



ANÁLISE DE TESTE DE IMPACTO CHARPY COM ESFERA DE AÇO VIA CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Luan de Souza Woginski¹

Vladimir Hartenias Gaidzinski²

João Mota Neto³

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para ensaios de impacto baseado no método Charpy, utilizando uma esfera de aço como corpo de impacto e um Controlador Lógico Programável (CLP) para controle e aquisição de dados. O sistema proposto tem como objetivo fornecer uma solução acessível, confiável e de alta repetibilidade para a caracterização de materiais cerâmicos, cuja avaliação de resistência ao impacto apresenta desafios específicos nos métodos tradicionais. A metodologia incluiu o desenvolvimento do dispositivo mecânico, a integração do CLP e da IHM, a programação das rotinas de cálculo do coeficiente de restituição com base na detecção sonora de impacto e repique da esfera, e a comparação dos resultados obtidos com os dados de referência fornecidos pelo Centro Cerâmico do Brasil (CCB). Os resultados demonstraram excelente concordância com os valores de coeficiente de restituição fornecidos pelo CCB para diferentes produtos cerâmicos, apresentando médias próximas e desvios padrão consistentemente baixos (0,00 a 0,02), o que confirma a alta repetibilidade e precisão do sistema desenvolvido. Além disso, a automação permitiu a eliminação de variabilidade humana e garantiu controle rigoroso das condições de ensaio, como altura de queda e detecção precisa do momento de impacto. Conclui-se que o sistema proposto é tecnicamente eficaz, economicamente viável e adequado tanto para uso acadêmico quanto para aplicações em laboratórios industriais de controle de qualidade, representando uma alternativa moderna para ensaios mecânicos de impacto em materiais frágeis.

Palavras-chaves: Ensaio Charpy, Controlador Lógico Programável, impacto, materiais cerâmicos, automação.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e científico tem ampliado a demanda por métodos precisos e eficientes de caracterização de materiais, especialmente no que se refere à avaliação de sua resistência ao impacto.

Em diversos setores industriais, como a construção civil, a engenharia automotiva e a aeroespacial, a segurança e o desempenho estrutural estão

¹ Graduando em Engenharia Mecatrônica. E-mail: luanwds28@gmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: vladimir.gaidzinski@satc.edu.br

³ Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: joão.neto@satc.edu.br



diretamente relacionados à capacidade dos materiais de absorver energia sem sofrer falhas catastróficas (Callister; Ratzlaff, 2021). Nesse contexto, ensaios de impacto, tais como o de Charpy ou Izod, desempenham papel fundamental por fornecer parâmetros importantes, como a tenacidade à fratura (ASTM, 2018), que são essenciais para a seleção adequada de materiais em projetos críticos.

Historicamente, o ensaio Charpy foi desenvolvido para a avaliação de metais, especialmente em ambientes de baixa temperatura, sendo reconhecido por sua eficiência em simular condições de choque (ASTM, 2018). Sua metodologia baseia-se na aplicação de um impacto controlado sobre uma amostra entalhada, medindo-se a energia absorvida durante a fratura (Callister; Ratzlaff, 2021). Com o passar do tempo, sua aplicação estendeu-se a outros tipos de materiais, como polímeros e ligas metálicas especiais (Shackelford, 2012). No entanto, a aplicação do método em materiais cerâmicos ainda enfrenta obstáculos, uma vez que essas substâncias apresentam características muito distintas dos metais, como alta rigidez e baixa tenacidade, o que pode tornar os resultados de impacto inconsistentes se métodos tradicionais forem aplicados sem devidas adaptações (Shackelford, 2012).

Além das limitações intrínsecas do método em relação a certos materiais, outro aspecto que merece atenção diz respeito à infraestrutura necessária para a realização dos ensaios. Segundo Goldenstein et al. (2020), equipamentos convencionais de impacto Charpy costumam ser de grande porte, com mecanismos de controle e aquisição de dados embutidos, o que restringe a customização por parte do usuário. Isso representa um desafio, sobretudo para instituições de ensino, laboratórios de pesquisa e pequenas empresas, que muitas vezes não dispõem de orçamento para aquisição e manutenção desses sistemas. Conforme destacado pela ASTM (2018), há, portanto, uma lacuna entre a demanda por ensaios confiáveis e acessíveis e a disponibilidade de soluções tecnológicas que atendam a esses critérios.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado para ensaio de impacto Charpy com esfera de aço, baseado em Controlador Lógico Programável (CLP), com foco na caracterização de materiais cerâmicos. O uso do CLP, amplamente adotado em sistemas industriais de automação permite a criação de um sistema modular e flexível, reduzindo custos de forma significativa, além de realizar medições com alta repetibilidade e facilitar a



integração com softwares de aquisição e análise de dados. A escolha de uma esfera de aço como agente de impacto visa também a facilitar o controle das variáveis envolvidas no teste, bem como aumentar a fidelidade das condições de impacto simuladas.

O objetivo central desta pesquisa é desenvolver um sistema de ensaio de impacto alternativo que seja tecnicamente eficaz, economicamente viável e adaptável a diferentes contextos de aplicação, especialmente no estudo de materiais frágeis, como as cerâmicas. Com isso, pretende-se não apenas atender às demandas acadêmicas e laboratoriais, mas também contribuir para o avanço das técnicas de caracterização mecânica, com um enfoque moderno e acessível. Os objetivos específicos incluem: implementar e testar a automação via CLP; adaptar o método Charpy para materiais cerâmicos; comparar os resultados obtidos com os de métodos tradicionais; e analisar o comportamento dos materiais sob condições controladas de impacto.

A relevância da pesquisa reside em sua proposta de integrar tecnologias de automação ao campo da engenharia de materiais, oferecendo uma solução experimental com potencial de aplicação em ambientes laboratoriais e industriais. Ao mesmo tempo, propicia avanços significativos em termos de ensino, pesquisa e aplicação prática. Espera-se, que, o sistema desenvolvido tenha o potencial de se consolidar como uma ferramenta eficaz para a análise mecânica de materiais, especialmente em instituições de ensino e centros de pesquisa com recursos limitados, ao mesmo tempo em que contribua para a formação de profissionais mais capacitados a atuar na interface entre controle, ciência dos materiais e automação.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

A escolha dos materiais e dispositivos utilizados no sistema foi realizada com base em critérios de confiabilidade, compatibilidade e disponibilidade no mercado. De acordo com Reis e Lima (2017), a utilização de componentes já conhecidos e empregados no ambiente industrial contribui significativamente para a robustez do projeto, além de facilitar procedimentos de manutenção e capacitação



técnica. Por isso, optou-se por componentes que já são amplamente empregados na empresa onde a máquina de ensaios foi desenvolvida, o que garante não apenas maior familiaridade da equipe técnica com os equipamentos, mas também simplifica as rotinas de manutenção corretiva e preventiva do sistema.

Além disso, a padronização de dispositivos com aqueles já utilizados na planta industrial contribui para a otimização do estoque de peças de reposição e reduz o tempo de resposta em eventuais paradas de máquina (Reis; Lima, 2017). Essa abordagem estratégica visa assegurar a continuidade operacional, minimizar custos com aquisição de itens sob demanda e promover maior eficiência no processo de substituição de componentes, sempre que necessário.

Com base nesses critérios, a seguir apresenta-se uma análise técnica dos principais componentes utilizados na construção do sistema, destacando suas funções, características e justificativas para a escolha de cada um deles.

