



CURSO DE GESTÃO DA PRODUÇÃO INDUSTRIAL - GPI

DIOGO MEDINA MAZZEI R.A.:1670772313002

ROMEU DE CAMPOS JÚNIOR R.A.:1670772313012

**REDUÇÃO DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO PRODUTIVA: SUBSTITUIÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS POR POLÍMEROS RECICLADOS EM PROCESSOS DE
INJEÇÃO AUTOMATIZADA**

GUARULHOS - SP

2025

DIOGO MEDINA MAZZEI

R.A.:1670772313002

ROMEU DE CAMPOS JÚNIOR

R.A.:1670772313012

**REDUÇÃO DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO PRODUTIVA: SUBSTITUIÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS POR POLÍMEROS RECICLADOS EM PROCESSOS DE
INJEÇÃO AUTOMATIZADA**

Trabalho de Graduação em Gestão da Produção Industrial como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.

Orientador: Professor Dr. Marco Antônio Batista da Silva

GUARULHOS - SP

2025

DIOGO MEDINA MAZZEI
ROMEU DE CAMPOS JÚNIOR

**REDUÇÃO DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO PRODUTIVA:
SUBSTITUIÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR POLÍMEROS
RECICLADOS EM PROCESSOS DE INJEÇÃO AUTOMATIZADA**

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Gestão da Produção Industrial como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial.

Banca Examinadora

Orientador: _____

Prof. Dr. Marco Antonio Batista Silva
Faculdade de Tecnologia de Guarulhos

Banca: _____

Prof. Me. Cleber Correa Vieira
Faculdade de Tecnologia de Guarulhos

Banca: _____

Prof. Me. Nilton Stringasci Moreira
Faculdade de Tecnologia de Guarulhos

Guarulhos, 28/11/2025

RESUMO

Este trabalho analisa os impactos da substituição de travas de segurança em zamak por polímero ABS virgem ou 100% reciclado na produção de componentes para tornos normatizados pela NR-12 em escolas técnicas. Adotando a metodologia de pesquisa-ação, foram diagnosticadas falhas recorrentes nas peças metálicas devido a sobrecargas mecânicas, seguidas de planejamento, desenvolvimento de protótipos via modelagem CAD e injeção plástica, e validação em unidade piloto. Os resultados revelam redução de custos em até 99,47%, eliminação de etapas pós-produção (rebarbação, lixamento, jateamento e galvanoplastia), menor consumo energético (187,8% inferior) e emissões de CO₂ até 522,78% menores com ABS reciclado. A peça em ABS demonstrou maior durabilidade, flexibilidade e facilidade de reposição pelo operador, sem comprometer a segurança. Apesar de limitações como testes em uma única unidade e dados parcialmente subjetivos, a solução é viável e replicável em outros componentes eletromecânicos sujeitos a desgaste intenso, promovendo sustentabilidade, otimização produtiva e economia em instituições educacionais e industriais.

Palavras-chave: Segurança da Norma NR-12, Polímeros, Zamak, Redução de custos.

ABSTRACT

This study examines the impacts of replacing zamak safety latches with virgin or 100% recycled ABS polymer in the production of components for lathes compliant with NR-12 standards in technical schools. Employing action-research methodology, recurrent failures in metal parts due to mechanical overloads were diagnosed, followed by planning, CAD prototyping and plastic injection development, and validation in a pilot unit. Results show cost reductions of up to 99.47%, elimination of post-production steps (deburring, sanding, blasting, and electroplating), lower energy consumption (187.8% less), and CO₂ emissions up to 522.78% lower with recycled ABS. The ABS part proved more durable, flexible, and easily replaceable by the operator, without compromising safety. Despite limitations such as testing in a single unit and partially subjective data, the solution is feasible and replicable in other electromechanical components subject to intense wear, promoting sustainability, productive optimization, and savings in educational and industrial settings.

Keywords: NR-12 Safety Standard; Polymers; Zamak; Cost Reduction.

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 Objetivos..... | 11 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 11 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 11 |
| 1.2 Questão de pesquisa..... | 11 |
| 1.3 Justificativa..... | 11 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 13 |
| 2.1 A segurança da Norma NR-12..... | 13 |
| 2.2 Emprego de materiais poliméricos..... | 16 |
| 2.3 O plástico ABS..... | 17 |
| 2.4 Polímeros Reciclados..... | 18 |
| 2.5 A Liga leve metálica Zamak..... | 18 |
| 2.6 Projeto e técnicas de confecção de peças plásticas..... | 20 |
| 2.7 Emissões de CO2: ABS reciclado, ABS virgem e Zamak..... | 21 |
| 3 METODOLOGIA..... | 23 |
| 3.1 Diagnóstico..... | 23 |
| 3.2 Planejamento..... | 24 |
| 3.3 Desenvolvimento..... | 24 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4 Observação e validação..... | 24 |
| 3.5 Coleta e tratamento de dados..... | 25 |
| 4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 26 |
| 4.1 Fase do diagnóstico do problema..... | 26 |
| 4.2 Fase do planejamento: a busca por uma solução..... | 26 |
| 4.3 Fase do desenvolvimento: a produção da nova trava..... | 31 |
| 4.4 Fase da observação e validação: análise dos resultados..... | 32 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 39 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 41 |

LISTA DE IMAGENS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 01 - Torno Romi até 2013 sem carenagens e travas..... | 13 |
| Figura 02 - Torno Romi IMOR/Romi anos 70..... | 14 |
| Figura 03 - Extremidade intacta..... | 14 |
| Figura 04 - Torno Romi moderno e carenado..... | 15 |
| Figura 05 - Chave de segurança (conjunto) à venda no site..... | 15 |
| Figura 06 - Extremidade quebrada..... | 26 |
| Figura 07 - Conjunto aberto..... | 27 |
| Figura 08 - Conjunto fechado..... | 27 |
| Figura 09 - Extremidade quebrada sob a placa do torno..... | 28 |
| Figura 10 - Medição chave..... | 28 |
| Figura 11 - Protótipo impresso e projeto..... | 29 |
| Figura 12 - Protótipo final, projeto do molde, produto e trava original..... | 30 |
| Figura 13 - Molde usinado, eletrodos, extração e produto injetado..... | 31 |
| Figura 14 - Cavidades macho e matriz montados na injetora..... | 32 |

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 01 Composição dos Custos ABS..... | 33 |
| Tabela 02 Composição dos Custos ZAMAK..... | 34 |
| Tabela 03 Comparativo de Custos ABS injeção própria x Zamak terceirizada..... | 34 |
| Gráfico 01 Comparativo custos injeção ABS/Zamak e peça comprada..... | 35 |
| Tabela 04 Comparativo de composição dos custos de mão de obra..... | 36 |
| Tabela 05 Comparativo do consumo real de energia por unidade produzida..... | 36 |
| Tabela 06 Comparativo das emissões de Dióxido de Carbono..... | 37 |
| Tabela 07 Comparativo da energia térmica dispersa por operação..... | 37 |

1 INTRODUÇÃO

Em ambientes industriais e educacionais que operam máquinas com sistemas de segurança normatizados pela NR-12, é comum enfrentar problemas relacionados à fragilidade das travas metálicas fabricadas em Zamak. As constantes quebras desses componentes comprometem a eficiência operacional, aumentam os custos de manutenção e impactam diretamente a produtividade dos equipamentos.

Esse problema ficou evidente a partir de relatos de professores, coordenadores e equipes de manutenção de escolas técnicas, que notaram a elevada frequência de falhas nas chaves elétricas e de segurança instaladas nos tornos. Sempre que as proteções precisam ser movimentadas com agilidade para encaixar ou desencaixar, as extremidades metálicas do conjunto chave-trava acabam sofrendo esforços excessivos, levando à quebra. Mesmo com a prática de manter estoques de peças de reposição, as falhas seguem recorrentes, gerando custos e transtornos constantes.

Diante desse cenário, surge a necessidade de buscar alternativas mais eficientes, econômicas e sustentáveis. Este trabalho tem como proposta analisar os impactos da substituição do Zamak por polímero ABS, tanto virgem quanto 100% reciclado, na fabricação dessas peças. A ideia é avaliar não apenas os custos de produção, mas também os ganhos de eficiência no processo produtivo, a durabilidade dos componentes e os benefícios ambientais proporcionados pelo uso de materiais reciclados.

A pesquisa segue uma abordagem de pesquisa-ação, com natureza descritiva e quantitativa, baseada na análise da frequência de quebras, dos custos envolvidos na manutenção e dos impactos diretos no processo produtivo. A partir dessa avaliação, busca-se propor uma solução que aumente a vida útil dos componentes, atenda às exigências de segurança e ofereça uma redução real nos custos de operação e manutenção.

