

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE COMBUSTÍVEL DE UM FORNO DO TIPO CADINHO NO DESEMPENHO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM ALUMÍNIO

Rusemildo Alves dos Santos¹, Ramsés Otto Cunha Lima²

Resumo: A fundição de alumínio é um processo amplamente utilizado na indústria, mas sua eficiência e qualidade dependem diretamente do tipo de combustível empregado no forno. Em regiões com acesso limitado à energia elétrica, combustíveis alternativos, como GLP e carvão vegetal, são frequentemente utilizados, porém há escassez de estudos que comparem seu impacto no desempenho do processo e na qualidade das peças. Este trabalho tem como objetivo comparar a influência do GLP e do carvão vegetal em um forno do tipo cadinho para fundição de alumínio em areia verde, avaliando parâmetros como tempo de fusão, incidência de defeitos e propriedades mecânicas das peças. A metodologia incluiu a medição do tempo necessário para atingir a temperatura de fusão do alumínio, inspeção visual das peças para identificar defeitos como porosidade e inclusões, e ensaios de tração para avaliar as propriedades mecânicas. O forno a GLP demonstrou um aquecimento mais rápido, atingindo 800 °C em 15 minutos e fundindo o alumínio em 21 minutos, enquanto o carvão vegetal levou 35 e 37 minutos, respectivamente. As peças fundidas com carvão vegetal (CP 2) apresentaram menor porosidade e maior resistência à tração (137 MPa) em comparação às fundidas com GLP (CP 1), que obtiveram 122 MPa, devido à maior porosidade. Conclui-se que o GLP é mais indicado para processos que exigem controle térmico e aquecimento mais rápido, enquanto o carvão vegetal pode ser uma alternativa viável, desde que sejam mitigados seus impactos negativos, como a geração de fuligem. O estudo reforça a importância de otimizar o processo de fundição para minimizar defeitos e melhorar a qualidade das peças.

Palavras-chave: Defeitos na fundição; GLP; Fundição de alumínio; Forno a carvão.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fundição consiste em utilizar o metal fundido em um molde cuja cavidade apresenta dimensões similares às da peça que se deseja produzir. Ela é um dos processos de fabricação mais antigos, que, embora não haja um consenso definitivo, acredita-se ser conhecido desde 5000 a.C., quando objetos de cobre fundido já eram produzidos utilizando moldes de pedra lascada. Com o avanço da Idade do Bronze, que teve início por volta de 3300 a.C., as técnicas de fundição evoluíram significativamente. A adição de estanho ou arsênio ao cobre resultou em uma nova liga, o bronze, que apresentava maior dureza em comparação ao cobre puro. Isso permitiu a fabricação de armas e armaduras mais resistentes, marcando um avanço tecnológico importante [1]. Ao longo dos séculos, essa técnica evoluiu significativamente, tornando-se essencial para a produção de componentes metálicos com formas, dimensões e propriedades específicas, como resistência mecânica, dureza, condutividade elétrica e resistência à corrosão [2].

A escolha do forno a ser utilizado no processo é de suma importância, não devendo ser baseada apenas na transferência eficiente de calor para a carga. Aspectos como mão de obra, manutenção, combustíveis e energia também devem ser avaliados [3]. Nos últimos anos, o uso de fornos a combustível tem diminuído em relação aos fornos elétricos, devido a problemas como eficiência reduzida, distribuição desigual da chama, oxidação do metal, formação de escamas e emissões poluentes que afetam a fusão, especialmente com combustíveis sólidos, além de riscos à saúde [4].

No entanto, em países em desenvolvimento, na qual há limitações financeiras e de infraestrutura energética, a adoção de fornos elétricos pode não ser viável. Nesses contextos, fornos a combustível continuam a desempenhar um papel crucial em atividades como reciclagem, fundição artesanal, pesquisa e treinamento em instituições de ensino técnico e superior [4]. Diante disso, o estudo e aprimoramento das tecnologias associadas a esses fornos tornam-se essenciais, visando otimizar seu desempenho e reduzir impactos ambientais e operacionais.

O alumínio, por sua vez, é um dos materiais mais relevantes no cenário industrial moderno, combinando leveza (densidade de 2,7 g/cm³) com alta resistência mecânica em suas ligas, superando, em alguns casos, a resistência do aço estrutural, além de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre [5,6]. Essas características tornam o alumínio um material importante em setores como o automotivo, aeroespacial, naval, além de ser amplamente utilizado na fabricação de condutores elétricos, utensílios domésticos e ferramentas portáteis [7].

Dada a sua importância, a fundição de alumínio exige processos eficientes, nos quais a escolha do forno e do combustível adequados pode impactar significativamente a qualidade final do produto.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo da influência do tipo de combustível (GLP e carvão vegetal) no desempenho de um forno do tipo cadinho para a fundição de alumínio. Serão avaliados parâmetros como o tempo necessário para atingir a temperatura de fusão do alumínio, a incidência de defeitos no metal fundido por meio de inspeções visuais, e as propriedades mecânicas das peças produzidas, utilizando ensaios de tração. A justificativa para este estudo reside na necessidade de compreender como diferentes combustíveis afetam a eficiência e a qualidade do processo de fundição, especialmente em regiões onde a disponibilidade de energia elétrica é limitada e o uso de combustíveis alternativos é uma realidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processos de fundição

A fundição é um dos processos de fabricação mais antigos, destacando-se por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos. Sua produção pode ser unitária ou em série, voltada principalmente para as indústrias mecânica e automobilística [7]. A produção de peças fundidas utiliza matérias-primas metálicas, que se dividem em dois grupos principais: as ligas metálicas ferrosas, compostas por ferro e carbono, e as ligas metálicas não ferrosas, que incluem ligas de cobre, alumínio, zinco e magnésio. A maioria das peças produzidas em fundição não é um produto de aplicação final, geralmente necessitando de usinagem e montagem em outras peças para a construção de um produto acabado [8].

As ligas metálicas não ferrosas são aquelas que não contêm ferro em sua composição ou em quantidades insignificantes, não sendo classificadas como ferrosas. Um exemplo são as ligas de alumínio, que, por serem leves e resistentes, são usadas na construção de estruturas de alta resistência, como veículos terrestres, aquáticos e espaciais [5]. Devido à leveza do alumínio em comparação ao ferro fundido, algumas de suas ligas são empregadas na produção de blocos, cabeçotes e carcaças para motores a combustão, reduzindo o consumo de combustível. Além disso, essas ligas são amplamente utilizadas devido a suas excelentes propriedades, como boa resistência à tração, alta ductilidade, excelente resistência à corrosão, usinabilidade facilitada e boa soldabilidade [7]. Vale ressaltar ainda que o alumínio possui excelente condutividade elétrica e térmica, sendo frequentemente escolhido por sua alta relação entre condutividade e peso em comparação ao cobre, com aplicações em motores de alto torque [5].

O processo de fundição envolve uma série de etapas, que podem ser resumidas da seguinte forma: confecção do modelo e do molde, fusão do metal, vazamento no molde, resfriamento e solidificação, desmolde, e finalmente rebarbação e limpeza da peça [3]. Entretanto, diversos parâmetros influenciam o resultado final, como o tipo de molde, as condições de fusão, o método de vazamento e o controle da solidificação, os quais impactam diretamente a qualidade da peça [2].