O projeto visa à análise e desenvolvimento de um sistema automatizado de testes de impacto, utilizando diversos dispositivos e componentes da área de automação industrial. A seleção e integração desses componentes foram realizadas de forma criteriosa, de modo a garantir a eficácia e confiabilidade do sistema. A seguir, será apresentada uma descrição detalhada dos principais dispositivos empregados, com ênfase em suas características técnicas, aplicações e justificativas de uso no contexto do trabalho.

O CLP escolhido para compor o sistema é o modelo CP2E-N30DT1-D, fabricado pela OMRON. Este destaca-se por sua robustez, flexibilidade e confiabilidade, sendo amplamente utilizado em processos industriais que requerem controle preciso de entradas e saídas digitais, com tempo de resposta em torno de 1 a 5 ms. O modelo possui 18 entradas digitais e 12 saídas transistorizadas, o que proporciona uma quantidade adequada de canais para a implementação das funcionalidades desse projeto. Além disso, o CP2E oferece comunicação via USB e Ethernet, facilitando a programação e a integração com outros dispositivos, como Interfaces Homem-Máquina (IHM) e computadores (OMRON, 2021).

A escolha por um CLP da marca OMRON também se deve ao seu amplo suporte técnico, à disponibilidade de literatura especializada e à compatibilidade com o software de programação CX-Programmer, que possui tanto uma versão gratuita com funcionalidades limitadas quanto uma versão paga com recursos completos. Na



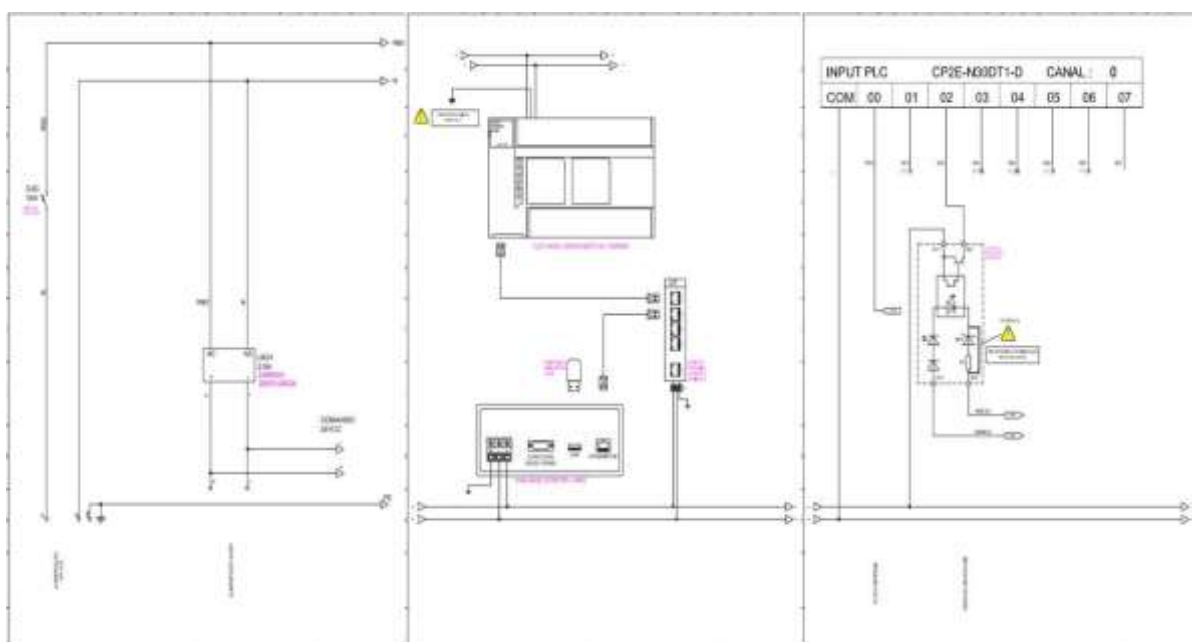
empresa onde o projeto foi desenvolvido, adota-se o uso exclusivo de softwares licenciados, motivo pelo qual foi utilizada a versão paga. Ainda assim, a existência de uma alternativa gratuita representa um diferencial importante, especialmente para fins acadêmicos e testes preliminares. Dessa forma, o CLP atua como a unidade central de processamento do sistema automatizado, sendo responsável pela coordenação das ações e respostas com base na interpretação dos sinais provenientes dos sensores e no controle dos atuadores.

A IHM utilizada no projeto é o modelo WEG MT8071iP, caracterizada por oferecer uma plataforma de visualização gráfica para interação entre o operador e o sistema de controle. O equipamento dispõe de uma tela sensível ao toque de 7 polegadas, com resolução de 800x480 pixels e suporte para até 65 mil cores, proporcionando adequada definição e legibilidade das informações de processo. Este modelo apresenta interfaces de comunicação Ethernet e serial (RS232/RS485), viabilizando a integração com CLPs e demais dispositivos industriais compatíveis.

No escopo do presente sistema, a IHM é responsável pela exibição em tempo real das variáveis monitoradas, registro dos dados obtidos nos ensaios e disponibilização de comandos operacionais diretamente na interface gráfica. Adicionalmente, o dispositivo permite a visualização e consulta a históricos de eventos e ensaios, funcionalidades que contribuem para a rastreabilidade e a integridade dos testes aplicados. A escolha deste modelo está associada à compatibilidade com múltiplos protocolos de comunicação industrial, à robustez do equipamento e à disponibilidade do ambiente de desenvolvimento EasyBuilder Pro, fornecido gratuitamente pela Weintek Labs, o qual apresenta uma interface de programação gráfica acessível e compatível com os requisitos do projeto.

A Figura 1 ilustra as páginas do esquema elétrico do sistema, detalhando a interligação entre a IHM, o CLP, a fonte de alimentação, o sensor sonoro KY-038 e os demais componentes, permitindo uma visão clara da arquitetura de hardware implementada.

Figura 1 – Esquema elétrico e eletrônico de parte do projeto.



Fonte: Do autor (2021)

No que tange à comunicação entre os dispositivos de controle, foi utilizado um switch industrial da marca Phoenix Contact, modelo SFNB 5TX. Este componente é responsável pela interligação de dispositivos em rede Ethernet, possibilitando a troca de dados entre o CLP, a IHM e outros dispositivos que compõem o sistema. O modelo possui cinco portas RJ45 com taxa de transferência de até 100 Mbps, sendo adequado para aplicações industriais que demandam comunicação rápida e estável. Além disso, trata-se de um dispositivo de montagem em trilho DIN, com encapsulamento robusto e apropriado para ambientes industriais.

Para o armazenamento local de dados e registros do sistema, foi utilizado um pen drive da marca Kingston, com capacidade de 16 Gb. Este dispositivo tem como principal função registrar os resultados dos testes realizados, possibilitando a análise posterior dos dados, seja para fins estatísticos, de rastreabilidade ou para controle de qualidade. O pen drive é conectado diretamente à IHM, que, por sua vez, é programada para exportar os dados automaticamente, criando arquivos em formato .CSV ou .TXT.

Outro componente relevante é o acoplador óptico, modelo RSO 24 VCC da marca Conexel. Este dispositivo tem como função isolar eletricamente os circuitos de controle e potência, garantindo maior segurança ao sistema e proteção contra ruídos



e interferências eletromagnéticas. Os acopladores ópticos funcionam por meio da emissão de luz por um LED interno, que é captada por um fototransistor, promovendo a comutação sem contato físico entre os circuitos. No projeto, foi utilizado em pontos estratégicos do sistema, principalmente na interface entre o sensor de som KY-038 e o CLP.

