima do ideal que é menor que 0,05.

Contudo, não foi possível através das medidas de atenuação ultrassônica diferenciar as amostras pela variação imposta aos tempos de envelhecimento artificial, conforme pode ser visto no gráfico da figura 6 que correlaciona estas duas grandezas. A expectativa era que os valores de atenuação ultrassônica apresentassem uma relação inversa aos valores de dureza, conforme estudo realizado por Rosen [7], mas neste estudo para a liga A356 este comportamento não foi evidenciado.

5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- O método de medida de dureza por ultrassom é aplicável para prever os valores absolutos de dureza, assim como para a separação de materiais com diferentes tempos de envelhecimento artificial. Os estudos indicam uma correlação direta e positiva entre dureza e velocidade ultrassônica com coeficientes R^2 de 96,1%, R-Sq (adj) de 94,2% e valor-P de 0,02, valores que sugerem uma correlação verdadeira entre as variáveis.

- A determinação indireta de dureza através da atenuação ultrassônica não se mostrou eficaz, uma vez que os valores de R^2 , R-Sq e valor-P na análise de

correlação para estas duas variáveis apresentam que a correlação entre elas é muito baixa ou inexistente.

- A investigação da microestrutura da liga pela técnica de microscopia ótica apresentou limitações técnicas, através das imagens não é possível afirmar com certeza que o aumento de dureza é causado por precipitados tipo (β'). A técnica de microscopia ótica não possibilita a visualização desses precipitados, formados após processo de envelhecimento artificial na liga A356;

- A uniformidade no paralelismo dos corpos de prova é imprescindível para resultados assertivos em análises por ultrassom, seja em velocidade ou atenuação ultrassônica, pois neste estudo foi constatado que a variação no paralelismo da amostra ocasiona variações nos valores medidos. Esse fato foi comprovado na análise e comparação dos valores encontrados na amostra dezesseis (não uniforme) com as demais amostras do estudo.

Referências

- [1] ABAL, Alumínio oferece 29% a mais de potencial de redução de peso que o aço de alta resistência, Revista Aluauto, Rio Grande do Sul, 2º trimestre 2010. Disponível em <http://www.abal.org.br/aluauto/ed23/destaque.htm> [30.04.2016].
- [2] KOOPS, F. A. Caracterização das propriedades mecânicas de tubo composto por ultrassom. 2013, 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [3] BOUDA, G; BENCHALLA, A; ALEM, K. Ultrasonic characterization of materials hardness. Ultrasonics, v. 38, p. 224-227, 2000.
- [4] HSIA, S; CHOU, Y. Assessing the Hardness of Quenched Medium Steel Using an Ultrasonic Nondestructive Method. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2015, p. 1 - 8, 2015.
- [5] UZUN, F; BILGE, A.N. Application of ultrasonic waves in measurement of hardness of welded carbon. Science direct, v. 11, p. 255 - 261, 2015.
- [6] TARIQ, F. et al. Characterization of material properties of 2xxx series Al-alloys by non-destructive testing techniques. Journal of Nondestructive Evaluation, v. 31, p. 17 - 33, 2012.
- [7] ROSEN, M. Correlation between ultrasonic and hardness measurements in aged aluminum alloy 2024. Materials Science and Engineering, v. 74, p. 01-10, 1985.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/IEC 17025: informação e documentação: citações em documentos. Rio de Janeiro. 2005.
- [9] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS INTERNATIONAL. SAE J452: informação e documentação: citações em documentos. São Paulo. 2003.

- [10] SILVA, V. F. Comportamento da liga de alumínio A356-T6 fundida e tixoeextrudada sob fadiga isotérmica e termomecânica. 2004, 177 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Escola de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.
- [11] MERLIN, M. Correlation between microstructural and mechanical properties of aluminium alloy casting produced by different foundry processes. 2008, 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Dottorato Di Ricerca In Scienze Dell'Ingegneria, Università Degli Studi Di Ferrara.
- [12] MATESO, V. Análise da solidificação para projeto de molde e a relação com as propriedades mecânicas na fundição da liga de latão 60/40. 2006, 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [13] OLIVEIRA, G. R. G. Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn. 2012, 59 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- [14] SAJJADI, S. A; EZATPOUR, H. R; PARIZI, M. T. Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Materials and Design*, v. 34, p. 106-111, 2012.
- [15] FONSECA, E. Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço ASTM A36 laminado com o uso de ultra-som. 2005, 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [16] SOUZA, G. S. Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear, 1 ed. EMBRAPA-SPI: Brasília - DF, 1988.
- [17] RODRIGUEZ, R. L; MEDEIROS, F. P; GOMES, A. S. Modelo de Regressão Linear aplicado à previsão de desempenho de estudantes em ambiente de aprendizagem. II Congresso Brasileiro de Informática na Educação, XXIV Simpósio Brasileiro de informática na Educação, 2013.
- [18] MARTIN, C. C. Ultrassom, 2 ed. ABENDI: São Paulo, 2014.
- [19] STANDARD TEST METHOD FOR BRINELL HARDNESS OF METALLIC MATERIALS. ASTM E10: informação e documentação: citações em documentos. Pennsylvania. 2015.