A fundição em areia é o processo mais utilizado, responsável pela maior parte das peças fundidas produzidas globalmente, sendo a moldagem em areia verde a variante mais comum. Esse método permite a fundição por gravidade de praticamente qualquer metal em diversas dimensões e formas, exceto as mais complexas [2,9]. A moldagem em areia verde consiste na compactação de uma mistura plástica, composta principalmente por areia silicosa, argila aglomerante (geralmente bentonita) e água, em proporções aproximadas de 100 partes de areia, 20 de argila e 4 de água, aplicada sobre um modelo posicionado em uma caixa de moldagem [2].

Na fundição em areia, a cavidade do molde é criada a partir de um modelo, que pode ser feito de madeira, metal, plástico ou outros materiais, reproduzindo a forma da peça desejada [10]. No Brasil, o cedro é a madeira mais usada para modelos, enquanto o alumínio é preferido para produção em série devido à sua leveza e facilidade de usinagem. Durante a confecção do modelo, devem-se considerar a contração do material fundido e incluir sobremetal para usinagem posterior [7,9]. No processo, a areia é compactada ao redor do modelo em duas metades de uma caixa; após a remoção do modelo, o metal líquido é vazado no molde por um sistema de canais, formando a peça [9]. Machos podem ser usados para criar cavidades internas. Em casos de contração significativa, um massalote (reservatório de metal) pode ser necessário para compensar a perda de volume durante a solidificação [10].

A fusão do material é realizada em fornos específicos, alguns adequados para diversas ligas, enquanto outros são especializados para metais específicos [9]. Nessa etapa, o controle rigoroso da composição química é essencial, pois a microestrutura e as propriedades da peça dependem não apenas do processamento, mas também da composição.

Após a fusão, o metal é vazado na cavidade do molde por um sistema de canais, que regula o fluxo do metal líquido e influencia diretamente na qualidade da peça. Para um vazamento adequado, o metal deve ser superaquecido acima de seu ponto de fusão. Por exemplo, o alumínio, com ponto de fusão de 660°C, pode ser vazado a 750°C (90°C acima da fusão) [10]. Um superaquecimento insuficiente pode causar solidificação prematura, enquanto um excessivo pode levar a reações indesejadas entre metal e molde, turbulência no fluxo, erosão do molde, aprisionamento de ar, oxidação do metal e maior solubilidade de gases, resultando em bolhas e porosidades [2].

Durante a solidificação, ocorrem fenômenos como contração volumétrica, cristalização, concentração de impurezas e liberação de gases, críticos para a microestrutura e integridade da peça. Defeitos como segregações, porosidade e trincas térmicas podem surgir devido à contração, exigindo cuidados especiais para garantir as propriedades desejadas do material [9].

2.2. Fornos para fundição

A fusão de materiais no processo de fundição é realizada principalmente por fornos, que transformam energia química ou elétrica em calor para elevar a temperatura dos metais [12]. Existem fornos que conseguem realizar a fusão de uma ampla gama de ligas, e outros são mais indicados para ligas ou um metal específico [9]. Os fornos modernos abrangem fornos elétricos a arco, fornos de indução, fornos de cúpula, reverberatórios e de cadinho [12].

Para o preparo de materiais ferrosos são utilizados geralmente fornos elétricos a arco, cúpulas e fornos de indução, por outro lado, para o preparo de alumínio e suas ligas regularmente se utiliza de fornos reverberatórios e de cadinho [12]. A fusão de metais não ferrosos é amplamente realizada em fornos do tipo cadinho, conhecidos por sua simplicidade e versatilidade, em que esses fornos permitem a fusão de metais como alumínio, bronze, cobre e ligas de zinco, sendo eficazes tanto para produção em pequena escala quanto para processos industriais maiores [4,9].

Esse tipo de forno opera com o aquecimento ocorrendo externamente, transferindo calor para o cadinho que contém o metal a ser fundido. O cadinho, componente essencial desse tipo de forno, é fabricado em materiais refratários que suportam temperaturas elevadas sem comprometer sua integridade estrutural, em que o ponto de fusão do cadinho deve ser superior ao do metal processado, evitando contaminação e perda de material [3]. As temperaturas de trabalho dos fornos cadinho variam de 200 a 1400 °C, com capacidades que podem oscilar entre 10 e 1000 kg, e uma taxa de fusão aproximada de 100 kg/h. Essa faixa de operação permite que os fornos cadinho sejam utilizados em diversas aplicações industriais, desde pequenos ateliês até processos produtivos de maior escala [2].

A seleção do tipo de combustível impacta diretamente no custo operacional, eficiência térmica e emissões ambientais, que são aspectos considerados pelas indústrias, em especial em regiões em desenvolvimento, onde a disponibilidade de combustíveis pode ser limitada [4]. Os combustíveis podem ser classificados como sólidos, líquidos ou gasosos, sendo que os líquidos e gasosos, como o GLP, são mais fáceis de manipular por tubos, ao contrário de carvão ou coque [3]. Os combustíveis utilizados para geração de energia devem ter o poder calorífico como sua principal propriedade, que é a quantidade de calor liberada quando o combustível atinge a combustão completa [13]. Fornos que utilizam GLP são vantajosos para o controle de temperatura, pois possuem reguladores de pressão que permitem ajustar o fluxo de gás [14]. O isolamento térmico é essencial, reduzindo a dissipação de calor e aumentando a eficiência energética, além disso, o tipo de combustível impacta diretamente o tempo de fusão, a qualidade do metal fundido e a segurança operacional [3].

Os fornos cadinho a carvão utilizam do carvão vegetal, que possui grande relevância no cenário mundial, principalmente em países em desenvolvimento, tendo o Brasil como o maior produtor de carvão vegetal, que utiliza 87,1% da sua produção no setor industrial, tendo grande impacto na criação de empregos no setor siderúrgico [15]. O carvão vegetal foi um dos primeiros combustíveis para fornos e pode produzir calor de até aproximadamente 2700°C [12], tendo seu poder calorífico dependendo de qual madeira foi utilizada e do seu processo de carbonização ou pirólise. No estudo feito por [16], o carvão vegetal proveniente da madeira *Cenostigma macrophyllum* Tul (caneleiro) teve como resultado do poder calorífico de 4.845 cal/g, sendo aproximadamente 20280 kJ/kg. Na fundição o carvão vegetal pode ser vantajoso por ter baixo custo como subproduto, porém pode apresentar desvantagens devido ao atraso na queima durante a combustão [4]. Por outro lado, embora os fornos a carvão sejam uma opção economicamente viável, eles apresentam diversas desvantagens do ponto de vista técnico na fundição, uma vez que atingem temperaturas relativamente baixas, oferecem controle limitado do aquecimento e geram uma quantidade significativa de fuligem, que pode causar inclusões no metal fundido, ocasionando defeito [14]. Além disso, é recomendado que o usuário do carvão vegetal permaneça afastado durante os primeiros 15 a 20 minutos após a ignição, pois esse é o período de maiores emissões, o que pode levar à inalação de grande quantidade de fumaça prejudicial à saúde [15].

Já o GLP, que é mais conhecido como “gás de cozinha”, tem como característica ser composto por diversos hidrocarbonetos, principalmente butano e propano, com o seu poder calorífico de aproximadamente 47500 kJ/kg, sendo viável para fundição de metais importantes para engenharia, como alumínio, cobre, ouro, prata, zinco [17]. Para fornos que utilizam GLP, o controlador de vazão é importante para o controle da quantidade de combustível que fará a combustão, pois a temperatura máxima de operação do forno está estritamente relacionada com a relação gás/oxigênio fornecida pelo queimador [6]. No forno cadinho desenvolvido por [14], foi possível atingir a temperatura de fusão do alumínio em todas as misturas, considerando as variações de pressão de injeção analisadas, ressaltando que, ao utilizar a pressão mais alta (25,5 kPa), foi possível atingir a temperatura desejada mais rapidamente e apresentou uma economia considerável de gás, tornando-se mais eficiente para o processo de fundição. Em outro trabalho de forno cadinho desenvolvido por [3], para a fundição de alumínio utilizando GLP como combustível, foi destacado que o GLP se revelou a melhor escolha em termos econômicos, devido à sua acessibilidade e alta potência térmica, isso fica evidente nos testes realizados, nos quais o forno atingiu uma

temperatura de 1215 °C. Entretanto, o GLP é um produto inflamável, mais denso do que o ar e, sendo assim, concentrando-se em áreas baixas quando vazado, representando um risco de incêndio e, por ser um produto asfíxiante, exigindo diversas medidas de segurança em seu manuseio e utilização [18].