No que se refere à captação de sinais sonoros, foi utilizado o sensor de som KY-038, um módulo amplamente empregado em projetos de automação e robótica. Este sensor é composto por um microfone de eletreto, um comparador operacional LM393 e um potenciômetro para ajuste de sensibilidade. Sua principal função é detectar a presença de som no ambiente, sendo capaz de gerar um sinal digital quando o nível sonoro ultrapassa um determinado limiar. No contexto do projeto, o sensor é responsável por identificar o som gerado no instante do impacto da esfera com o corpo de prova, sinalizando para o sistema que já existem variáveis necessárias para serem iniciados os cálculos relacionados à determinação dos parâmetros do ensaio.

Para assegurar a alimentação estável dos componentes eletrônicos, foi utilizado um regulador de tensão do tipo 7805. Este dispositivo tem a função de converter uma tensão de entrada superior, como 12 V, para uma saída estabilizada de 5 V, sendo adequado para alimentar circuitos que requerem baixa tensão, como sensores e módulos lógicos. O regulador 7805 pertence à família de reguladores lineares 78xx, sendo amplamente empregado em circuitos eletrônicos devido à sua confiabilidade e simplicidade de implementação. Mesmo apresentando uma variação de até $\pm 4\%$ em relação ao valor nominal, especialmente sob diferentes condições de carga e temperatura, a tensão de saída do regulador se mantém dentro de limites aceitáveis para a alimentação de circuitos como o sensor KY-038. Essas variações encontram-se dentro das tolerâncias previstas para o projeto, não comprometendo o desempenho ou a precisão do sistema.

Em conjunto com capacitores de desacoplamento, o regulador de tensão utilizado garante uma alimentação estável e livre de ruídos e oscilações, proporcionando proteção adicional aos circuitos alimentados. No presente projeto, o regulador 7805 foi empregado para fornecer uma tensão estável de 5 V à placa do sensor de som KY-038, assegurando o funcionamento adequado do componente. Vale destacar que, em aplicações alternativas ou em módulos comerciais de sensores



semelhantes, é comum a utilização de reguladores do tipo AMS1117, especialmente em versões LDO (Low Dropout), devido à sua capacidade de operar com tensões de entrada mais próximas à tensão de saída, o que reduz perdas e permite integração em placas compactas. No entanto, para este sistema específico, optou-se pela solução com o 7805, em função da simplicidade e robustez necessárias ao ensaio mecânico desenvolvido.

A conexão entre o sensor KY-038 e o CLP foi realizada por meio de conectores M12, amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez, resistência à vibração e facilidade de conexão e desconexão. A padronização dos conectores M12 permite a montagem de chicotes organizados e seguros, facilitando a manutenção do sistema e a substituição de componentes. No projeto, os conectores M12 foram utilizados para facilitar a manutenção e substituição do sensor de som, que, para aumentar sua durabilidade, foi encapsulado em uma estrutura de polímero de poliamida 6, também conhecido como nylon 6 ou tecnil, que possui alta resistência mecânica, química e a abrasão, baixo coeficiente de atrito e resistente a impactos e vibrações.

Para alimentar todo o sistema com uma fonte de energia, foi utilizada a fonte OMRON modelo S8VE-06024, com saída de 24 Vcc e potência de 60 W. Esta fonte é do tipo chaveada, oferecendo alta eficiência energética, proteção contra sobrecorrente, sobretensão e curto-circuito. Sua saída de 24 Vcc é compatível com a maioria dos dispositivos industriais utilizados no projeto, incluindo o CLP, o eletroímã e o acoplador óptico.

O eletroímã, modelo EM-2530-24V, é responsável por reter a esfera de aço-cromo de 19 ($\pm 5\%$) mm na posição inicial antes do ensaio. Ao receber um comando do CLP, o eletroímã é desenergizado, liberando a esfera para que ela caia sobre a amostra. A escolha deste componente foi baseada em sua força de retenção adequada para a massa da esfera que é utilizada e em sua compatibilidade com a tensão de alimentação de 24 Vcc fornecida pela fonte.

2.2 ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)

A avaliação da resistência ao impacto é um requisito essencial para garantir a segurança, qualidade e durabilidade de diversos materiais, especialmente os



cerâmicos, amplamente utilizados em revestimentos, utensílios, telhas e componentes estruturais. Para padronizar essa avaliação, a norma NBR 10545-5 (ABNT, 2017) estabelece diretrizes técnicas específicas para ensaios de impacto em placas cerâmicas, abordando tanto o tradicional ensaio Charpy quanto o método do coeficiente de restituição por queda de esfera.

O ensaio Charpy tradicional consiste em submeter um corpo de prova entalhado a um impacto provocado por um martelo pendular, registrando-se a energia absorvida até a fratura do material — método amplamente utilizado para metais e polímeros, que avalia a tenacidade e o comportamento frente a impactos súbitos. Entretanto, para materiais cerâmicos, devido à sua natureza frágil e elevada susceptibilidade à formação de trincas, adaptações metodológicas são necessárias tanto no preparo dos corpos de prova quanto nas condições de ensaio, a fim de mensurar a resistência ao impacto sem comprometer prematuramente a integridade estrutural do material.

Entre essas adaptações, destaca-se o uso da esfera de aço como corpo de impacto, caracterizando uma variação do próprio ensaio Charpy, na qual a avaliação é realizada de forma indireta por meio do cálculo do coeficiente de restituição obtido pela queda da esfera sobre o corpo de prova cerâmico. Esta metodologia, prevista na NBR 10545-5, permite aferir a capacidade do material de dissipar ou conservar energia durante o impacto, sendo especialmente indicada para materiais frágeis que não suportariam as condições do ensaio Charpy convencional.

A NBR 10545-5 tem papel central na garantia do desempenho e conformidade dos materiais cerâmicos, ao definir critérios metodológicos e técnicos que asseguram que os dados obtidos nos ensaios são confiáveis, consistentes e representativos do comportamento real dos produtos em diferentes condições de uso, incluindo variações de temperatura, umidade e cargas mecânicas. Além de avaliar a resistência ao impacto propriamente dita, a norma exige atenção à homogeneidade do material e à exclusão de amostras com defeitos visíveis, prevenindo assim que resultados sejam comprometidos por falhas não representativas.

O ensaio Charpy, tradicionalmente voltado a metais, mede a energia absorvida durante a fratura de um corpo entalhado submetido a um golpe de pêndulo (ASTM, 2018), indicando a tenacidade do material — ou seja, sua capacidade de absorver energia sem fraturar sob impacto repentino. Apesar de ser padrão em



metais, a aplicação direta do Charpy em cerâmicas se revela desafiadora, dada a fragilidade inerente desses materiais. Por isso, a norma também contempla o método da queda de esfera, no qual uma esfera de aço é deixada cair de altura controlada sobre a amostra, simulando impactos mais próximos dos que ocorrem em condições reais de uso, como o choque de granizo em telhas cerâmicas.

Esse tipo de procedimento é frequentemente utilizado e normatizado para sistemas de coberturas, sendo tratado especificamente na NBR 15575-5, que estabelece requisitos de desempenho para edificações habitacionais. Já no caso de revestimentos cerâmicos, a avaliação por queda de esfera é recomendada e detalhada pela NBR 10545-5, que inclui, além do registro de eventuais danos visuais, a medição do coeficiente de restituição. Este parâmetro fornece uma indicação quantitativa da energia devolvida após o impacto, funcionando como um indicador da capacidade do material de resistir ao choque sem absorver energia excessiva que provoque fratura. Essa abordagem abrange a avaliação tradicional da absorção de energia, permitindo tanto a análise visual quanto a obtenção de dados quantitativos diretamente relacionados ao desempenho mecânico do material.