Somados os ganhos técnicos e econômicos, este estudo também busca contribuir com a sustentabilidade e com a racionalização de recursos nas escolas profissionalizantes. A solução proposta poderá ser replicada em dezenas de unidades

de ensino, reduzindo significativamente os custos de manutenção e ampliando a vida útil dos equipamentos.

Com base nesse contexto, este estudo busca propor uma solução para os desafios apresentados, conforme detalhado nas seções seguintes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os impactos da substituição do zamak por ABS virgem ou 100% reciclado na produção de uma trava de segurança para tornos.

1.1.2 Objetivos específicos

Comparar o custo de produção entre peças injetadas em zamak e em ABS reciclado, avaliando economia de materiais, energia e mão de obra.

Analisar a otimização do processo produtivo, identificando ganhos de eficiência com a injeção automatizada do polímero em relação à fundição do zamak, seus impactos ambientais, consumo energético e sustentabilidade.

1.2 Questão de pesquisa

Perante o exposto, a questão de pesquisa que norteia este estudo é a seguinte: de que forma a substituição da injeção de uma peça em zamak por polímero ABS virgem ou 100% reciclado pode impactar a produção de uma trava de segurança de um torno?

1.3 Justificativa

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de solucionar os problemas causados pelas constantes quebras das travas metálicas em Zamak, utilizadas em tornos normatizados pela NR-12, que geram altos custos de manutenção (entre R\$95 e R\$395 por peça), comprometem a eficiência operacional e impactam a produtividade em escolas técnicas e ambientes industriais. A substituição do Zamak por polímero

ABS, virgem ou 100% reciclado, é proposta como uma alternativa para reduzir custos de produção em até 99,47%, aumentar a durabilidade e a resistência das peças e otimizar o processo produtivo por meio de injeção automatizada. Além disso, o uso de ABS reciclado contribui para a sustentabilidade, com redução de até 522,78% nas emissões de CO₂ em comparação com o Zamak. A relevância deste estudo reside em oferecer uma solução técnica, econômica e ambientalmente viável, com potencial de replicação em instituições de ensino técnico e indústrias, promovendo segurança

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Segurança da Norma NR-12

A NR-12, publicada em 1978, estabelece requisitos mínimos de segurança para máquinas e equipamentos. Apesar de atualizações pontuais, sua aplicação efetiva só ocorreu em 2013, com a Portaria nº 1.893, que ampliou as exigências e fortaleceu a fiscalização. A mudança se justificou pelos altos índices de acidentes: entre 2011 e 2015, mais de 350 mil ocorrências, incluindo 21 mil amputações e quase mil mortes (ABNT,2013).

A norma define princípios técnicos, medidas de proteção e requisitos desde o projeto até a utilização das máquinas, abrangendo também fabricação, importação e comercialização. Em lacunas normativas, podem-se adotar padrões internacionais e europeus harmonizados (ABNT, 2013). Na prática, isso se traduz em proteções móveis com travas elétricas, integração de sistemas de segurança e descarte de equipamentos inviáveis de adaptação.

Excetuando a cor e o brilho, mecanicamente e em questões de atender as normas de segurança, um torno de 2013 (Figura 01) e outro de 1970 (Figura 02) em nada diferem. Possuem as mesmas dimensões e modo de operação e as peças fundidas antes arredondadas, tornaram-se mais retilíneas.

Figura 01 - Torno Romi até 2013 sem carenagens e travas



Fonte: Lede Máquinas (2025)

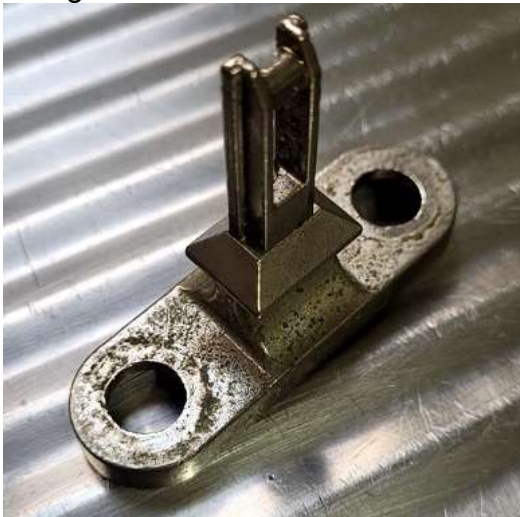
Figura 02 - Torno Imor/Romi anos 70



Fonte: Operatrix (2025)

Dentre as proteções móveis, todas, inclusive a porta de acesso às correias, foram equipadas (Figura 03) com travas elétricas de segurança (ABNT, 2013) e sua parte mecânica, injetada em ZAMAK, fornecida somente pelo fabricante da máquina e em conjunto da chave elétrica.

Figura 03 - Extremidade intacta



Fonte: os autores (2025)

Essas carenagens pesadas (Figura 04) de chapa de aço e policarbonato (ABNT, 2013), movimentadas em trilhos de guias lineares, com uma pequena manopla para servir de apoio ao seu movimento, acabam por gerar uma alavanca de quase 40cm multiplicada pela força do operador sobre a extremidade da chave. Conforme o tempo passa e seu uso se intensifica, qualquer pequena folga na fixação

do conjunto, composta por parafusos na estrutura da máquina, altera o posicionamento correto da chave na entrada do engate e não aciona o equipamento.

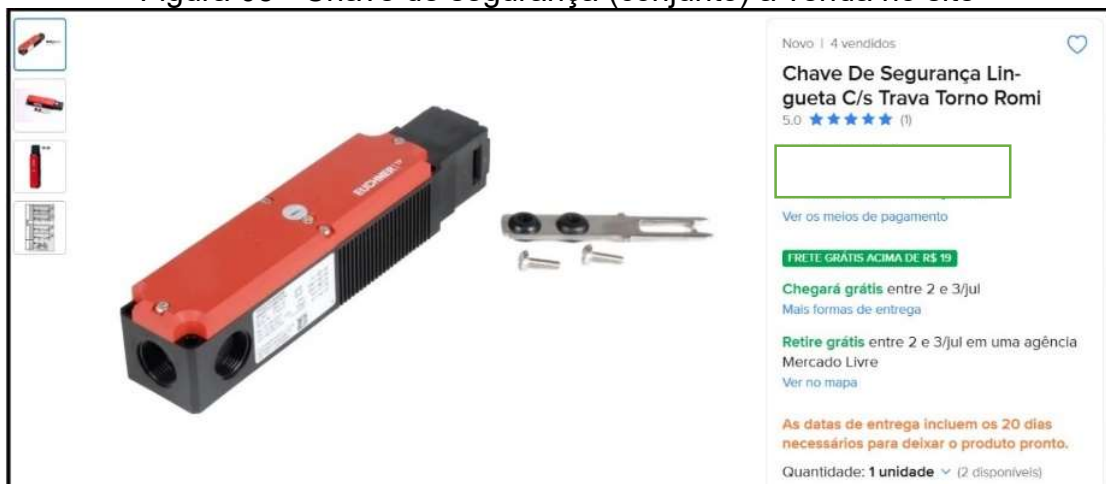
Figura 04 - Torno Romi moderno e carenado



Fonte: Site das Indústrias ROMI S/A (2025)

A chave de proteção NR-12 (Figura 05), normalmente é fornecida com a caixa elétrica e parte do chicote de ligação em conjunto (como exemplo essa a venda no site do Mercado livre). Quando não disponível em estoque o reparo precisa ser postergado por até 30 dias se a busca for pela original do fabricante do equipamento.

Figura 05 - Chave de segurança (conjunto) à venda no site



Fonte: Mercado Livre (2025)

2.2 Emprego de materiais poliméricos

Os avanços na engenharia de polímeros permitiram o desenvolvimento de materiais com desempenho mecânico capaz de atender às exigências de diversas aplicações industriais. Em muitos casos, esses materiais não apenas se igualam, mas até superam determinados metais, especialmente em situações onde a leveza é fator crítico. Essa evolução garante que a substituição de metais por polímeros possa ocorrer sem comprometer a segurança ou a confiabilidade das peças.

Além das vantagens mecânicas, a combinação de melhorias nas formulações dos polímeros e a adoção de processos produtivos mais eficientes tem proporcionado uma redução significativa de custos na fabricação de componentes. Esse fator torna os polímeros uma alternativa economicamente vantajosa, sem prejuízo das propriedades técnicas necessárias para aplicações críticas no ambiente industrial.

As propriedades versáteis desses materiais os fazem ser a escolha popular nas mais diversas aplicações industriais. Chanda e Roy (2008) destacam que os polímeros oferecem uma combinação única de leveza, resistência à corrosão e isolamento térmico e elétrico, tornando-os assim ideais para uma ampla gama uso desde componentes elétricos e peças automotivas.