2.3 Defeitos do processo de fundição

Para que os produtos provindos de uma fundição tenham êxito, é necessário prevenir os eventuais defeitos que possam acontecer no processo de fabricação das peças metálicas. Estas falhas podem levar à rejeição completa da peça fabricada, o que é economicamente prejudicial. No entanto, algumas imperfeições e falhas em peças fundidas são toleradas, desde que não comprometam sua funcionalidade, dependendo dos requisitos estabelecidos pelo cliente para a aplicação da peça [8]. Grande parte desses defeitos estão relacionados tanto à moldagem da peça, o desprendimento de gases e alimentação.

Os defeitos referentes ao molde no caso da fundição em areia podem ser por conta de uma má preparação, encaixe errado ou pela interação do líquido com a areia do molde. Quando a parte superior e inferior do molde não estão devidamente alinhadas na hora da montagem do molde pode causar um fechamento incorreto, levantamento do molde, folgas entre o molde e os machos, podendo resultar em rebarbas no metal fundido [8]. Em alguns casos é necessário o uso de massalote para compensar a contração térmica durante a solidificação, prevenindo rechupes na peça. Além disso, trincas na face dos moldes pode ocasionar em defeito de veamento perpendicular à face da peça metálica fundida [8].

Existem vários tipos de defeitos na fundição em areia, e que um alto número de defeitos é causado pela emissão de gases e que um dos principais defeitos de fundição causados pelos gases é a porosidade, a porosidade ocorre quando bolsas de ar ou vazios se formam dentro da fundição durante o processo de solidificação, em que esse defeito pode resultar em propriedades mecânicas enfraquecidas e integridade estrutural reduzida [19,20]. O estudo [8] complementa, afirmando que os defeitos de porosidade, que são cavidades internas na peça fundida, podem estar relacionados a uma variedade de fatores, incluindo materiais do molde, temperatura da fundição, turbulência durante a fundição, à solubilidade de gases como o Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio no banho metálico. Outro fator que contribui para a porosidade é a temperatura de fundição, já que o metal pode não fluir de maneira eficiente se a temperatura for muito baixa, o que pode levar ao aprisionamento de gases. Entretanto, se a temperatura for muito alta, pode causar a liberação de gás do material do molde, causando porosidade no metal fundido [19]. Deste modo, é necessário regular a temperatura de vazamento e a taxa de fluxo também.

A concentração de impurezas na fundição refere-se à presença de elementos ou compostos indesejados na composição do metal, que se solidificam juntamente com ele, podendo causar defeitos de inclusões, além de alterar suas propriedades mecânicas. O comportamento das impurezas varia conforme o estado físico da liga, em que no estado líquido, as impurezas permanecem dissolvidas e distribuídas de maneira homogênea e durante a solidificação a solubilidade dessas impurezas diminui, concentrando-se nas regiões onde a solidificação ocorre por último [7]. Inclusões são materiais estranhos ou impurezas que se tornam incorporados na fundição, em que esse defeito pode resultar em propriedades mecânicas enfraquecidas e qualidade reduzida do produto [20]. Tendo isso em vista, a utilização de combustíveis que podem gerar cinzas e partículas que, se não forem devidamente controladas, podem se incorporar ao metal fundido podem ocasionar defeitos na fundição. Consequentemente, a qualidade da peça fundida é influenciada tanto pela qualidade do material quanto pelo tipo de combustível utilizado, uma vez que estes podem resultar em impurezas e inclusões no metal, levando a falhas, como porosidade ou rachaduras [19].

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais e equipamentos

O metal utilizado para a fundição consistiu na utilização de tarugo de duas polegadas de alumínio da liga 6351-T6, em que sua composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química da liga de alumínio 6351

Elemento	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Outros
(%) Comp.	97,35	1	0,6	0,4	0,1	0,45	0,1

Por ter passado por um tratamento T6 suas propriedades foram melhoradas, a qual possui ótima usinabilidade, alta resistência mecânica, boa conformabilidade e alta resistência à corrosão, com limite de resistência à tração de 300 MPa, limite de escoamento de 260 MPa, dureza de 95 HB e ponto de fusão entre 580 e 650 °C [21].

O alumínio utilizado para o experimento foi cortado em forma de disco de aproximadamente 15 mm de espessura, para facilitar a fusão do material dentro do cadinho. Para isso, foi utilizada uma serra de fita da marca Starrett, buscando obter discos com a mesma espessura. Como resultado, foram obtidas 16 discos, das quais metade foi utilizada em cada fundição.

Para as medições foram utilizados um cronômetro e um termômetro digital infravermelho da Minipa, modelo

MT-350A, com alcance de temperatura de -50 a 800 °C, da mesma maneira que foi feito no trabalho [22], na qual, o termômetro foi ajustado para a emissividade referente ao alumínio (0,45), que é a capacidade de um material de emitir energia infravermelha [23].

O modelo utilizado para a moldagem foi um corpo de prova cilíndrico de alumínio, com comprimento útil de 80 mm, diâmetro útil de 12 mm e comprimento total de 199 mm, usado para criar a cavidade dentro do molde, conforme representado na Figura 1.

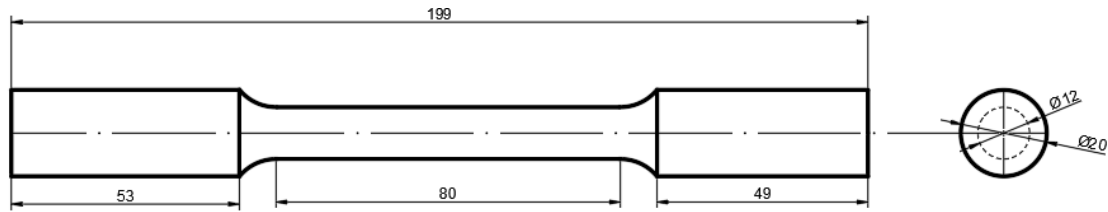


Figura 1. Representação do modelo (Autoria própria)

Os materiais utilizados para a moldagem foram duas caixas com dimensões iguais de 220 mm de largura e 350 mm de profundidade para a disposição da areia. A Figura 2 representa o design da caixa de moldagem.