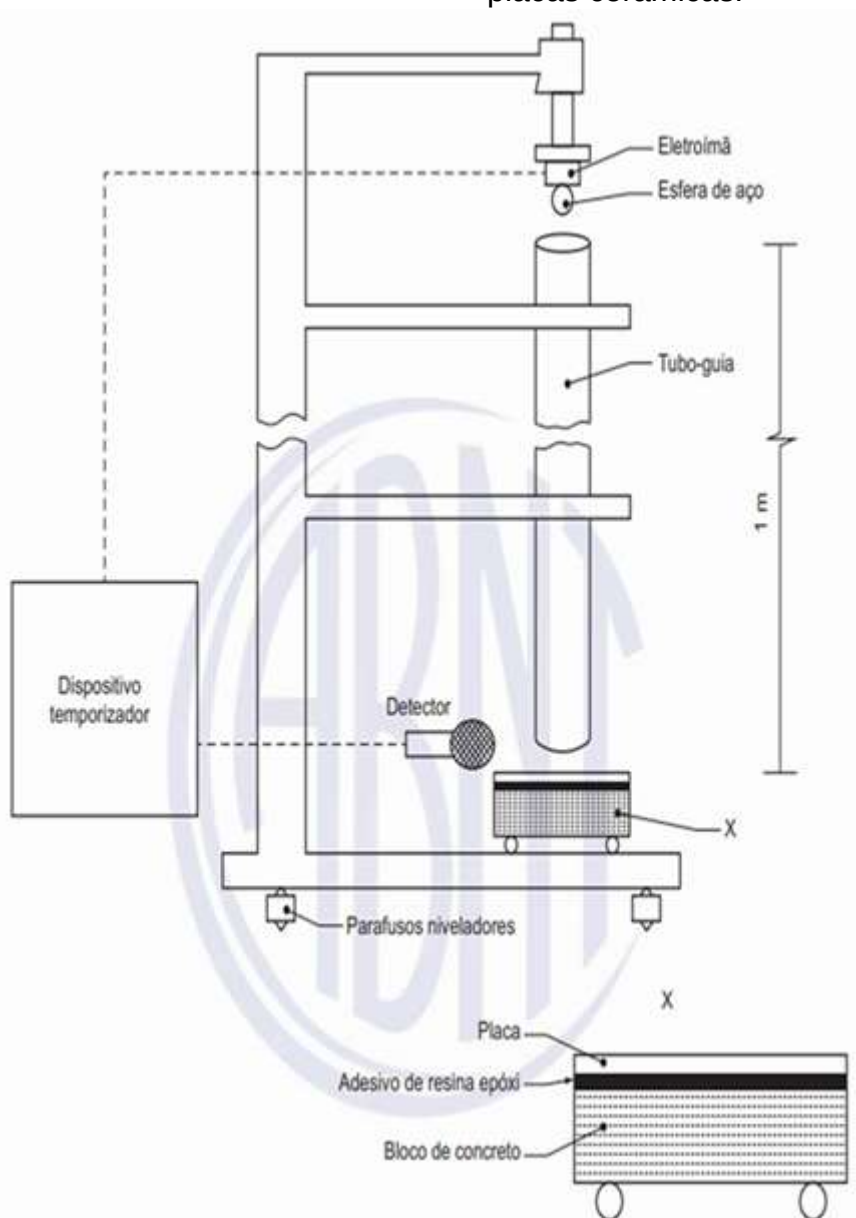
Para garantir a representatividade dos ensaios, a NBR 10545-5 especifica dimensões mínimas das amostras, características físicas e condições ambientais rigorosas, bem como recomenda o uso de métodos estatísticos para validação dos resultados. A documentação detalhada de todos os procedimentos, desde a preparação das amostras até a análise dos dados, assegura rastreabilidade e transparência, aspectos fundamentais para a avaliação de conformidade por parte de fabricantes, laboratórios de ensaio e órgãos fiscalizadores.

A padronização das definições e terminologia técnica, como "tenacidade", "energia de fratura", "coeficiente de restituição" e "zona de deformação", assegura entendimento uniforme e comparabilidade entre diferentes produtos, fabricantes e profissionais, estimulando o intercâmbio de informações técnicas e o constante aprimoramento das práticas em engenharia de materiais cerâmicos (Goldenstein et al., 2020).

No presente projeto, inspirou-se nos procedimentos da ABNT NBR 10545-5, especialmente na adaptação do princípio do impacto controlado por queda livre de uma esfera, propondo um sistema mais flexível, automatizado e padronizado para os ensaios. A Figura 2 ilustra o dispositivo proposto pela norma e utilizado neste estudo,

evidenciando a configuração empregada no método da queda de esfera. Isso contribui para maior repetibilidade nos resultados e reforça o alinhamento do método com as tendências de controle experimental e garantia de qualidade, conforme evidenciado na literatura (Martinez, 2016; Teixeira, 2017).

Figura 1 - Dispositivo normativo para determinação da resistência ao impacto em placas cerâmicas.



Fonte: ANBT NBR 10545-5 (2017, p.2)



2.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA E CÁLCULOS

O desenvolvimento do sistema automatizado para ensaios de impacto em materiais cerâmicos foi fundamentado nos critérios técnicos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 10545-5:2017, que define o procedimento para determinação da resistência ao impacto por meio da medição do coeficiente de restituição em placas cerâmicas. Essa norma estabelece os parâmetros essenciais para garantir que os ensaios sejam realizados de forma confiável, padronizada e com reprodutibilidade, assegurando a conformidade com requisitos técnicos internacionais.

Diferentemente dos ensaios mecânicos estáticos, como tração ou compressão, o ensaio de impacto visa avaliar o comportamento do material frente a cargas dinâmicas de alta velocidade, possibilitando a análise de propriedades como resiliência, tenacidade e comportamento à fratura, aspectos fundamentais para materiais frágeis como os cerâmicos (Callister, 2018). Tais materiais, por possuírem ligações predominantemente iônicas e covalentes em sua estrutura cristalina, apresentam elevada dureza e resistência à compressão, porém uma limitada capacidade de deformação plástica e absorção de energia antes da fratura, o que os torna propensos à ruptura súbita quando submetidos a esforços de impacto (Barsoum, 2019).

Diante disso, foi concebido e implementado um dispositivo de teste automatizado que possibilita a execução de ensaios de impacto com base na metodologia descrita pela NBR 10545-5. O sistema foi desenvolvido com o uso de um Controlador Lógico Programável (CLP) OMRON CP2E-N30DT1-D, programado no ambiente CX-Programmer, utilizando as linguagens Ladder e Texto Estruturado (Structured Text — ST), conforme definido pela norma internacional IEC 61131-3, que regula as linguagens padronizadas para programação de controladores industriais.