Uma das principais vantagens dos polímeros é a sua capacidade de serem moldados em formas complexas. Polímeros podem ser processados por meio de diversas técnicas, como moldagem por injeção e extrusão, permitindo a fabricação de peças com geometria intrincada e precisão. Isso contribui significativamente para a eficiência do processo de produção. (Callister, 2018).

Os custos de produção de peças em polímero tendem a ser significativamente menores em comparação com os de metais, especialmente quando se considera todo o ciclo de vida do produto. Isso ocorre devido à menor necessidade de energia no processamento, à facilidade de fabricação em grandes volumes e à redução nos custos com manutenção e substituição.

A constante evolução na formulação e no processamento dos polímeros tem permitido o desenvolvimento de materiais com propriedades cada vez mais avançadas. Essa evolução atende às crescentes demandas da indústria moderna, que busca soluções mais leves, resistentes, econômicas e ambientalmente sustentáveis, sem comprometer a qualidade e a segurança dos produtos (Chanda; Roy, 2008).

2.3 O plástico ABS

O polímero ou plástico ABS é uma resina termoplástica derivada do petróleo. É formado pela copolimerização de três monômeros, sendo eles: a acrilonitrila (monômero sintético produzido a partir do hidrocarbonato propileno e amoníaco – de 15% a 30%), o butadieno (alceno obtido a partir da desidrogenação do butano – de 5% a 15%) e o estireno (produzido a partir da desidrogenação do etilbenzeno – de 40% a 60%) – sendo base de quase todos os materiais plásticos que usamos.

Com a fusão desses componentes, seguidos do processo de extrusão, temos então o composto químico acrilonitrila butadieno estireno, de onde vem o seu popular nome de “plástico ABS”. O uso do polímero ABS também foi considerado pela sua excelente resistência química e térmica, sendo um material rígido e resistente ao impacto, à altas e baixas temperaturas (-20°C a $+80^{\circ}\text{C}$), de fácil manuseio e com um ótimo acabamento. Outro motivo pelo emprego do ABS é sua capacidade de ser metalizado, ficando semelhante a qualquer aço cromado, após esse processo de metalização.

De acordo com a norma **ASTM D256 (2010)**, que define os métodos para determinar a resistência ao impacto de plásticos, é essencial avaliar a capacidade dos materiais poliméricos em absorver energia em situações de choque. Essa propriedade é particularmente relevante em ambientes industriais, onde os componentes estão sujeitos a impactos, vibração e esforços mecânicos. O ABS, por suas características de resistência ao impacto, durabilidade e leveza, torna-se uma escolha técnica adequada para aplicações que exigem segurança e desempenho, aliando também redução de custos.

O ABS é uma alternativa eficiente às ligas metálicas, oferecendo resistência a choques, durabilidade e leveza. Essas características garantem desempenho e segurança, com redução de custos sem comprometer a qualidade (Callister, 2008). Por isso, é amplamente utilizado nas indústrias automotiva, eletroeletrônica e na produção de componentes técnicos.

2.4 Polímeros reciclados

Plásticos reciclados, como o ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) utilizado neste estudo, são materiais reprocessados a partir de resíduos pós-consumo ou industriais, promovendo sustentabilidade e redução de custos. Segundo Chanda e Roy (2008), o ABS reciclado mantém resistência ao impacto, flexibilidade e estabilidade térmica (-20°C a +80°C), adequando-se a aplicações técnicas, como travas para tornos normatizados pela NR-12. A NBR 13230 (2008) regula a identificação de plásticos recicláveis, exigindo símbolos nos moldes. Desafios incluem garantir a qualidade do produto tal qual como o polímero virgem. No caso específico do produto aqui destacado, coloca-se um moínho pequeno ao lado da injetora e todo o material advindo de falhas de injeção e galhos da injeção dos produtos e esses são triturados novamente em péllets conforme o material virgem fornecido pelo fabricante. Misturas de 30 a 50% de material reciclado podem ser acrescentados ao material novo sem nenhum dano à qualidade ou a resistência original da peça. Desde que não haja mistura com outros polímeros (limpeza correta do moínho e manejo das sobras), o processo está garantido, podendo ser reaproveitado quantas vezes for necessário. Toda essa prática é comum na indústria do plástico, reforçando a viabilidade econômica e ambiental da solução proposta.

2.5 A Liga leve metálica Zamak

Zamak - o nome Zamak vem de Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer (zinco, alumínio, magnésio e cobre, em alemão, respectivamente). Mas, no Brasil é mais utilizada a nomenclatura com o final C (Zamac). Essa liga metálica surgiu no século passado como alternativa ao latão, por ter finalidade semelhante, podendo ser aplicado em inúmeros segmentos, porém, com custo de produção bem menor. (Callister & Rethwisch, 2012). Rapidamente, se popularizou nos segmentos

decorativos, automotivo (utilizado em larga escala), moveleiros, entre outros. Atualmente, contudo, alguns desafios vêm se apresentando no trabalho com a liga. Entre eles, a substituição de metais por **polímeros** em muitos desses mercados consumidores, além da crise no segmento automotivo, e, claro problemas da recessão econômica. O Zamak continuará sendo largamente utilizado por vários segmentos da indústria, dada sua versatilidade, menor custo (se comparado aos mesmos itens confeccionados em latão ou bronze) e a possibilidade de obtenção de uma boa camada eletro-depositada protetora contra a corrosão. A indústria local de metais sanitários é um exemplo, e vem cada vez mais utilizando esta liga em seus produtos, na contramão de outros mercados.

As ligas ZAMAK são amplamente valorizadas na indústria de fundição devido à sua excelente fluidez e à capacidade de preencher moldes com alto nível de detalhamento. Essa característica permite a fabricação de componentes com geometria complexa, acabamento superficial de qualidade e ótima precisão dimensional (Callister, 2008), sendo especialmente útil em setores como o automotivo, eletrônico e na produção de peças técnicas.

Além de sua facilidade de processamento, o ZAMAK oferece um bom equilíbrio entre propriedades mecânicas e econômicas. A liga apresenta uma combinação eficiente de resistência à tração, dureza e resistência moderada à corrosão, o que a torna adequada para a fabricação de peças submetidas a esforços mecânicos de média intensidade. No entanto, sua resistência à corrosão é limitada em ambientes com alta umidade ou exposição constante a agentes químicos, fator que exige análise criteriosa em aplicações como componentes de máquinas operatrizes, onde as condições de trabalho podem acelerar processos de desgaste e degradação do material (Callister, 2008).

É importante destacar que quaisquer peças injetadas em Zamak precisam de outras etapas como polimento, rebarbação, lixamento e posterior processo de galvanoplastia – esse processo se resume em uma ou mais finas camadas de metais nobres aplicados à uma superfície metálica eletroquimicamente. Requer imensas quantidades de água e seu posterior tratamento para o correto descarte, muita energia

elétrica e aplicação de sabões desengraxantes, ácidos e outros materiais caros e poluentes (Slack,1996).

As ligas ZAMAK são utilizadas como alternativa a metais mais pesados, especialmente em aplicações onde a redução de peso é essencial, como na indústria automotiva, embora seu emprego em peças de acabamento como frisos e maçanetas tenham sido quase extintos. Na aplicação estudada o desafio é ainda maior, pois se busca substituir uma liga leve por um material ultraleve como o polímero ABS (Chanda; Roy,2008).

Estudos de viabilidade técnica e econômica indicam que a substituição de ligas metálicas por polímeros pode gerar reduções de custo superiores a 90%, sem prejuízo funcional (Paul; Robeson, 2008).

2.6 Projeto e técnicas de confecção de peças plásticas

O projeto de peças plásticas por injeção exige ajustes no design para evitar rechupe, uma deformação causada por espessuras irregulares ou resfriamento desigual do material. Quando se projeta um produto, devem ser incluídos, além do formato e estética, cálculos de resistência mecânica, térmica e química. A resistência mecânica envolve o tipo de material e dimensões das paredes. Como o peso tem bastante importância, por afetar tanto os custos como a praticidade de manuseio, a espessura das paredes de peças plásticas não deve ultrapassar 4 mm. Além disso, paredes grossas são difíceis de injetar e pressurizar sem que ocorra chupagem (ou rechupe) durante o resfriamento.

A espessura da parede influencia fortemente muitas características principais das peças, incluindo desempenho e toque mecânicos, aparência cosmética, moldabilidade e economia. A espessura ideal geralmente é um equilíbrio entre tendências opostas, como resistência versus redução de peso ou durabilidade versus custo. As espessuras das paredes devem ser cuidadosamente ajustadas na fase de projeto para evitar modificações dispendiosas no molde e problemas de moldagem na produção.