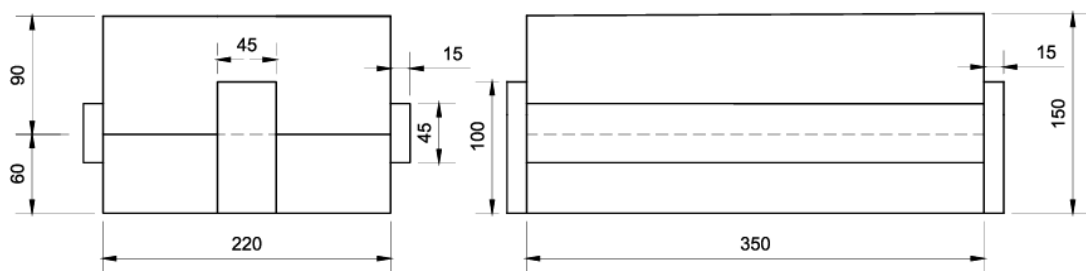


Figura 2. Representação da caixa de moldagem (Autoria própria)

As caixas foram produzidas em madeira, visando praticidade e redução de custos em comparação com moldes metálicos, com dimensões aproximadas conforme [3]. Elas são divididas em caixa inferior e superior, sendo a inferior com altura de 60 mm e a superior mais alta, com altura de 90 mm, para acomodar o canal de vazamento e o massalote. Além disso, foi adicionado um sistema de encaixe entre as caixas, nas laterais, frontal e traseira, para evitar descon continuidades e defeitos na montagem após a remoção do modelo do molde.

3.2 Moldagem

3.2.1 Confeção do alimentador

Para a confecção do massalote, foi utilizado o estudo [24] como base, no qual o alimentador foi projetado para ser atmosférico e de geometria cilíndrica, no qual o volume mínimo do alimentador foi calculado a partir da Equação 1.

$$V_{\text{alimentador}} = V_{\text{peça}} \times \frac{\beta}{\mu - \beta} \quad (1)$$

Na qual, $V_{\text{peça}}$ é o volume da peça que vai ser fundida em mm^3 , β representa a contração volumétrica da liga após arrefecimento e μ é o rendimento da geometria do alimentador ambos em %. Deste modo, foi calculado o volume da peça a ser fundida com a Equação 1, e utilizado os dados de β e μ fornecidos por [24], na qual foram utilizados a contração volumétrica do alumínio (β) é de 6,5% e um rendimento do alimentador pequeno cilíndrico (μ) de 14% e o volume da peça foi calculado utilizando a massa e a densidade, resultando em aproximadamente 45037,04 mm^3 . O resultado mostrou que um alimentador com volume de 39032,10 mm^3 seria suficiente para prevenir defeitos de rechupe na peça.

Para a construção do canal de descida e do alimentador, foram utilizados tubos de PVC com diâmetro de 33 mm, conforme [10]. A altura do massalote cilíndrico foi calculada com base no volume necessário, resultando em aproximadamente 45,63 mm, mas optou-se por uma altura de 50 mm para garantir que o canal de descida não fosse muito curto, evitando turbulência no metal líquido e defeitos como inclusões de areia ou porosidade, conforme [7]. O massalote foi posicionado no lado oposto ao canal de vazamento, assegurando que o metal solidificasse por último no alimentador, prevenindo rechupe.

3.2.2 Preparo da areia

Para a preparação da areia verde, utilizou-se uma mistura de areia refratária, argila e água. A proporção utilizada foi, aproximadamente, a cada 100 g de areia, foram adicionadas 20 g de argila e 4 g de água [2,4]. Com o objetivo de manter a forma do molde e garantir êxito na fundição sem defeitos na moldagem [10].

Primeiramente, foi necessário realizar um tratamento na areia refratária antes de misturá-la com a argila e a água. Logo após, a areia foi peneirada utilizando uma peneira de mesh 60 para remover impurezas e eliminar resíduos ou materiais indesejáveis que poderiam comprometer a uniformidade do molde. Esse procedimento é fundamental para melhorar a compactação e diminuir defeitos, como a presença de impurezas ou grãos grandes, que poderiam causar irregularidades na superfície do metal fundido, como rugosidades e porosidade.

Em seguida, preparou-se a mistura de areia verde para os dois moldes, sendo o processo composto pela mistura inicial da areia com a argila até que estivessem completamente incorporadas. Posteriormente, a água foi adicionada aos poucos com um borrifador, enquanto o aglomerado era misturado até atingir a umidade necessária para a compactação.

3.2.3 Moldagem em areia verde

O processo de moldagem iniciou-se com a colocação da areia na caixa-fundo de madeira, que foi compactada manualmente com um compactador manual de madeira até a altura da caixa-fundo. Antes de colocar o modelo, a areia foi peneirada novamente antes de ser colocada na superfície que ia ficar em contato com o modelo, com o intuito de diminuir possíveis defeitos relacionados à inclusão de areia na peça e melhorar o acabamento na cavidade do molde. Em seguida, foi adicionado em torno de 3 g de talco como desmoldante, para facilitar a separação das caixas e para a retirada do modelo posteriormente, da mesma maneira em foi feito nos trabalhos de fundição em alumínio [3,10,25]. Após isso, posicionou-se metade do modelo na caixa inferior para formar a primeira metade da cavidade, na qual foi compactado no molde. Após a conclusão do molde inferior, iniciou-se a preparação do molde superior. A caixa superior foi posicionada sobre a inferior e, em seguida, foram colocados os tubos para os canais de descida e massalote. Na etapa seguinte, foi adicionado o talco na parte superior do modelo e, depois, a areia peneirada novamente foi colocada no molde-tampa por cima do modelo e compactada manualmente para formar a outra metade da cavidade, seguindo o mesmo procedimento da caixa-fundo. Após a compactação, os canos utilizados para criar o canal de descida e massalote foram retirados, as caixas foram abertas para a retirada do modelo e foram feitos os canais que ligam a peça ao alimentador e ao canal de vazamento. Por fim, as caixas foram remontadas, deixando os moldes com as cavidades internas prontas para receberem o metal derretido.

3.3 Fundição do alumínio

Para realizar a fusão do alumínio para ambos os fornos, inicialmente foi preparado o local de trabalho, organizando e limpando o ambiente. Essa etapa teve como objetivo reduzir eventuais inclusões de materiais estranhos ou impurezas que poderiam ser incorporadas durante a fundição e que não estariam relacionadas ao tipo de combustível utilizado.

Para a fundição utilizando GLP como combustível, inicialmente, o forno foi preparado com uma inspeção prévia ao processo. Essa inspeção consistiu na verificação do forno, garantindo que as mangueiras e tubulações de gás estivessem corretamente conectadas e em bom estado, a fim de evitar vazamentos de gás durante a fundição. Em seguida, deu-se início ao processo de fundição, abrindo-se cuidadosamente as válvulas para regular a pressão de injeção e ajustar o fluxo de gás. A válvula do botijão foi aberta em meia volta (1/2) e a do queimador em um quarto de volta (1/4). Após o acionamento da chama, o cadinho foi posicionado no centro do forno.

Para a fundição utilizando carvão vegetal como combustível, inicialmente foi preparado o forno, retirando-se o carvão antigo e verificando as condições do equipamento. Em seguida, foi colocado o novo carvão, e deu-se início ao processo de fundição, acendendo o carvão e monitorando a chama para assegurar uma distribuição uniforme do calor. No experimento, foi utilizado um soprador de ar com uma vazão aproximada de 90,7 m³/h, conectado a um tubo de aço SAE 1020, com dimensões de duas polegadas de diâmetro e 700 mm de comprimento, com o intuito de fornecer circulação de ar para otimizar o processo. Após o carvão estar completamente aceso, o cadinho foi posicionado no centro do forno. Aos poucos, foi necessário adicionar mais carvão, totalizando aproximadamente 4 kg de carvão vegetal.

Em ambas as fundições, os pedaços de alumínio foram cuidadosamente colocados no cadinho com o auxílio de uma tenaz, adicionando-os um de cada vez. Cada pedaço foi posicionado de modo a maximizar a área de contato com o cadinho, utilizando a face com diâmetro de duas polegadas, o que facilitou a transferência de calor do cadinho para o alumínio, em que um novo pedaço de alumínio só era adicionado após a fusão completa do pedaço anterior já presente no cadinho. Com a ajuda de um rodo de escória, foram retiradas as impurezas durante o processo.