A escolha pela linguagem Ladder se justifica por sua representação gráfica de fácil interpretação, amplamente utilizada em ambientes industriais, além de permitir o controle sequencial das operações de forma clara e eficiente. Nela foram implementadas as rotinas de controle do sensor de som KY-038, utilizado para captar o ruído gerado pelo impacto da esfera de aço na amostra cerâmica, bem como os comandos de liberação da esfera, contagem de ciclos e verificações de segurança

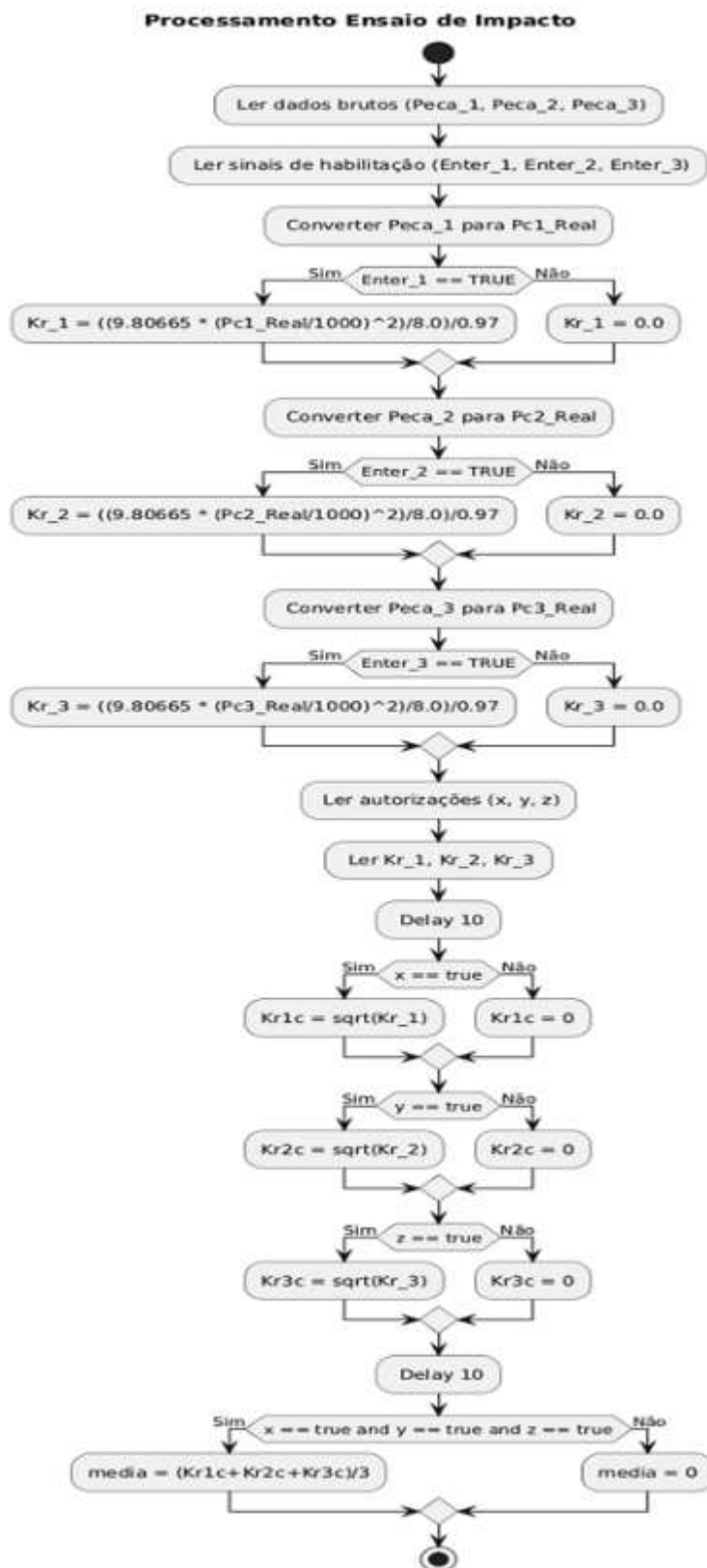


para execução do ensaio. Complementarmente, a linguagem Texto Estruturado foi empregada para o desenvolvimento de algoritmos responsáveis pelo processamento matemático e pelas rotinas de cálculo envolvidas nos ensaios. Nessa etapa, foram codificados os blocos responsáveis pelo cálculo da energia de impacto (em Joules), levando em consideração o tempo entre o disparo da esfera e o momento da detecção sonora do impacto, além da massa e altura do sistema. Também foram implementadas temporizações precisas, rotinas de normalização de variáveis, filtros digitais para mitigação de ruídos e tratamento de sinais, permitindo maior confiabilidade na medição dos dados adquiridos pelo sistema. Esse tipo de abordagem está alinhado com as boas práticas de instrumentação e controle digital, que requerem robustez no tratamento de sinais sensíveis (Ogata, 2010).

Para viabilizar a interação eficiente entre o operador e o sistema de ensaio, foi incorporada ao projeto uma Interface Homem-Máquina (IHM) Weintek MT8071iP, equipada com tela sensível ao toque de 7 polegadas e comunicação via protocolo Ethernet FINS/TCP, assegurando integração confiável com o CLP da OMRON. A interface foi desenvolvida com foco na usabilidade e clareza, apresentando em tempo real os principais parâmetros do processo, como valor da energia de impacto (em Joules), tempo de resposta do sistema (em segundos), coeficiente de restituição, número de ciclos realizados, além de ID da amostra, bitola do corpo de prova e campos para inserção de observações técnicas.

Após a apresentação das principais etapas e rotinas de controle desenvolvidas, a Figura 2 exibe o fluxograma detalhado do funcionamento do sistema automatizado dos ensaios de impacto. O diagrama apresenta, de modo sequencial e integrado, o processo desde a preparação do dispositivo, liberação e detecção do impacto, até o registro e análise dos dados pela automação. Esse recurso visual facilita a compreensão do fluxo lógico entre a operação mecânica, a leitura dos sensores, o controle via CLP e o processamento dos resultados na IHM.

Figura 2 - Fluxograma do processo automatizado dos ensaios, detalhando as principais etapas do sistema .



Fonte: Do autor (2025)



Também foram incluídas mensagens orientativas que conduzem o usuário durante cada etapa do procedimento, assegurando a correta execução do ensaio mesmo por operadores com experiência limitada.

O layout da IHM foi planejado de modo a oferecer uma operação intuitiva e segura. Botões específicos permitem preparar, iniciar e cancelar o teste, bem como salvar os valores adquiridos, enviar os dados diretamente para um dispositivo USB conectado à porta da IHM, armazenar localmente os resultados ou enviá-los a um computador para análises posteriores. Esses recursos possibilitam a rastreabilidade dos ensaios e a construção de um banco de dados técnico, útil para validações estatísticas, emissão de laudos e estudos comparativos. Adicionalmente, a interface realiza uma verificação cruzada dos dados transmitidos pelo CLP, reforçando a robustez do sistema por meio de mecanismos de redundância e validação de integridade dos dados.

Visando garantir a validade dos resultados obtidos e comprovar a precisão do sistema desenvolvido, foi incluída na metodologia uma etapa de validação experimental por comparação direta com dados de referência fornecidos pelo Centro Cerâmico do Brasil (CCB). Esta instituição, reconhecida pela certificação de produtos cerâmicos, disponibilizou coeficientes de restituição médios e desvios padrão para diferentes tipos de revestimentos cerâmicos. Assim, os valores medidos pelo sistema automatizado desenvolvido foram comparados com estes dados oficiais, permitindo avaliar a acurácia, a reprodutibilidade e a confiabilidade do equipamento em condições reais de ensaio. Esta abordagem reforça a robustez metodológica do projeto, conferindo maior credibilidade aos resultados apresentados e demonstrando o potencial do sistema para aplicação em ambientes acadêmicos e industriais.

Essa configuração garante ao sistema não apenas um elevado grau de automação, mas também uma plataforma amigável e confiável, essencial para ambientes laboratoriais e industriais que demandam agilidade, precisão e documentação dos resultados conforme critérios normativos e boas práticas de engenharia.