Em seções simples de parede plana, cada 10% de aumento na espessura da parede proporciona um aumento de aproximadamente 33% na rigidez. O aumento da espessura da parede também aumenta o peso da peça, os tempos de ciclo e o custo do material. Por isso alterações na geometria como nervuras, curvas e ondulações são utilizados para enrijecer e reforçar as peças. Esses recursos podem adicionar resistência suficiente, com pouco aumento de peso, e quase nenhuma alteração no tempo de ciclo ou aumento de custo (Bayer, 2000).

Nervuras e alívios de massa têm sido utilizados para aumentar a resistência mecânica (deflexão, deformação, impacto, etc.) e diminuir o nível de empenamento do produto. O dimensionamento das nervuras varia com as necessidades, estética e com as possibilidades (Bayer, 2000).

No presente estudo, a trava em ABS reciclado ou virgem foi projetada com cavidades e rebaixos uniformes, garantindo resistência mecânica e funcionalidade em tornos normatizados pela NR-12. A NBR 13124 (1994) estabelece tolerâncias dimensionais para moldagem por injeção, orientando a precisão de moldes e cavidades. Paul e Robeson (2008) afirmam que designs otimizados em polímeros podem reduzir e muito os custos de fabricação. Essas práticas asseguram peças plásticas confiáveis, sustentáveis e conformes às exigências técnicas e de segurança.

2.7 Emissões de CO₂: ABS reciclado, ABS virgem e Zamak

A análise das emissões de CO₂ é fundamental para avaliar a sustentabilidade da substituição de materiais metálicos, como o Zamak, por polímeros, como o ABS reciclado, em toda a cadeia produtiva, desde a extração até o descarte. Segundo Chanda e Roy (2008), a produção de ABS virgem emite cerca de 2,5-3,5 kg de CO₂ por kg de material, enquanto o ABS reciclado reduz isso para 0,5-1,0 kg de CO₂/kg, devido ao menor consumo energético no reprocessamento. Em contrapartida, a fundição de Zamak, uma liga de zinco, emite aproximadamente 6,0-7,0 kg de CO₂/kg, devido à alta energia requerida (Callister, 2008). No presente estudo, o ABS reciclado alcançou notória redução nas emissões de CO₂ em comparação com o Zamak. Paul e Robeson (2008) destacam que polímeros reciclados podem diminuir impactos ambientais em até 80%, corroborando a

viabilidade sustentável da solução proposta. A NBR 13230 (2008) reforça a identificação de plásticos recicláveis, promovendo práticas ecológicas.

3 METODOLOGIA

A presente investigação enquadra-se na modalidade de pesquisa-ação prática e colaborativa, cuja finalidade consiste em compreender e intervir em uma situação concreta por meio da participação direta dos sujeitos envolvidos. O estudo foi conduzido em ambiente real, com foco nas falhas recorrentes das travas metálicas em Zamak instaladas nos tornos normatizados pela NR-12 em escolas técnicas-profissionalizantes da rede do Sistema S. Essa abordagem articula a análise científica à ação planejada, integrando investigação e transformação simultaneamente, conforme postula Thiollent (1986). O estudo ultrapassa a mera descrição do fenômeno, ao propor e validar protótipos em polímero ABS reciclado como solução técnica para a substituição do Zamak, o que fundamenta sua natureza prática. O caráter colaborativo, destacado por Barbier (2002), foi evidenciado pela participação contínua dos atores institucionais, desde o diagnóstico até a avaliação dos resultados, numa abordagem que combina investigação científica e intervenção prática em contextos reais, conforme delineado por Thiollent (1986), Tripp (2005) e Barbier (2002). Essa metodologia é especialmente relevante para este trabalho, que busca solucionar as quebras recorrentes de travas metálicas em Zamak em tornos normatizados pela NR-12, por meio da substituição por polímero ABS reciclado, em parceria com docentes, instrutores e discentes de escolas técnicas. O capítulo organiza-se em quatro eixos do ciclo da pesquisa-ação: diagnóstico, planejamento, desenvolvimento e observação e validação, que embasam a abordagem adotada.

3.1 Diagnóstico

O diagnóstico, primeira etapa da pesquisa-ação, visa identificar e compreender o problema no contexto em que ocorre (Thiollent, 1986). Neste estudo, o diagnóstico focou nas falhas frequentes das travas de Zamak, que comprometem a operação de tornos em escolas técnicas. Segundo Callister (2008), falhas mecânicas resultam de sobrecarga e fadiga, justificando a análise empírica realizada por meio de visitas técnicas, relatórios de manutenção e entrevistas com professores, que confirmaram a necessidade de alternativas mais duráveis e econômicas.

3.2 Planejamento

O planejamento, segunda etapa, envolve a elaboração de estratégias para enfrentar o problema identificado (Tripp, 2005). No contexto deste trabalho, o planejamento abrangeu o desenvolvimento de protótipos em ABS reciclado, projetados para substituir as travas de Zamak. Modelos tridimensionais e moldes de injeção foram planejados em colaboração com profissionais, garantindo viabilidade técnica. Slack (1996) destaca que mudanças em produtos e processos são interdependentes, reforçando a escolha do ABS como solução para reduzir custos e melhorar o desempenho.

3.3 Desenvolvimento

O desenvolvimento refere-se à implementação prática das soluções planejadas (Barbier, 2002). Aqui, envolveu a fabricação de protótipos em ABS reciclado, utilizando softwares como Inventor® e processos de injeção plástica. O ABS foi selecionado por sua resistência ao impacto e flexibilidade, conforme Chanda e Roy (2008), atendendo às exigências da NR-12. Ajustes no design minimizaram deformações, como o rechupe, garantindo a funcionalidade das peças em condições reais de uso. Em seguida foram confeccionadas cavidades para um molde de injeção plástica do modelo definitivo em ABS de onde inúmeras peças idênticas podem ser reproduzidas para quaisquer tipos de testes e validações, medições e encaixes.

3.4 Observação e validação

A observação e validação, última etapa, consistem na análise sistemática dos resultados das intervenções (Thiollent, 1986). Os produtos injetados (na cavidade confeccionada) em ABS foram testados em tornos, com supervisão de instrutores, avaliando durabilidade, resistência e facilidade de substituição. Paul e Robeson (2008) indicam que polímeros podem reduzir custos em até 92,5%, o que foi confirmado pelos testes, validando a substituição do Zamak por ABS como uma solução técnica, econômica e sustentável. Essa etapa promoveu o retorno reflexivo aos participantes e a verificação da efetividade das intervenções realizadas, completando o ciclo metodológico da pesquisa-ação.

3.5 Coleta e tratamento de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de:

- Relatórios internos de manutenção das escolas;
- Observações diretas de falhas durante o uso em aulas práticas;
- Relatos sistematizados de instrutores, confirmando o padrão recorrente do problema em todas as escolas envolvidas;
- Testes práticos com peças prototipadas em polímero ABS, comparando desempenho, durabilidade e facilidade de substituição;
- Dados técnicos e orçamentários obtidos junto a fornecedores da indústria de injeção plástica e fundição sob pressão;

Essas informações foram organizadas em tabelas comparativas, envolvendo:

- Custos unitários dos componentes (ABS vs. Zamak)
- Consumo energético por tipo de injetora
- Emissão de CO₂ equivalente
- Demanda de mão de obra por processo

O desempenho das peças substitutas foi avaliado em ambiente real de operação, observando resistência mecânica, comportamento sob uso contínuo e impacto nas rotinas de manutenção. A análise quantitativa foi complementada com medições de tempo, custo e consumo energético associadas a cada solução

4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta parte do trabalho serão apresentados os dados e a análise dos resultados seguindo-se a sequência estabelecida pela metodologia utilizada.

4.1 Fase do diagnóstico do problema

A fase inicial da pesquisa-ação deu-se por meio de diagnosticar a causa da frequente quebra da trava dos tornos. Em ambientes escolares, mesmo com o correto treino e demonstrações de como movimentar as proteções da máquina, essas são razoavelmente pesadas e geram alavancas de esforço que, somadas ao manuseio intensivo dos alunos, amplificam as quebras.

Segundo Callister (2008), falhas mecânicas decorrem de sobrecarga, fadiga e defeitos de material, sendo essencial a análise para melhorias no projeto. Já Slack (1996) ressalta que mudanças em produtos e processos são interdependentes e afetam diretamente custos e confiabilidade.

Essa peça original de ZAMAK já danificada (Figura 06) é frágil e do modo como está impede o acionamento da máquina (torno mecânico horizontal ou quaisquer outras que utilizem o mesmo sistema).

Figura 06 - Extremidade quebrada



Fonte: os autores (2025)

Sua extremidade partida fica presa dentro do encaixe do acionamento e acarreta uma perda razoável de tempo no reparo por ser difícil o desmonte da outra peça onde seus componentes e parafuso são diminutos, o anel de vedação é frágil e

pode ser danificado ao ser movido, demandando tempo e mão de obra especializada no seu reparo.