As medições de temperatura foram realizadas em um intervalo de 5 minutos em ambas as fundições, com a distância focal utilizada de aproximadamente 350 mm do alumínio que estava sendo fundido dentro do cadinho. Esta distância focal utilizada foi por conta que o termômetro poderia ser danificado em distâncias menores, por conta da elevada temperatura dos fornos.

Após a fusão completa dos oito pedaços de alumínio, o cadinho foi removido com luvas térmicas, e o alumínio fundido foi vertido cuidadosamente no molde de areia para evitar fluxo excessivo, que poderia causar defeitos como porosidade [26]. Após a solidificação realizou-se o desmolde, com a peça fria foi feita a remoção dos canais e feita a rebarbação. Por fim, foi realizado um controle de qualidade com inspeção visual para detectar defeitos visíveis e ensaios de tração em corpos de prova para comparar as propriedades mecânicas dos fundidos.

3.3 Ensaio de tração

Para os ensaios de tração, foi utilizada uma Máquina de Ensaios Universal EMIC CCE 100kN, N° de Série: 9544, com célula de carga de 100 kN e controle computadorizado. Com o auxílio de um paquímetro da marca Mitutoyo, com resolução de 0,05 mm, em que foi utilizado para serem feitas as medições para o cálculo da área útil inicial antes do ensaio. No equipamento de teste, os corpos de provas foram fixados nas garras de suporte, em que ambos os corpos de provas nos ensaios estavam em temperatura ambiente. Em seguida, foram adicionados os parâmetros para iniciar o processo de tração. O processo começa com a aplicação de uma carga, que deforma o CP a uma velocidade constante, previamente estabelecida, em que a velocidade utilizada foi de 3 mm/ minuto em ambos os ensaios, mesma velocidade utilizada no estudo [27]. Ao final, o sistema registra informações como tempo (s), deslocamento (mm), força (N). Com os dados obtidos, foram tratados e gerados as curvas tensão deformação e para serem feitas as análises. Os fundidos foram nomeados como CP 1 e CP 2, em que CP 1 refere-se ao fundido com GLP como alimentador, e CP 2 refere-se ao fundido com carvão como alimentador, com o intuito de facilitar a identificação e análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados nos experimentos realizados, seguidos das discussões e análises correspondentes. Ele oferece uma visão geral dos principais aspectos do projeto, com base nos resultados das fundições e nas análises realizadas. Na figura 3 mostra as caixas utilizadas na moldagem após a confecção.

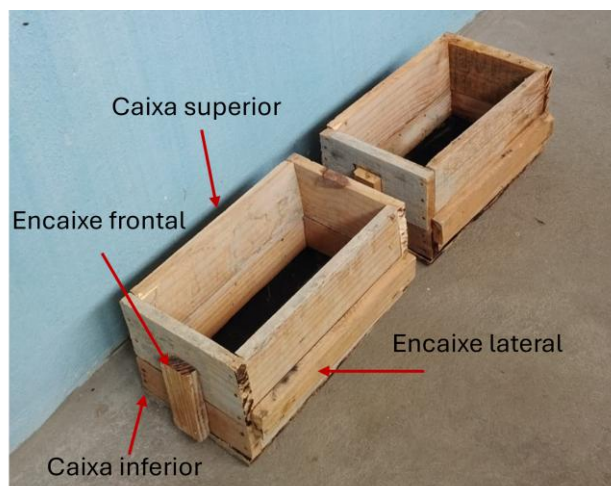


Figura 3. Caixas de madeira para moldagem confeccionadas (Autoria própria)

As caixas alcançaram as dimensões projetadas, e a madeira proporcionou a rigidez necessária, demonstrando-se capaz de suportar tanto o processo de compactação da areia durante a moldagem quanto a pressão e o calor do metal líquido durante o vazamento. O sistema de encaixe mostrou-se eficiente, pois não houve deslocamento durante a remontagem das caixas nem durante o vazamento do metal. A Figura 4 apresenta os dois moldes após o vazamento.

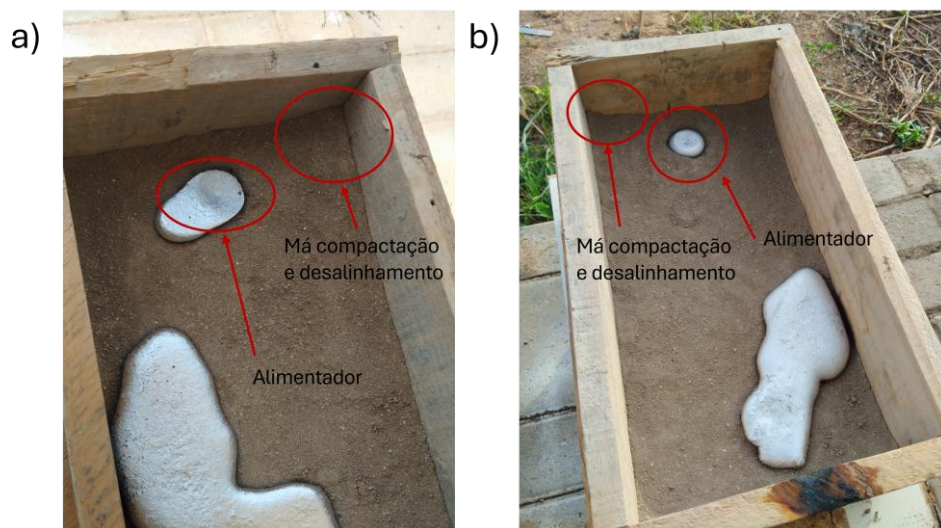


Figura 4. Moldes após o vazamento a) molde do CP 1 b) molde do CP 2 (Autoria própria)

A Figura 4a) mostra o molde da fundição utilizando GLP como combustível. Já na Figura 4b) está representando o molde que teve a peça fundida utilizando carvão vegetal. A altura projetada da caixa superior ficou maior do que o necessário para a fundição deste corpo de prova. Por conta disso, não foi utilizado todo o comprimento, o que atrapalhou a moldagem, ocasionando uma má compactação e um desalinhamento da areia na altura correta. Além disso, as caixas ficaram com uma pequena folga quando remontadas em ambas as fundições, o que resultou em rebarbas nas peças fundidas e em um aumento no diâmetro dos corpos de prova de 0,2 mm.

De qualquer forma, o molde foi eficaz em preencher toda a cavidade do molde. Além disso os alimentadores funcionaram com sucesso em ambas as fundições. Isso fica evidente, pois, em ambos os alimentadores, a contração ocorreu em sua região, prevenindo defeitos de rechupe que poderiam surgir na peça, efeito ainda mais intensificado no molde da Figura 4a). Na Figura 5 mostra os corpos de provas após a rebarbação e limpeza.