Toda a estrutura do sistema foi organizada com foco em robustez, modularidade e precisão. A comunicação entre o CLP e a IHM foi viabilizada por meio de um switch Ethernet industrial Phoenix Contact SFNB 5TX, garantindo baixa latência na troca de dados e maior imunidade a interferências eletromagnéticas comuns em



ambientes industriais. A alimentação do sistema foi feita com uma fonte OMRON S8VE-06024, devidamente protegida com disjuntores e supressores de surto. O painel foi montado com conectores padrão M12 para facilitar manutenção e substituição de componentes. O uso de boas práticas de cabeamento e aterramento também foi observado, conforme recomendado por normas de segurança e confiabilidade de sistemas de automação.

Essa abordagem sistêmica e embasada em normas técnicas reconhecidas garante não apenas a conformidade com requisitos acadêmicos e industriais, mas também assegura que os dados obtidos nos ensaios possam ser utilizados como base para futuras investigações científicas ou aplicações práticas em ambientes produtivos. A aplicação de conceitos interdisciplinares envolvendo materiais, automação e instrumentação digital ressalta o potencial do sistema como ferramenta de apoio ao desenvolvimento e à caracterização de novos materiais cerâmicos de alto desempenho (Kroenke; Auer, 2021).

2.3.1 Cálculos

A máquina de ensaio possui um guia cilíndrico para a queda livre da esfera de aço, assegurando a verticalidade e a repetibilidade da trajetória de impacto, o que é muito importante para a realização e dos cálculos. A altura de 1 metro para a queda da esfera foi fixada e determinada durante a montagem da máquina de ensaio, sendo verificada por meio de um paquímetro analógico de 1000 mm de capacidade, com resolução de 0,02 mm. Este instrumento é amplamente utilizado no setor cerâmico e, devidamente calibrado, apresenta uma margem de erro máxima especificada pelo fabricante de $\pm 0,04$ mm, além de incerteza de medição compatível com a aplicação, garantindo elevado grau de precisão e confiabilidade nas medições. A escolha dessa altura permite que a energia de impacto aplicada à amostra seja controlada e replicável, possibilitando a análise dos efeitos dessa energia sobre as propriedades do material investigado.

A energia potencial inicial ($E_{p\text{inicial}}$) da esfera de massa m ($\approx 28,25\text{g}$), liberada de uma altura h_{inicial} (em metros), sob a ação da gravidade g ($\approx 9,81\text{ m/s}^2$), é calculada pela equação (1):



$$E_{\text{p inicial}} = m \times g \times h_{\text{inicial}} \quad (1)$$

No instante do impacto com a amostra, essa energia potencial é convertida em energia cinética. Parte dessa energia é absorvida pela amostra durante o processo de fratura (denominada Energia Absorvida, W), enquanto o restante é dissipado em outras formas, como som, calor, vibração e energia cinética residual da esfera e dos fragmentos da amostra.

Entretanto, no sistema desenvolvido, a energia absorvida W não é obtida diretamente, como ocorre no ensaio Charpy tradicional, no qual a diferença entre as alturas antes e após o impacto permite calcular a energia efetivamente transferida à amostra. No presente projeto, é monitorado o tempo de queda da esfera, por meio da detecção sonora do impacto, bem como as condições geométricas e físicas do sistema (massa da esfera e altura de queda). Ressalta-se, porém, que o tempo de queda livre não fornece, por si só, informações diretas sobre a energia absorvida pela amostra, servindo apenas como parâmetro de verificação do correto funcionamento do sistema de liberação e da trajetória da esfera.

Para determinar a energia absorvida pela amostra de modo indireto, seria necessário o desenvolvimento de um modelo físico-matemático específico, que correlacione variáveis mensuráveis (como força de impacto, deformação do corpo de prova ou velocidade residual da esfera) com a energia dissipada no processo de fratura. Tal modelagem requer calibração experimental rigorosa e validação estatística para assegurar a confiabilidade dos resultados. Portanto, na presente fase do projeto, a quantificação direta da energia absorvida não é realizada; o sistema limita-se a garantir a repetibilidade e o controle das condições iniciais de impacto.

No que se refere à instrumentação do sistema, destaca-se a utilização de um sensor sonoro KY-038, cuja função principal é a de atuar como elemento de detecção do instante do impacto da esfera com o corpo de prova. O sensor capta o ruído gerado pela colisão e envia um sinal ao CLP, permitindo o registro do momento exato do evento. É importante salientar que o sensor sonoro não atua como dispositivo de acionamento do processo de queda ou de liberação da esfera, mas sim como um recurso auxiliar de monitoramento para validação do tempo de queda e verificação da ocorrência do impacto. Essa estratégia possibilita que o sistema de automação registre com o instante do impacto para fins de análise posterior, sem interferir



diretamente na dinâmica do ensaio. Dessa forma, a automação garante a repetibilidade das condições de teste (altura de queda, liberação da esfera) e a confiabilidade do registro temporal do impacto detectado sonoramente, contribuindo para o controle dos parâmetros experimentais do sistema.

2.3.2 Processamento de Dados e Cálculos Implementados

O Controlador Lógico Programável (CLP) OMRON CP2E-N30DT1-D, programado em linguagens Ladder e Texto Estruturado (ST) conforme a norma IEC 61131-3, não apenas gerencia a sequência do ensaio (liberação da esfera, detecção do impacto), mas também executa rotinas de processamento de dados e cálculos específicos, conforme configurado para a aplicação original na empresa onde foi desenvolvido. A seguir, detalham-se os cálculos implementados, ressaltando-se que a justificativa física ou a aplicabilidade direta de algumas fórmulas ao ensaio de impacto Charpy adaptado podem necessitar de validação ou contextualização adicional.

2.3.2.1 Leitura, Validação e Processamento Inicial de Coeficientes

Uma das rotinas implementadas no CLP envolve a aquisição, o processamento e o armazenamento de variáveis denominadas

Estes coeficientes correspondem a parâmetros relacionados ao coeficiente de restituição do sistema, utilizado como indicador do comportamento elástico da colisão entre a esfera de aço e o corpo de prova durante o ensaio de impacto.

O coeficiente de restituição (geralmente representado pela variável e na literatura especializada) é uma grandeza adimensional que expressa a razão entre a velocidade relativa de separação e a velocidade relativa de aproximação dos corpos em colisão. No presente projeto, as variáveis $Kr1$, $Kr2$, e $Kr3$ foram definidas com o objetivo de representar empiricamente diferentes condições ou ajustes experimentais do sistema, relacionados à dissipação de energia e à resposta do material ensaiado. Estes coeficientes podem ser empregados, por exemplo, em modelagens físico-matemáticas do impacto ou em cálculos auxiliares para estimativa da energia residual do sistema após a colisão.



A implementação destes parâmetros no CLP permite a realização de ajustes dinâmicos ou calibrações conforme as características específicas do corpo de prova ou do método experimental adotado, contribuindo para o controle da precisão e da repetibilidade dos ensaios realizados. Estes valores são lidos de um bloco de função específico (via estrutura *GetData*), sugerindo que podem ser parâmetros de entrada ou resultados de algum processamento intermediário no sistema de controle.

Após a aquisição, aplica-se a função de raiz quadrada (*SQRT*) a cada um desses coeficientes. A utilização da raiz quadrada pode indicar a necessidade de linearizar uma relação quadrática, ajustar a escala dos valores para análise ou corresponder a uma etapa em um cálculo físico específico (por exemplo, relacionado a velocidades ou energias).