Essa trava, produzida em Zamak injetado, oferece bom contato elétrico (não utilizado nesse sistema) e excelente capacidade de deslizar entre os contatos da contraparte (Figura 07) e manter travada quaisquer carenagens no lugar (Figura 08).

Figura 07 - Conjunto aberto



Fonte: os autores (2025)

Figura 08 - Conjunto fechado



Fonte: os autores (2025)

A Figura 09 ilustra o componente de trava posicionado sob a carenagem rotativa da placa do torno. Este é o dispositivo mais frequentemente acionado e aquele que opera nas condições ambientais mais adversas, estando altamente exposto a cavacos e óleo solúvel. Sua geometria rotativa de acoplamento, somada à posição de instalação desfavorável, impõe uma dificuldade intrínseca ao correto deslizamento. Consequentemente, é a extremidade que mais incorre em desalinhamento e esforços de torção, resultando na maior incidência de danos estruturais, conforme evidenciado na imagem.

Foi observado que essa peça não se utiliza de contato elétrico e sim uma trava mecânica (um tipo de clique) que libera o sinal elétrico e o funcionamento do torno e por isso não havia a necessidade de ser metálico o material da peça. Essa característica é estendida às demais cinco chaves que o equipamento possui.

Figura 09 - Extremidade quebrada sob a placa do torno



Fonte: os autores (2025)

4.2 Fase do planejamento: a busca por uma solução

Para uma solução simplificada funcionar, o caminho inicial foi dimensionar e com o uso de impressoras 3D, replicar o modelo original em material polimérico. Mas porque o fabricante não o fez antes? Que polímero seria esse? Iria funcionar?

Como início, da peça original se retirou as devidas dimensões (Figura 10) e replicou-se com fidelidade o modelo matemático em polímero. Baseado nas grandes espessuras desse modelo, os ajustes começaram a serem feitos.

Figura 10 - Medição chave



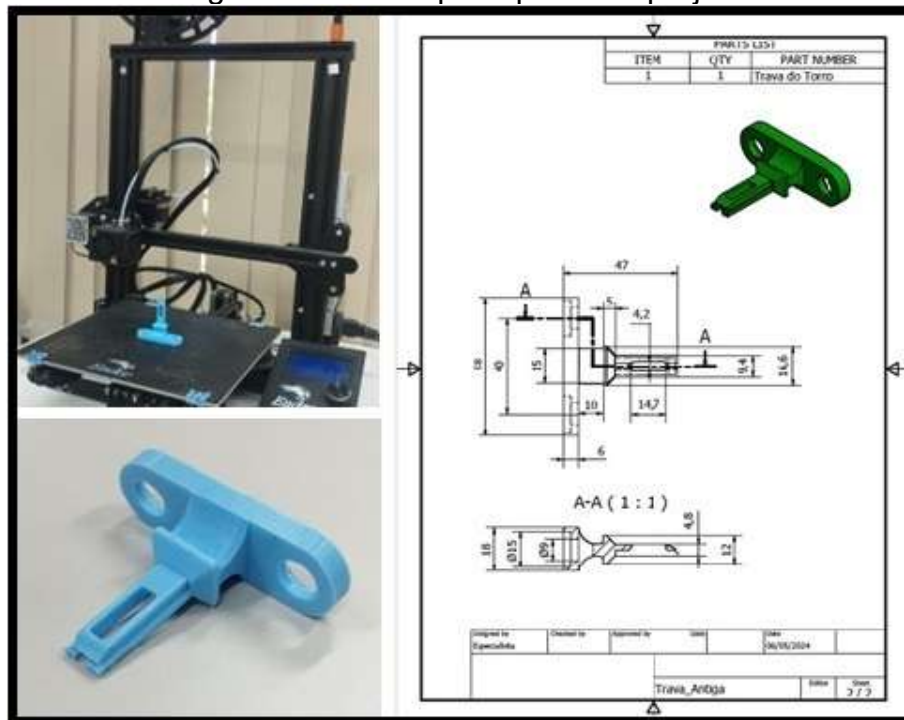
Fonte: os autores (2025)

A jornada para a concepção do artefato envolveu prototipagem e validação de vários modelos matemáticos. A maioria encontrava limitações de adaptar mais

peças que as já utilizadas, pois o conjunto demanda uma rígida fixação e isso criava muitas folgas e gaps que não permitiam o correto acionamento da chave propriamente dita. O modelo original utiliza-se de 2 coxins cilíndricos de borracha, dois pequenos tubos de metal para impedir o esmagamento desses pequenos coxins, duas arruelas de calço e 2 parafusos para sua fixação. Parte do trabalho seria a busca por simplificar também a fixação da peça sem a utilização de tantos componentes. O tamanho reduzido desses faz com que a montagem seja difícil e a perda deles seja facilitada numa máquina que esteja suja de cavacos metálicos.

Alguns protótipos impressos (Figura 11), foram confeccionados como parte da pesquisa-ação.

Figura 11 - Protótipo impresso e projeto



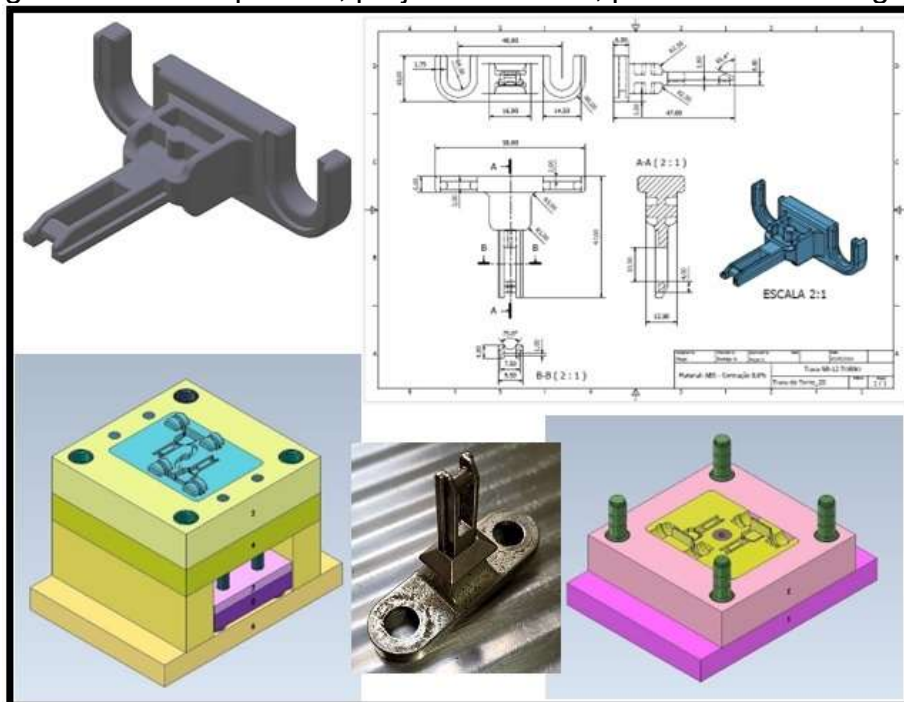
Fonte: os autores/software Inventor® (2025)

Além da geometria original, replicada com fidelidade no primeiro protótipo, um segundo modelo totalmente diferente do original fora pensado, mas o terceiro, esse sim alcançou o que era mais importante – unir a resistência ao impacto à pouca espessura, para controlarmos o rechupe do modelo – o rechupe (ou deformações no formato de depressões) é causado pelo excesso de massa num determinado ponto do perfil em um produto plástico – é uma regra da injeção e confecção de peças

plásticas que todo modelo deve seguir. Suas paredes e nervuras devem ser alterados para que se alcance uma proporção e suavidade nas transições de espessuras para impedir essas deformações – o modelo de produto original em Zamak aceita transições abruptas e enormes diferenças de espessura e massa porque é injetado em metal sob enorme pressão e se solidifica muito rapidamente, bastando diminuir sua temperatura após a injeção. No plástico não funciona da mesma maneira.

O modelo definitivo (Figura 12) foi alcançado após a modelagem detalhada da amostra original e uma série subsequente de modificações e impressões de protótipos. O design final foi adequado às normas da injeção de polímeros, visando minimizar a ocorrência de rechupe e outras deformações dimensionais. Essa otimização permitiu, ademais, uma análise prática da resistência à torção do componente. As cavidades e rebaixos foram estrategicamente incorporados para uniformizar a espessura por todo o corpo da peça, um requisito crucial para a manutenção da rigidez estrutural e a prevenção de deformidades.