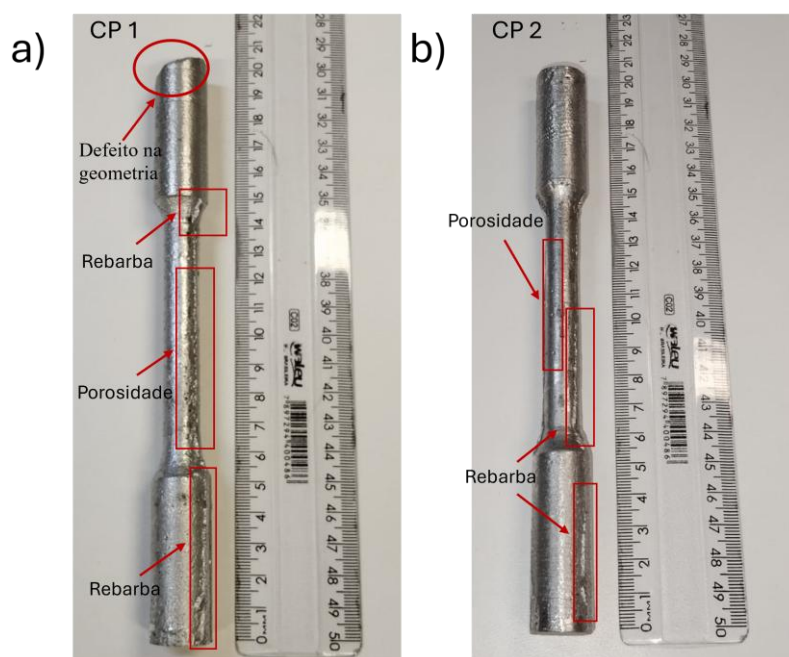


Figura 5. Corpos de prova fundidos após rebarbação a) CP 1 b) CP 2. (Autoria própria)

Na Figura 5a) está representada o corpo de prova fundido com GLP após a retirada dos canais, rebarbação e usinagem. Já na Figura 5b) mostra o corpo de prova fundido com carvão vegetal após a retirada dos canais, rebarbação e usinagem. Ambas as peças apresentaram uma considerável quantidade de porosidades e rebarbas, além de inclusões de areia, principalmente no CP 1, que exibiu maior porosidade fator muito associado à presença de areia na superfície, causada pela má compactação. Além disso, o CP 1 apresentou uma irregularidade na geometria em sua parte superior, provavelmente ocasionada pela erosão do molde naquela região devido a um fluxo excessivo durante o vazamento, situação em que a compactação não foi efetiva. O mesmo ocorreu no estudo [3], porém em maior quantidade, no qual houve um desprendimento significativo da areia do molde, fazendo com que a superfície do fundido ficasse com grãos de areia, defeito semelhante a inclusões exógenas, que pode ter

acontecido devido à má compactação.

No CP 2, foi visível a inclusão de partículas de carvão durante o processo de fusão, como já era esperado, uma vez que o estudo [14] comenta que a queima do carvão libera uma quantidade significativa de fuligem. Entretanto, isso não é perceptível na superfície do CP 2 após a fundição com carvão vegetal.

Os resultados dos dados obtidos da variação de temperatura em função do tempo para os fornos a GLP e carvão são apresentados no Figura 6.

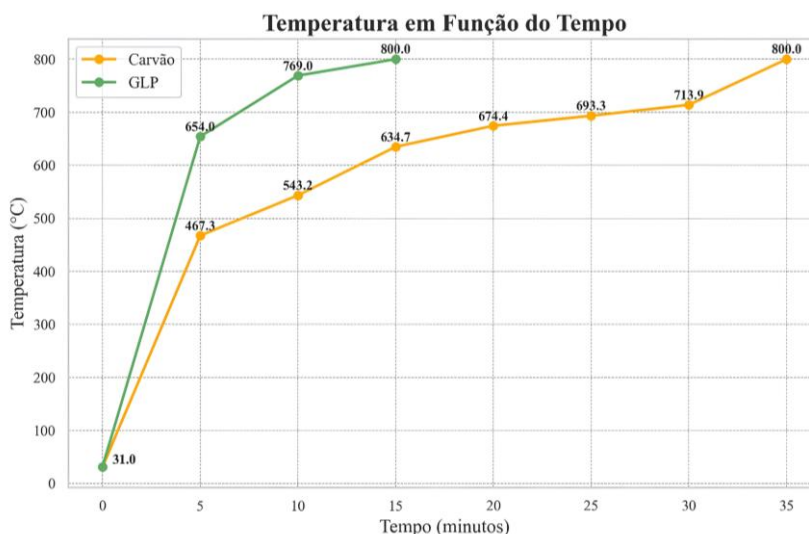


Figura 6. Monitoramento de temperatura dos fornos (Autoria própria)

A partir da curva apresentada na Figura 6, é evidente que o forno a GLP atingiu temperaturas elevadas de forma mais rápida, aquecendo de maneira mais significativa e chegando a cerca de 800 °C em apenas 15 minutos. Já o forno a carvão apresenta um aquecimento mais gradual, atingindo a mesma temperatura somente após 35 minutos. Por conta disso, o primeiro pedaço de alumínio totalmente fundido no forno a GLP ocorreu aos 21 minutos, enquanto, no forno a carvão, o tempo necessário foi de 37 minutos.

Na fundição utilizando alimentado por gás GLP, foi medido uma temperatura de 769,4 °C aos 10 minutos, com a temperatura sendo medida por um termômetro infravermelho. No estudo [22], foi alcançada uma temperatura de 830 °C em 10 minutos, em seu forno de cadinho na fundição de alumínio, também utilizando um termômetro infravermelho como medidor de temperatura. Já o forno de cadinho desenvolvido por [3] atingiu 750 °C em cerca de 10 minutos e 35 segundos, utilizando um termopar posicionado junto ao alumínio no forno, o que garantiu maior exatidão.

A fundição utilizando forno alimentado por carvão vegetal, foi atingida uma temperatura de 543,2 °C em 10 minutos, chegando a 634,3 °C em 15 minutos. Uma temperatura próxima da alcançada nesse intervalo de tempo foi observada no forno de cadinho construído por [28], que utiliza carvão como combustível. Esse forno alcançou uma temperatura de 519 °C aos 12 minutos, chegando a 661 °C em 15 minutos, utilizando um termopar para as medições.

Problemas relacionados ao controle de temperatura em fornos de cadinho que utilizam carvão como combustível ficam bastante evidentes, como atraso na queima, variações de temperatura e dificuldade em controlar com precisão a fusão do metal. Em que é prejudicial para atingir a temperatura desejada nesse processo. A utilização de um soprador contribuiu para uma combustão mais eficiente e um maior controle sobre a temperatura do forno, ajudando a mantê-la estável ao fornecer oxigênio contínuo e controlado. Caso contrário, a falta de um soprador poderia impedir que o forno atingisse a temperatura de fusão do alumínio, já que, sem um soprador, a queima pode ser incompleta ou insuficiente, resultando em uma geração de calor abaixo do necessário para atingir a temperatura de fusão e de vazamento.

Já o forno de cadinho alimentado por GLP conseguiu alcançar uma boa curva de temperatura, atingindo altas temperaturas em pouco tempo de ignição, sem a necessidade de utilizar pressões mais altas de injeção. A temperatura poderia ser facilmente ajustada conforme a necessidade de aumento ou diminuição, uma vez que a pressão de injeção está interligada à temperatura atingida pelo forno [14].

De qualquer forma, devem ser considerados outros parâmetros para a análise entre fornos com diferentes combustíveis. Fatores como isolamento térmico, geometria da câmara de combustão, sistema de sopro de ar e a qualidade do combustível utilizado podem influenciar significativamente o desempenho. Isso fica evidente no artigo [27], em que o forno de cadinho a carvão otimizado conseguiu fundir 2 kg de alumínio em apenas 18 minutos, na qual houve uma curva de temperatura expressiva, alcançando uma temperatura máxima de 1388°C.

Na figura 7, mostra os corpos de provas após o ensaio de tração.