Posteriormente, realiza-se uma validação lógica (utilizando variáveis booleanas auxiliares *x*, *y*, *z*). Se um coeficiente (*Kr* após a raiz quadrada) for considerado válido segundo critérios predefinidos no programa, seu valor é armazenado; caso contrário, é zerado. Esta etapa é crucial para garantir a integridade dos dados, descartando valores inválidos ou fora de uma faixa esperada antes de cálculos subsequentes.

2.3.1.2 Cálculos da Média

Se todos os três coeficientes (*Kr1*, *Kr2*, e *Kr3* após a validação) forem considerados válidos, o CLP calcula a média aritmética simples entre eles, conforme a equação (2):

$$m\acute{e}dia = \frac{Kr1 + Kr2 + Kr3}{3} \quad (2)$$

Esse valor médio é então disponibilizado no sistema, registrados para uso na lógica de controle e exibidos na IHM. O cálculo da média é uma prática comum para obter um valor representativo a partir de múltiplas leituras ou parâmetros.



2.3.1.3 Conversão e cálculos matemáticos

Outra rotina de cálculo implementada no sistema envolve variáveis de entrada denominadas, $Peça_1$, $Peça_2$ e $Peça_3$, que são inicialmente do tipo inteiro (INT). Para permitir operações matemáticas com maior precisão, especialmente aquelas envolvendo divisões ou constantes não inteiras, o CLP realiza a conversão destes valores para o tipo real (REAL) por meio da função INT_TO_REAL . Essa conversão é fundamental para assegurar a fidelidade dos cálculos subsequentes.

Logo em seguida, nesta mesma etapa, utiliza-se, da equação de coeficiente de restituição para produtos cerâmico, conforme apontado a seguir na equação (3):

$$hr = \frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \quad k = \sqrt{\frac{hr}{h1}} \quad (3)$$

Onde:

hr = Representa a altura de restituição (em cm), corresponde à altura máxima que a esfera atinge após o primeiro impacto e antes de iniciar o repique;

g = Aceleração da gravidade, considerada como $9,80665 \text{ m/s}^2$;

Δt = É o intervalo de tempo entre dois impactos sucessivos (segundos);

K = Coeficiente de restituição, que indica a capacidade do material em conservar energia após o impacto;

$h1$ = Altura de inicial de queda (cm).

Essa formulação baseia-se na cinemática do movimento vertical uniformemente acelerado, considerando a ação exclusiva da gravidade. O intervalo de tempo Δt , medido experimentalmente por meio do sensor sonoro KY-038 que detecta tanto o primeiro impacto da esfera com o corpo de prova quanto o repique subsequente, é utilizado para calcular a altura de restituição hr , correspondente ao ponto mais alto alcançado pela esfera após o rebote.

O coeficiente de restituição K , determinado a partir da razão entre hr e $h1$, representa uma medida adimensional das perdas de energia ocorridas durante o impacto, sendo um parâmetro amplamente utilizado na caracterização de materiais



cerâmicos, conforme descrito na literatura técnica (Callister, 2007). O valor de K assim calculado reflete as propriedades mecânicas do corpo de prova, especialmente sua capacidade de dissipação de energia durante o impacto.

Para garantir maior eficácia e precisão nos cálculos executados pelo CLP, foram implementadas manipulações algébricas específicas. Entre elas, destaca-se a criação de constantes auxiliares utilizadas para multiplicar o valor de Δt , ampliando o número de casas decimais durante os cálculos internos. Essa estratégia contorna limitações da precisão numérica dos controladores lógicos programáveis, permitindo o processamento de valores com maior detalhamento, o que contribui para aprimorar a precisão do coeficiente de restituição final.

Finalmente, a execução destes cálculos é condicionada ao estado de variáveis de controle ($Enter_1$, $Enter_2$, $Enter_3$). Se a condição associada não for atendida, o coeficiente correspondente (K_{ri}) recebe o valor zero. Este mecanismo de controle assegura que os cálculos só ocorram sob circunstâncias apropriadas, como a presença de uma peça válida ou um comando de início.

Em suma, o CLP executa um conjunto de operações matemáticas que incluem leitura de dados, validações lógicas, conversões de tipo, cálculo de raiz quadrada, média e aplicação de uma fórmula específica. A implementação destas rotinas no CLP demonstra a capacidade do sistema automatizado em realizar processamento de dados de forma consistente e controlada, o que é uma vantagem significativa para a padronização e confiabilidade dos ensaios.

3 BENEFÍCIOS DO USO DE CLP EM ENSAIOS DE IMPACTO

A adoção de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) na automação de sistemas de ensaio de impacto, como o desenvolvido neste trabalho, oferece vantagens significativas sobre abordagens baseadas puramente em eletrônica embarcada ou operação manual, especialmente no contexto da caracterização de materiais como cerâmicas e metais.

Primeiramente, a modularidade e flexibilidade inerentes aos CLPs (Bolton, 2019) permitem adaptações e atualizações no sistema de ensaio com maior agilidade e menor custo. Em ambientes de pesquisa e desenvolvimento, onde novas metodologias ou parâmetros de teste podem surgir, a capacidade de reprogramar ou



reconfigurar o sistema via software, sem alterações drásticas de hardware, é um diferencial importante. Isso facilita a exploração de diferentes condições de ensaio ou a adaptação do equipamento para novos tipos de amostras ou materiais.

Em segundo lugar, a integração com sistemas de supervisão e aquisição de dados e IHM, com é simplificada. CLPs modernos, possuem interfaces de comunicação robustas que facilitam a coleta, o armazenamento e a visualização de dados em tempo real (Endsley; Jones, 2016). A IHM permite não apenas o controle intuitivo da operação, mas também o registro organizado de parâmetros de ensaio e resultados, essencial para a rastreabilidade e análise posterior.

A repetibilidade e precisão dos ensaios são aprimoradas pela automação. O CLP executa a sequência de operações (liberação da esfera, detecção do impacto via sensor KY-038) de forma consistente, minimizando a variabilidade introduzida pela intervenção humana. Temporizações precisas e lógicas de controle bem definidas garantem que cada ensaio seja realizado sob condições idênticas, aumentando a confiabilidade dos dados coletados, mesmo que a análise quantitativa da energia absorvida ainda necessite de desenvolvimento ou calibração adicional neste protótipo.

Do ponto de vista de custo e manutenção, embora o investimento inicial possa ser comparável ou superior a algumas soluções embarcadas customizadas, os CLPs industriais são projetados para operar em ambientes exigentes, oferecendo maior robustez e vida útil. A disponibilidade de peças de reposição, suporte técnico e documentação ampla (como no caso da OMRON) tende a reduzir os custos de manutenção a longo prazo e o tempo de inatividade do equipamento (Reis; Lima, 2017).

Finalmente, a padronização das linguagens de programação (IEC 61131-3), como Ladder e Texto Estruturado, facilita o desenvolvimento e a manutenção do software de controle por profissionais da área de automação, além de permitir a implementação de algoritmos complexos para processamento de sinais ou cálculos específicos diretamente no controlador (Ogata, 2010), como os detalhados na seção de metodologia.

Esses benefícios consolidam a escolha do CLP como uma solução tecnicamente sólida e economicamente viável para o desenvolvimento de equipamentos de ensaio de impacto customizados, democratizando o acesso a ferramentas de caracterização mecânica em ambientes acadêmicos e industriais.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento e a validação do sistema automatizado por CLP, foi conduzido pelo departamento técnico (Detec) de uma empresa de revestimentos cerâmicos na cidade Cocal do Sul, Santa Catarina, local onde a máquina de ensaio está instalada. Ressalta-se que, por questões de privacidade e políticas internas da empresa responsável pelo processo de testes, os nomes e demais informações específicas da organização não serão mencionadas neste trabalho. Tal desenvolvimento representa um avanço significativo na busca por métodos de caracterização de materiais mais eficientes, confiáveis e acessíveis.