Figura 12 - Protótipo final, projeto do molde, produto e trava original



Fonte: os autores/software Inventor® (2025)

Pensando em durabilidade, resistência ao desgaste e relativa flexibilidade e torsões, foi escolhido o polímero ABS - Acrilonitrila butadieno estireno.

O uso do polímero ABS também foi considerado pela sua excelente resistência química e térmica, sendo um material rígido e resistente ao impacto, à altas e baixas temperaturas, de fácil manuseio e com um ótimo acabamento.

4.3 Fase do desenvolvimento: a produção da nova trava

Com a escolha do polímero a ser injetado, o software nos fornece sua massa e a partir dela, podemos junto ao profissional de injeção plástica, estimar o custo por peça injetada, pois conhecemos o custo/hora da máquina Injetora e seu operador (média de mercado). O tamanho da máquina, medido em toneladas de injeção e força de fechamento é que diferencia seu custo/hora. No caso, uma injetora comum de 100 a 120ton é o suficiente para injetar produtos de até 120g de peso. Após o dimensional do modelo definido, material polimérico escolhido, protótipo aprovado nas montagens e engates realizados a etapa seguinte foi a reunião dos materiais necessários para confeccionar um pequeno molde de injeção de duas cavidades em aço P20 (o material mais abrangente pra esse tipo de injeção). Conseguimos um porta-molde sucata fornecido por uma escola parceira. Eletrodos em cobre selecionados, maquinário e mão de obra disponíveis, o custo de fabricação quase nulo. Através da usinagem CNC e com o software MASTERCAM X, reproduzimos nos postigos de Aço P20 (Figura 13) ambas as cavidades, mantendo sua fidelidade quanto às dimensões e formas do projeto modelado em CAD.

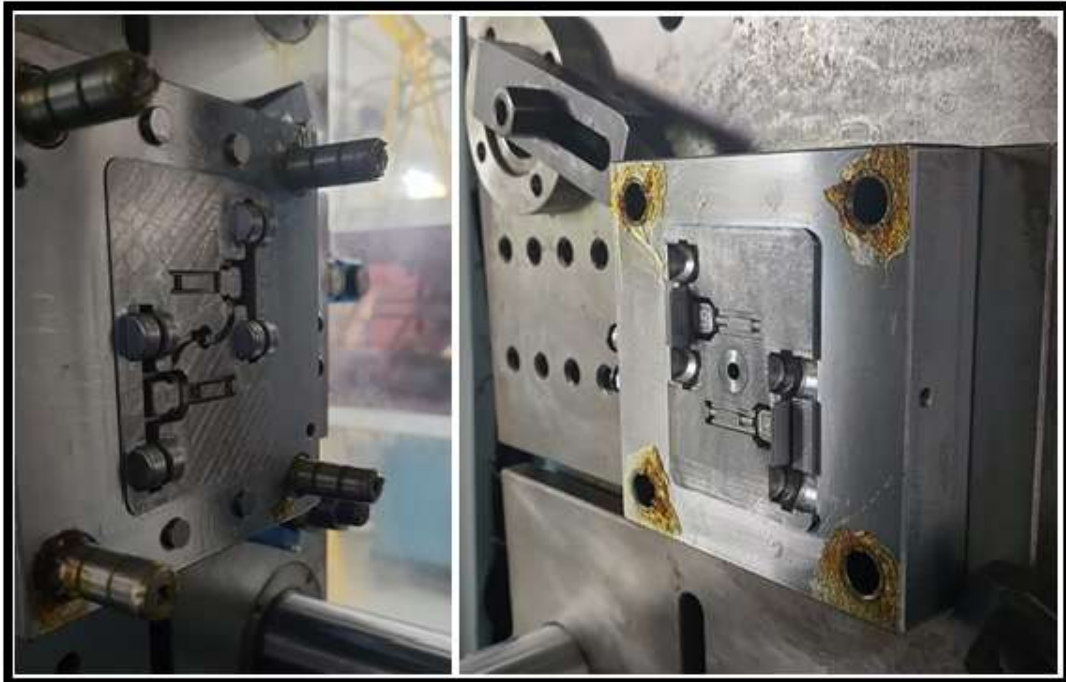
Figura 13 – Molde usinado, eletrodos, extração e produto injetado



Fonte: os autores (2025)

Projetado no Software Inventor®, extraído a partir do modelo revisado da trava, o molde possui 2 cavidades idênticas do produto e injeta duas peças por ciclo. Mesmo sendo um pequeno molde de apenas duas cavidades, seu ciclo de injeção também é baixo e é o suficiente para em pouco tempo em operação na injetora de plástico (Figura 14), alcançar uma grande quantidade de peças produzidas.

Figura 14 - Cavidades macho e matriz montados na injetora



Fonte: os autores (2025)

4.4 Fase da observação e validação: análise dos resultados

O escopo do trabalho, conduzido sob os preceitos da Pesquisa-Ação, abrangeu a reprodução da extremidade da chave em polímero ABS. Diante dessa análise, questiona-se a viabilidade de se optar pela reprodução fiel da peça original em Zamak, considerando as implicações técnicas e econômicas envolvidas. O diferencial substantivo na adoção do polímero ABS reside na otimização dos custos operacionais.

Ainda que fosse pago para produzir um pequeno molde de 2 cavidades como o mostrado anteriormente para um fornecedor terceirizado, se fosse para injetar a peça em ZAMAK, o custo do molde seria muito maior, devido à empregabilidade de

aços-ferramenta específicos como o H-13 e AISI420, muito resistentes ao desgaste e pelas necessidades estruturais do porte da ferramenta – mais reforçada para ser altamente resistentes às pressões e temperaturas envolvidas. Além desse custo, as peças metálicas injetadas sob pressão não saem prontas no primeiro processo e demandam muito mais mão de obra e retrabalhos adicionais – estes veremos nas comparações a seguir.

Os dados apresentados na Tabelas 01 e mostram a composição dos custos da trava injetada em ABS considerando também suas perdas relacionadas aos canais se injeção, como mostrado na segunda parte do quadro.

Tabela 01 Composição dos Custos ABS

| Custos para produzir a extremidade da chave em Polímero ABS com o valor da hora da injetora | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| PARÂMETRO | VALOR | VALOR COM PERDA (3%) |
| Preço do ABS (R\$/kg) | R\$ 12,29 | R\$ 12,29 |
| Peso da Peça (g) | 5,064g | 5,064g |
| Custo Hora Injetora (R\$) | R\$ 102,00 | R\$ 102,00 |
| Cavidades do Molde | 2 | 2 |
| Ciclos por Hora | 120 | 120 |
| Peças por Hora | 240 | 240 |
| Consumo ABS (kg/hora) | 1,21536kg | 1,252kg |
| Custo de Material (R\$/hora) | R\$ 14,94 | R\$ 15,42 |
| Custo Total (R\$/hora) | R\$ 116,94 | R\$ 117,42 |
| Custo por Peça (R\$/peça) | R\$ 0,49 | R\$ 0,49 |

Fonte: Proinjet (abril/2025)

A Tabelas 02 mostra a composição dos custos da trava injetada em ZAMAK, considerando também suas perdas relacionadas aos canais se injeção, como mostrado na segunda parte do quadro. Nas ligas metálicas sob pressão, as perdas podem atingir até 15%.

Tabela 02 Composição dos Custos Zamak

| Custos para produzir a extremidade da chave em liga metálica ZAMAK com o valor da hora da injetora | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|
| PARÂMETRO | VALOR | VALOR COM PERDA (3%) |
| Preço do ZAMAK (R\$/kg) | R\$ 22,50 | R\$ 22,50 |
| Peso da Peça (g) | 40,517g | 40,517g |
| Custo Hora Injetora (R\$) | R\$ 230,00 | R\$ 230,00 |
| Cavidades do Molde | 2 | 2 |
| Ciclos por Hora | 120 | 120 |
| Peças por Hora | 240 | 240 |
| Consumo ZAMAK (kg/hora) | 9,724kg | 10,015kg |
| Custo de Material (R\$/hora) | R\$ 218,79 | R\$ 225,34 |
| Custo Total (R\$/hora) | R\$ 448,79 | R\$ 455,34 |
| Custo por Peça (R\$/peça) | R\$ 1,87 | R\$ 1,90 |

Fonte: Deluma (abril/2025)

Na Tabela 03 temos os custos (99,5% menores) de se injetar internamente a peça em ABS comparado a injetar em local terceirizado em ZAMAK.