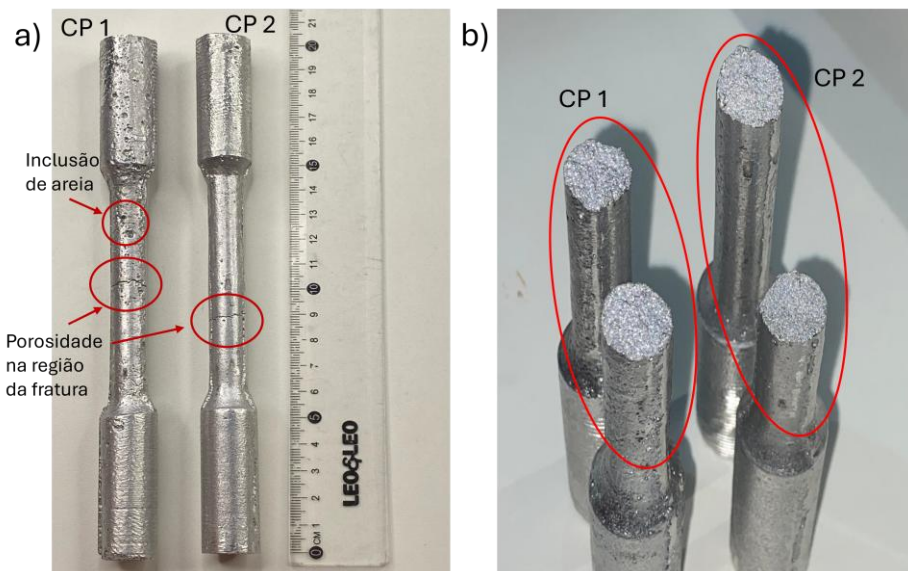


Figura 7. Corpos de prova após ensaios de fratura a) vista geral dos CPs fraturados b) detalhe da superfície de fratura (Autoria própria)

Na Figura 7a) observam-se os corpos de prova fraturados, em que o CP 1 está à esquerda e o CP 2 está à direita, destacando-se o local da fratura. A Figura 7b) mostra a superfície da fratura, na qual é visível uma aparência macroscópica brilhante em ambos os corpos de prova, principalmente no CP 1, representado à esquerda. O CP 1 teve maior inclusão de areia na superfície, formando porosidades que geraram concentrações de tensões, enfraquecendo suas propriedades, como resistência e ductilidade. Como consequência, observa-se uma redução na capacidade dos corpos de prova de se deformarem plasticamente antes da fratura, tornando-os mais suscetíveis à propagação rápida de trincas sob carregamento. Esse comportamento pode ser identificado em ambos os corpos de prova, uma vez que não apresentam deformação aparente nem estricção na seção transversal. Além disso, a ruptura ocorreu de forma repentina, com a trinca se propagando aproximadamente perpendicularmente à direção da carga aplicada, e a superfície da fratura apresentou aspecto brilhante, principalmente no CP 1, o que caracteriza uma fratura frágil. Esse comportamento não era esperado, já que o alumínio é um material de alta ductilidade.

Na Figura 8 está representando a curva tensão x deformação para os dois corpos de provas obtidas a partir dos ensaios de tração.

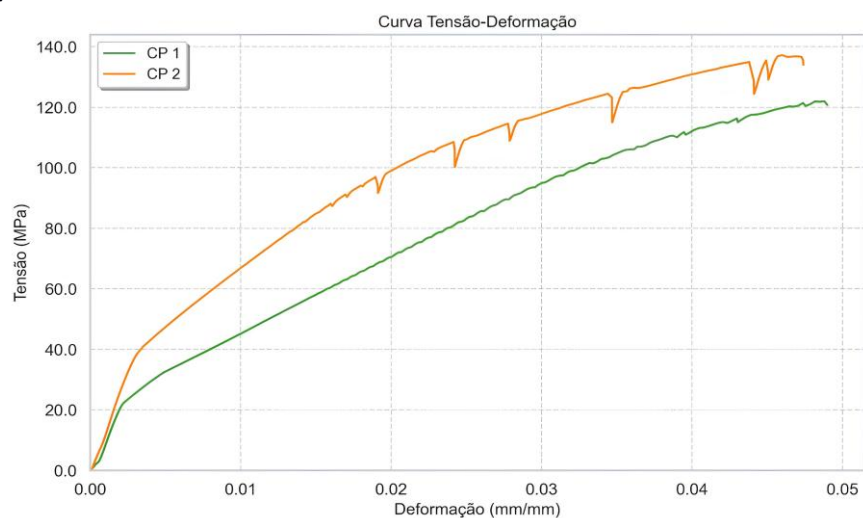


Figura 8. Curvas tensão x deformação (Autoria própria)

Os dados das curvas mostrados na Figura 8 apresentam a relação entre a tensão aplicada em MPa e a deformação resultante para dois corpos de prova de alumínio fundido. A partir desses dados, podem ser obtidos valores para as propriedades mecânicas de ambos os corpos de prova. O CP 1 atingiu uma tensão máxima de tração de 122 MPa e uma tensão de ruptura de 121 MPa, enquanto o CP 2 atingiu uma tensão máxima de tração de 137 MPa e uma tensão de ruptura de 136 MPa. Em ambas as curvas, observou-se uma pequena redução de tensão seguida de fratura.

Os resultados mostram que o Limite de Resistência à Tração de ambos os corpos de prova analisados no presente estudo ficou bem abaixo do valor esperado. Isso ocorre devido aos defeitos relacionados ao processo de fundição, como porosidade e inclusões, que atuam como pontos de concentração de tensão, reduzindo a resistência

mecânica, a ductilidade. Além desses defeitos também facilitarem a propagação de trincas, comprometendo a integridade estrutural e a durabilidade do material. Comparando com artigos que utilizaram alumínio fundido em ensaios de tração, fica evidente a influência dos defeitos nas propriedades do alumínio.

Tendo em vista que, no artigo [29], que utilizou molde metálico e fundiu o alumínio em forno elétrico, obteve como resultado uma Tensão de Ruptura média de 137 MPa em 5 corpos de prova diferentes. Resultado parecido com os valores encontrados neste estudo, apesar da utilização de forno elétrico e molde metálico, que poderia ajudar na obtenção de resultados melhores, destacando a influência do tamanho dos poros na perda das propriedades mecânicas, além da importância da desgaseificação do metal para prevenir a porosidade.

É corroborada pelo artigo [30], que realizou ensaios de tração em alumínio fundido e obteve como resultado uma tensão de resistência à tração e uma tensão de ruptura de apenas 189 MPa, devido a problemas no alumínio relacionados à porosidade e ao fenômeno de microconstituintes. Além disso, no artigo [31], em que foram feitos 9 ensaios de tração em corpos de prova de alumínio fundido, utilizando forno de cadinho a carvão como combustível e moldagem em areia verde, obteve-se o valor do Limite de Resistência à Tração médio de $118,55 \pm 5,82$ MPa. Nesse estudo, justifica-se os resultados obtidos pelas impurezas adquiridas no processo de fundição utilizando carvão como combustível e por não passar por nenhum processo de tratamento térmico após a fundição.

O CP 1, que utilizou forno a GLP para a fundição, apresentou todas as propriedades mecânicas reduzidas em relação ao CP 2. Apesar de o CP 2 sofrer com o problema de inclusão de carbono relacionado à fuligem proveniente da combustão do carvão vegetal, ele apresentou bem menos porosidade em comparação ao CP 1, no qual parece ter uma maior influência na perda das propriedades mecânicas do alumínio.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que o forno a GLP demonstrou maior curva de temperatura, atingindo 800 °C em 15 minutos e fundindo completamente o primeiro disco de alumínio em 21 minutos, enquanto o carvão vegetal levou 35 minutos para alcançar a mesma temperatura e 37 minutos para a fusão. O termômetro utilizado, no entanto, apresentou limitações, registrando temperaturas superiores às reais devido à distância focal de 350 mm e à interferência do calor ao redor do cadinho. Apesar disso, as medições serviram como base comparativa entre os combustíveis e com outros estudos.