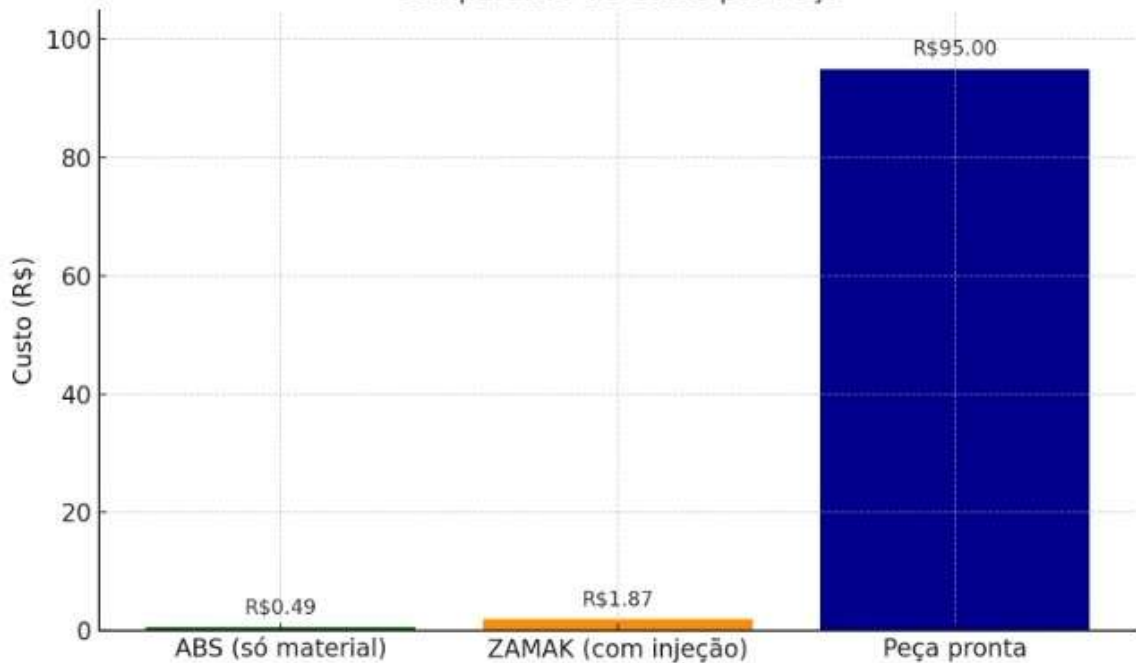
Tabela 03 Comparativo de Custos ABS injeção própria x Zamak terceirizada

| Custos para produzir a extremidade da chave em ABS (injetora própria) X ZAMAK (injetora externa) | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| PARÂMETRO | ABS (Injetora própria - grátis) | ZAMAK (injetora externa) |
| Preço do material (R\$/kg) | R\$ 12,29 | R\$ 22,50 |
| Peso da Peça (g) | 5,064g | 40,5174g |
| Custo Hora Injetora (R\$) | R\$ 0,00 | R\$ 230,00 |
| Cavidades do Molde | 2 | 2 |
| Ciclos por Hora | 120 | 120 |
| Peças por Hora | 240 | 240 |
| Consumo material (kg/hora) | 1,21536kg | 9,724kg |
| Custo de material (R\$/hora) | R\$ 14,94 | R\$ 218,79 |
| Custo total (R\$/hora) | R\$ 14,94 | R\$ 448,79 |
| Custo por peça (R\$/peça) | R\$ 0,49 | R\$ 1,87 |
| Custo da peça pronta (R\$/Un) | R\$ 0,00 | R\$95,00 (comprada) |

Fonte: Proinjet/Deluma (abril/2025)

No Gráfico 01 ambos os custos de injeção (interno e terceirizado) são comparados ao custo de se comprar a chave pronta no fornecedor do equipamento (torno).

Gráfico 01 Comparativo custos injeção ABS/Zamak e chave comprada
Comparativo de Custo por Peça



Fonte: os autores (2025)

O apontamento da Tabela 04 compara e separa em etapas todo o processo da fusão do metal ao tratamento superficial de cromeação ou zincagem (Zamak), enquanto o ABS só utiliza a secagem ou estufa do polímero e a injeção sob pressão em sequência. A tabela nos mostra que após colocar o material plástico para secar na estufa, a injetora plástica, uma vez carregada de polímeros, trabalha sem a necessidade de operador e em ciclo automático produzindo as peças. A trava injetada em Zamak precisa de um carregador do forno onde ocorrerá a fusão do metal e mais seis trabalhadores para executar as operações de injeção, rebarbação, lixamentos, jateamento e cromeação que juntos perfazem as etapas de produção da peça metálica.

Tabela 04 Comparativo de composição dos custos de mão de obra

| PROCESSO DE PRODUÇÃO DA PEÇA INJETADA EM ZAMAK X ABS COM DIVISÃO DE MÃO DE OBRA E TEMPOS | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------|-------------|-----------------|------------|-------------|
| MATERIAL | ABS RECICLADO/VIRGEM | | | ZAMAK | | |
| ETAPA DA OPERAÇÃO | TEMPO POR CICLO | TEMPO/PEÇA | MÃO DE OBRA | TEMPO POR CICLO | TEMPO/PEÇA | MÃO DE OBRA |
| 1ª FUSÃO DO METAL/ESTUFA DO ABS | 0,182s | 0,091s | 1 | 1,46s | 0,73s | 1 |
| 2ª INJEÇÃO SOB PRESSÃO | 30s | 15s | 0 | 30s | 15s | 1 |
| 3ª SEPARAÇÃO DO CANAL + INSPEÇÃO | 0 | 0 | 0 | 30s | 15s | 0 |
| 4ª REBARBAÇÃO LIXADEIRA DE FITA | 0 | 0 | 0 | 40s | 20s | 1 |
| 5ª REBARBAÇÃO LIMA ELÉTRICA | 0 | 0 | 0 | 40s | 20s | 1 |
| 6ª JATEAMENTO POR GRANALHA | 0 | 0 | 0 | 12s | 6s | 1 |
| 7ª LAVAGEM/ENXÁGUE | 0 | 0 | 0 | 12s | 6s | 1 |
| 8ª CROMEAÇÃO/ZINCAGEM | 0 | 0 | 0 | 1200s | 600s | 1 |
| TEMPO TOTAL/MÃO DE OBRA UTILIZADA | 30,182s | 15,091s | 1 | 1365,46s | 682,73s | 7 |
| TEMPO TOTAL/MÃO DE OBRA TOTAL | 00:00:30 | 00:00:15 | 0 | 00:22:45 | 00:11:22 | 6 |

Fonte: os autores (2025)

A Tabela 05 identifica o maior consumo energético (187,8%) na produção da Trava metálica em ZAMAK perante a injeção da nova trava polimérica em ABS (virgem ou reciclado).

Tabela 05 Comparativo do consumo real de energia por unidade produzida

| COMPARATIVO CONSUMO DE ENERGIA ABS X ZAMAK | | |
|--------------------------------------------|--------------|-----------------|
| PARÂMETRO | ABS (5,064g) | ZAMAK (40,517g) |
| Fusão/estufa ou pré-secagem | 0,01 kWh/pç | 0,042 kWh/pç |
| Injeção ABS | 0,123 kWh/pç | 0 |
| Injeção ZAMAK e demais processos | 0 | 0,354 kWh/pç |
| Custo estimado energia (R\$0,85/kWh) | R\$0,104/pç | R\$0,30/pç |
| Custo estimado total energia por peça | R\$0,104/pç | R\$0,30/pç |

Fonte: Deluma (abril/2025)

A Tabela 06 apresenta os dados de emissões de CO₂e - em quilogramas de dióxido de carbono (dados aproximados). Se comparado ao ABS reciclado, o

Zamak emite 522,78% mais CO₂ e comparado ao ABS virgem, a diferença cai para 423,18% nas emissões. A quantidade emitida na fabricação da trava metálica é superior à polimérica em ABS.

Tabela 06 Comparativo das emissões de Dióxido de Carbono

| COMPARATIVO EMISSÕES CO ₂ POR MATERIAL POR PEÇA | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| PARÂMETRO | ABS (5,064g) | ABS reciclado (5,064g) | ZAMAK (40,517g) |
| Matéria-prima | 0,0177 - 0,0203kg CO ₂ e | 0,005 - 0,0076kg CO ₂ e | 0,223 - 0,271kg CO ₂ e |
| Energia utilizada no processo | 0,0608kg CO ₂ e | 0,0608kg CO ₂ e | 0,171kg CO ₂ e |
| TOTAL estimado por peça | 0,0785 - 0,0811kg CO ₂ e | 0,0658 - 0,0684kg CO ₂ e | 0,394 - 0,442kg CO ₂ e |
| Base para cálculo: Matriz elétrica brasileira (0,5 kg CO ₂ e/kWh) + inventários internacionais (Ecoinvent/GaBi) | | | |

Fonte: os autores (2025)

Na tabela 07 temos a dispersão de energia térmica no ambiente – 630,89% maior no Zamak frente ao ABS. Esse impacto ambiental térmico causado pela operação contínua do forno (carregado da liga de metal incandescente) gera um calor radiante que se acumula na área ao redor da célula de injeção e causa desconforto a todos os envolvidos na produção da peça. Jatos de desmoldantes geram névoa constante de solventes a base de petróleo e o ruído de ar comprimido (do jato) e da própria injetora são elevados.