O GLP proporcionou maior controle de temperatura e menor geração de resíduos, mas a peça fundida com ele (CP 1) apresentou maior porosidade e inclusão de areia. Já o carvão vegetal, embora gerasse fuligem, produziu um fundido (CP 2) com menor porosidade. Nos ensaios de tração, o CP 2 (carvão) apresentou resistência à tração de 137 MPa, superior aos 122 MPa do CP 1 (GLP). Ambos os corpos de prova tiveram desempenho abaixo do esperado para o alumínio, devido a defeitos como porosidade e inclusões, que levaram a fraturas frágeis. Esperava-se que o CP 1 tivesse melhores propriedades mecânicas em comparação ao CP 2, já que a fuligem do carvão poderia prejudicar o material. No entanto, a porosidade no CP 1 mostrou-se um fator mais determinante nos resultados. Para conclusões mais robustas, são necessários mais testes e análises estatísticas.

Concluiu-se que o GLP é mais indicado para processos que exigem uma fundição mais rápida e controle térmico, enquanto o carvão vegetal pode ser uma alternativa econômica, desde que sejam adotadas medidas para mitigar seus impactos negativos, como a geração de fuligem e a menor precisão no controle de temperatura. A qualidade das peças fundidas também depende de fatores como a compactação do molde e a desgaseificação do metal, reforçando a necessidade de otimização do processo para minimizar defeitos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor de. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. BNDES Setorial, n. 34, mar. 2011, p. 121-162, 2011.
- [2] KIMINAMI, Claudio Shyinti. Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2020. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 16 ago. 2025.
- [3] FERRARI, Guilherme Costa Sentinger. Fabricação de forno tipo cadinho para reciclagem de alumínio através de fundição por areia verde. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2024.
- [4] TAIWO, Oluwaseyi O. et al. A Review on Design and Fabrication of Fuel Fired Crucible Furnace. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, v. 18, n. 3, p. 48-58, 2024.
- [5] DAVIS, J. R. Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, 1994.
- [6] PERATELLO, R. Construção de um forno do tipo cadinho para fusão de ligas de alumínio. p18. Projeto de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- [7] TÂMEGA, Fábio. Fundição de processos siderúrgicos. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 200 p. ISBN 978-85-8482-818-0.
- [8] DE VITÓRIA, CENTRO UNIVERSITÁRIO CATÓLICO; SANTANA, ADEVANIL DOS SANTOS. IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS DEFEITOS DE FUNDIÇÃO ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE

- FERRAMENTAS DA QUALIDADE: ESTUDO DE CASO EM UMA FUNDIÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS.
- [9] CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica: Volume 2 - Processos de Fabricação e Tratamento. 2ª ed. São Paulo: Pearson Universidades, 1996. 334 p. ISBN 978-0074500903.
- [10] BRANDÃO, Egleilson Silva; LEIRIA, Lorenzo Piccolo; SANTOS, Leon Denis Rodrigues Dos. Fundição de uma liga de alumínio em molde de areia do Rio Amazonas. Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Arquitetura, Engenharia e TI, Centro Universitário do Norte – UNINORTE: Laureate International Universities, 2019.
- [11] GROOVER, Mikell P. Introdução aos Processos de Fabricação. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 758 p. ISBN 978-8521625193.
- [12] HARUNA, Abdullahi I.; SANKAR, R.; MOHAMMED, Abdullahi Y. Design and construction of gas and charcoal-fired crucible furnace. *Materials Today: Proceedings*, v. 53, p. 2031-2035, 2023.
- [13] FLORESTAL, BACHARELADO EM ENGENHARIA. ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO NA SIDERURGIA.
- [14] ALENCAR, Theo Martins de; MORAIS, Arthur Domingos Mesquita de; LIMA, Ramsés Otto Cunha. Projeto e desenvolvimento de um forno tipo cadinho utilizando queimador atmosférico de GLP para fundição de alumínio com fins didáticos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM). Natal: ABCM, 2024.
- [15] ANATER, MJ do N. Desempenho ambiental e energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil. 2023.
- [16] DE ARAÚJO, Ana Clara Caxito et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 39, 2019.
- [17] GARCIA, Douglas Neves; MAGALHÃES, Marcelo Almeida; RODRIGUES, Rodimilson Coelho. DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO DE FUNDIÇÃO DE PEQUENO PORTE ALIMENTADO POR GLP. *REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA*, v. 17, n. 1, 2025.
- [18] PETROBRAS (Brasil). Gerência de Relacionamento com Clientes – Comercialização no Mercado Interno; PETROBRAS (Brasil). Gerência de Planejamento de Marketing e Inteligência de Mercado – Comercialização no Mercado Interno; PETROBRAS (Brasil). Gerência Desenvolvimento de Produtos & Avaliação De Petróleo – PD&I em Downstream, Midstream & Sustentabilidade - Cenpes. GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO: Informações Técnicas. [S. l.]: Assistência Técnica Petrobras, 2023. 15 p.
- [19] SAI, T. Venkat; VINOD, T.; GUNDA, Sowmya. A Critical Review on Casting Types and Defects. Department of Mechanical Engineering, Vidya Jyothi Institute of Technology, Hyderabad, Telangana, India.
- [20] SAHOO, Sushil Kumar; GOSWAMI, Shankha Shubhra. Investigating the causes and remedies for porosity defects in the casting process: A review. *BOHR Int. J. Eng*, v. 3, p. 15-29, 2024.
- [21] GGD METALS. Alumínio 6351-T6: Propriedades e Aplicações. Disponível em: <https://www.painel.ggdmetals.com.br/files/upload/pdf/aluminio-6351-t6.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2026.
- [22] DE OLIVEIRA, IGOR BERNARDES et al. PROJETO DE FORNO DE FUNDIÇÃO PARA RECICLAGEM DE LATA DE ALUMÍNIO. *Gears n'bricks*, v. 3, n. 2, 2022.
- [23] CONTEMP. Tabela de Emissividade 2023 - Nova Identidade. Disponível em: https://contemp.com.br/api/arquivos/tabela_de_emissividade_2023_nova_identidade.pdf. Acesso em: 15 fev. 2026.
- [24] DE SÁ ROCHA, Ricardo Jorge Marques. Fundição por baixa pressão em areia de ligas de alumínio. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).
- [25] MASCARENHAS FILHO, PAULO JOSÉ CARVALHO. FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL.
- [26] ALVES, Antonio Domingos. Desenvolvimento de um forno a cadinho fixo para fundição de alumínio. 2017.
- [27] MORAIS, Arthur Domingos Mesquita de. Influência da composição dos moldes de fundição à base de gesso sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da peça fundida em alumínio. 2021.
- [28] AKOR, TERNGU et al. Design and Fabrication of an Optimised Coal-Fired Crucible Pit Furnace. *Academy Journal of Science and Engineering*, v. 17, n. 1, p. 75-84, 2023.
- [29] KIRCH, Laura Ferrazza. Estudo do efeito da vibração mecânica na solidificação da liga de alumínio 356.0. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [30] ZARUR, Guilherme Dias. Análise de ensaios de tração de diversos corpos de prova metálicos em diversos estados. Blumenau: UFSC, 2018.
- [31] OLIVEIRA, Ismael Noronha de. Caracterização mecânica do alumínio reciclado como fundido. 2020.