Tabela 07 Comparativo da energia térmica dispersa por operação

| COMPARATIVO ENERGIA TÉRMICA DISPERSA - CONSUMO E DESPÉRDICIO | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| PARÂMETRO | ABS/ABS reciclado (5,064g) | ZAMAK (40,517g) |
| Energia térmica gerada na peça | 0,0222 MJ/peça | 0,114 MJ/peça |
| En. térmica para fusão/secagem | 0,0181 MJ/peça | 0,14 MJ/peça |
| Total de energia por peça | 0,0403 MJ/peça | 0,254 MJ/peça |
| Eficiência térmica estimada | 50 - 60% | 30 - 40% |
| Energia térmica desperdiçada | 0,015 - 0,019 MJ/peça | 0,152 - 0,177 MJ/peça |
| Equivalente térmico em BTU | 14 - 18 BTU | 144 - 168 BTU |
| Total com perdas estimadas | 0,0573 MJ/peça | 0,4185 MJ/peça |
| Operações incluem Forno para fusão do Zamak e Estufa para secagem do polímero | | |

Fonte: os autores (2025)

Esse aumento da temperatura local exige sistemas de ventilação forçada ou exaustão com renovação de ar dimensionada. Isso contribui não apenas para o desconforto térmico dos operadores, mas também para elevação indireta do consumo

energético da planta fabril (climatização ou ventilação mecânica). A Estufa de secagem do ABS trabalha fechada e com temperaturas entre 90°C e 110°C, causando dispersão térmica muito discreta ao ambiente, se ventilado corretamente.

A operação de injeção de ABS, realizada em equipamento automatizado dotado de sistemas de refrigeração, apresenta interferência mínima na variação térmica do ambiente produtivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão norteadora deste trabalho foi: de que forma a substituição da injeção de uma peça em zamak por polímero ABS virgem ou 100% reciclado pode impactar a produção de uma trava de segurança de um torno?

Os resultados apresentados mostram que a trava injetada em material polimérico representa uma fração do valor necessário para a reposição da extremidade original em ZAMAK. O processo de produção e reposição da peça com o material ABS elimina a necessidade de etapas mais complexas e demoradas, como rebarbação, lixamento, jateamento, lavagem e galvanoplastia, o que reduz diretamente a quantidade de operadores envolvidos no processo e o número de horas de trabalho.

A peça de reposição em ABS ainda se mostrou mais durável, resistente e flexível que o material metálico, eliminando quase completamente o problema inicial de ruptura. O material utilizado é resistente o suficiente para se dobrar sem se romper. Sua montagem e fixação se tornaram mais fáceis e sua reposição é quase instantânea. Era esperado que quando utilizada de forma inadequada, a trava viria a se romper, mas isso não acontece. Devido à simplicidade de sua construção e emprego, a substituição pode ser realizada pelo próprio operador. O novo modelo elimina a necessidade de componentes adicionais, como calços de borracha, tubos e arruelas, e apresenta uma reposição rápida, otimizando os tempos de manutenção.

Considerando que cada escola utiliza em média dezoito tornos, com ao menos cinco chaves de segurança em cada máquina, o potencial de economia é substancial. A substituição do material metálico por peças injetadas em ABS mostrou-se, na prática, uma solução mais simples, mais econômica e com desempenho superior. Reduziu custos, facilitou a manutenção e aumentou a vida útil dos equipamentos sem comprometer a segurança.

Apesar dos resultados apresentados, algumas limitações devem ser consideradas. Os testes práticos concentraram-se em uma única unidade piloto, o que restringe a generalização imediata dos achados para toda a rede. Parte dos dados obtidos também teve como base relatos de professores e equipes de manutenção, o

que pode envolver certo grau de subjetividade. Ainda assim, os padrões de falha observados em diferentes unidades mostraram-se consistentes, e o uso complementar de protótipos e dados quantitativos reforça a confiabilidade dos resultados.

Esse estudo demonstra que a substituição do zamak por polímero ABS injetado é uma solução técnica e economicamente viável, com alto potencial de replicação em outros componentes eletromecânicos sujeitos a desgaste mecânico intenso, manuseio inadequado ou ciclos repetitivos de tensão. Peças como alavancas, suportes de fixação, gatilhos de segurança, travas de proteção e elementos de interface homem-máquina em equipamentos didáticos ou industriais podem se beneficiar diretamente dessa abordagem. A combinação de menor custo de produção, eliminação de pós-processos, maior durabilidade funcional e facilidade de reposição in loco constitui um modelo de inovação aplicável a diferentes contextos de manutenção preventiva e corretiva. Este estudo valida, portanto, a estratégia de redesenho de componentes com polímeros de engenharia como alternativa sustentável e eficiente ao uso de ligas metálicas em aplicações de baixa a média sollicitação estrutural, especialmente em ambientes educacionais e produtivos com alta rotatividade de peças.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 1043-1:2005 – Plásticos – Símbolos e abreviaturas – Parte 1: Material básico e características. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 12100:2013 – Segurança de máquinas – Princípios gerais de projeto – Avaliação e redução de riscos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13230:2008 – Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis – Identificação e simbologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D256-10 – Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

BAYER. Part and Mold Design - A Design Guide. Pittsburgh: Bayer, 2000

BARBIER, René. A pesquisa-ação. Brasília: Ed. Liber Livro, 2002.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução: Lino de Souza Rodrigues. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHANDA, Manas; ROY, Salil K. Plastics Technology Handbook. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

DELUMA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA - <https://deluma.com.br/> - Fundação de Alumínio – Zamak

EMISSIONES DE CO₂ EM PLÁSTICOS E COMPARAÇÃO LCA (usando Ecoinvent,): BRASKEM. Artigo: O plástico pode nos ajudar a reduzir as emissões de CO₂. São Paulo: Braskem, s.d. Disponível em: Acesso em: 2 nov. 2025. (Estudo LCA comparando emissões em fabricação/uso de plásticos vs. alternativas; enfatiza reduções em etapas como matéria-prima, ecoando os 0,005-0,007 kg CO₂e pro ABS reciclado.)

FATOR DE EMISSÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA (base pro cálculo de energia no processo): MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Brasília: MCTI, 2024. Disponível em: . Acesso em: 2 nov. 2025. (Atualiza o fator pra 0,0385 tCO₂/MWh ou 0,0385 kg/kWh, explicando reduções por

hidrelétricas/solares – alinha com os 0,0608 kg CO₂e de energia pros plásticos vs. mais pro Zamak.)

ÍNDICES DE CO₂ PARA MATERIAIS (inclui plásticos e metais em construção/manufatura, com Ecoinvent): DUARTE, V. et al. Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras. In: SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT, Porto, 2016. p. 927-934. Disponível em: . Acesso em: 2 nov. 2025. (Tabelas de emissões embutidas por kg de material, incluindo polímeros e ligas metálicas; bom pra validar altos valores do Zamak: 0,223-0,271 kg CO₂e na matéria-prima.)

LEDE MÁQUINAS. Torno Romi ID20. Disponível em: Torno Romi ID 20 A - L <https://www.ledemaquinas.com.br/torno-romi-id-20/ede> Máquinas 11 99649-9121

MERCADO LIVRE (Ebazar.com.br). Chave De Segurança Lingueta C/s Trava Torno Romi. Disponível em: NCTEC-AUTO https://nctec.mercadoshops.com.br/chave-de-seguranca-lingueta-cs-trava-torno-romi/up/MLBU2208495201?pdp_filters=category%3A1893%7Cseller_id%3A176969146%7Citem_id%3A3045484833 MAÇÃO

OPERATRIX. Torno Imor/Romi Anos 70. Disponível em: <https://www.operatrix.com.br/anuncio/torno-mecnico-imor-1500-x-520mm-12930>

PAUL, D.r.; ROBESON, L.m.. *Polymer nanotechnology: Nanocomposites*. Polymer, [S.I.], v. 49, n. 15, p.3187-3204, 2008.

PROINJET INDÚSTRIA PLÁSTICA LTDA - Injeção de produtos plásticos e embalagens

ROMI S/A https://peças.romi.com/c/TORMAX_20_A, 2025

SLACK, Nigel [et al]. Administração da Produção. São Paulo: Atlas, 1996

THIOLLENT, Michel. Metodologia da pesquisa-ação. 4. ed. São Paulo: Cortez, 1986.

TRIPP, David. Pesquisa-ação: uma teoria social para a prática. Educação e Pesquisa, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 443-466, set./dez. 2005.