A análise dos resultados obtidos com o equipamento, especialmente em comparação com os dados de referência fornecidos pelo Centro Cerâmico Brasil (CCB), instituição certificadora reconhecida, oferece fundamentos essenciais para avaliar a eficácia e a precisão da metodologia proposta.

Um dos pontos cruciais para a validação do equipamento reside na comparação direta dos coeficientes de restituição medidos pelo sistema automatizado para diferentes tipos de produtos cerâmicos com aqueles fornecidos pelo CCB. Cabe ressaltar que o coeficiente de restituição é uma grandeza adimensional, não possuindo unidade física, pois representa a relação entre alturas ou velocidades associadas ao impacto.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as médias e os desvios padrão dos coeficientes de restituição obtidos pelo equipamento instalado no Detec e os valores de referência disponibilizados pelo CCB para uma variedade de produtos cerâmicos. Importante destacar que o número de amostras utilizado para a obtenção dos dados fornecidos pelo CCB não foi informado, uma vez que os valores foram repassados diretamente pela instituição responsável já processados e consolidados.



Tabela 1 – Comparativo dos Coeficientes de Restituição (Média e Desvio Padrão) entre Detec e CCB

Produto	Detec Média	Detec Desvpad	CCB Média	CCB Desvpad
ACETINADO	0,83	0,01	0,79	0,06
BRILHANTE	0,75	0,02	0,78	0,03
TÉCNICO NATURAL	0,82	0,01	0,85	0,01
TÉCNICO POLIDO	0,82	0,00	0,83	0,02
EXT	0,79	0,01	0,81	0,02
ESMALTADO POLIDO	0,81	0,02	0,86	0,02

Fonte: Dados Detec(2025)

Observa-se na Tabela 1 uma notável proximidade entre os valores médios do coeficiente de restituição medidos pelo equipamento do Detec e pelo CCB para a maioria dos produtos analisados. Por exemplo, para o produto Acetinado, a média obtida pelo equipamento do Detec foi de 0,83, enquanto a média do CCB foi de 0,79. Para o Técnico Natural, os valores foram 0,82 (Detec) e 0,85 (CCB), e para o Técnico Polido, 0,82 (Detec) e 0,83 (CCB). Embora existam pequenas diferenças, como no caso do Esmaltado Polido (0,81 Detec; 0,86 CCB) e do Brilhante (0,75 Detec; 0,78 CCB), a tendência geral indica uma forte correlação entre os resultados. Esta semelhança é um forte indicativo da validade e confiabilidade do sistema desenvolvido sugerindo que o equipamento é capaz de fornecer medições consistentes e comparáveis às de um laboratório de referência, CCB.

A análise dos desvios padrão também oferece informações relevantes. Em geral, os desvios padrão obtidos com o equipamento do Detec são consistentemente baixos, variando entre 0,00 e 0,02, indicando uma alta repetibilidade dos ensaios realizados pela máquina automatizada. Esta baixa dispersão é uma vantagem significativa da automação via CLP, que minimiza a variabilidade introduzida por fatores humanos e garante condições de teste padronizadas. Os desvios padrão do CCB, embora também relativamente baixos, apresentam maior variação (0,01 a 0,06), o que pode refletir diferenças metodológicas ou a variabilidade inerente aos processos de ensaio em laboratórios distintos.

A validação da abordagem proposta é reforçada pelos benefícios intrínsecos da automação com CLP, como discutido na seção anterior do documento original. A capacidade de garantir repetibilidade, precisão no registro temporal, confiabilidade pela redução de erro humano, flexibilidade para adaptações futuras e



rastreabilidade dos dados são fatores que consolidam o sistema Detec como uma ferramenta robusta. A integração com a IHM e a possibilidade de exportar dados facilitam a análise estatística e a documentação, alinhando o sistema às boas práticas de engenharia e pesquisa.

A escolha estratégica de utilizar um CLP da OMRON, padronizado na planta fabril, juntamente com o domínio da plataforma de programação pela equipe técnica, representa uma vantagem operacional e econômica substancial. A facilidade de manutenção, a disponibilidade de peças de reposição e a familiaridade dos técnicos com o sistema reduzem o tempo de inatividade e os custos associados, superando os desafios impostos pela obsolescência da eletrônica utilizada anteriormente. Este fator, aliado à validação dos resultados em comparação com o CCB, fortalece o argumento para a adoção e implementação de sistemas de ensaio automatizados e customizados, em ambientes industriais e de pesquisa.

Portanto, a análise dos resultados, fundamentada na comparação com os dados de referência do CCB e nas vantagens da automação implementada, converge para uma conclusão clara: o sistema automatizado com CLP é uma solução eficaz e confiável para a realização de ensaios de impacto em materiais cerâmicos. A notável concordância com os resultados do CCB válida a acurácia do equipamento e da metodologia empregada, demonstrando que as medições são comparáveis às de uma instituição de referência. Paralelamente, a baixa dispersão dos dados gerados pelo sistema automatizado evidencia inequivocamente a alta repetibilidade dos ensaios, um atributo crucial proporcionado pela automação via CLP, que garante consistência e fidedignidade às caracterizações de impacto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso detalhou o desenvolvimento, a implementação e a validação de um sistema automatizado para ensaios de impacto, inspirado no método Charpy, mas utilizando uma esfera de aço como percussor e um Controlador Lógico Programável (CLP) como elemento central de controle e aquisição de dados. O objetivo primordial foi conceber e construir uma alternativa tecnicamente confiável e economicamente viável para a caracterização da resistência ao impacto de materiais, com ênfase em produtos cerâmicos, superando as limitações de custo,



flexibilidade e obsolescência associadas a sistemas convencionais ou à eletrônica anteriormente empregada na máquina de ensaios.

Dessa forma, o trabalho, cumpriu a expectativa proposta, consolidando o sistema automatizado para ensaios de impacto como uma ferramenta útil e inovadora para a análise mecânica de materiais. A integração de tecnologias de automação industrial, especificamente o CLP e IHM, ao campo da engenharia de materiais, resultou em uma solução que efetivamente transita entre o rigor experimental e a aplicabilidade industrial. O desenvolvimento não apenas superou os desafios de custo e obsolescência de sistemas anteriores, mas também respondeu à necessidade de caracterizar materiais cerâmicos de forma confiável e acessível, especialmente em contextos com recursos limitados.

A discussão dos resultados obtidos pelo Detec (departamento técnico da empresa) com o equipamento desenvolvido demonstrou a sua validade e eficácia. A comparação dos coeficientes de restituição com os dados de referência do Centro Cerâmico Brasil (CCB) revelou uma notável proximidade, como no caso do produto Acetinado (0,83 Detec; 0,79 CCB) e do Técnico Polido (0,82 Detec; 0,83 CCB), conferindo alta credibilidade às medições. Esta concordância com uma instituição certificadora atesta a acurácia do equipamento e da metodologia adaptada. Adicionalmente, a baixa dispersão dos dados, com desvios padrão consistentemente entre 0,00 e 0,02, evidencia a superior repetibilidade do sistema automatizado, um benefício direto da precisão do CLP que minimiza variabilidades e garante condições de ensaio padronizadas.

A escolha estratégica do CLP OMRON, já padronizado na planta fabril e com domínio técnico pela equipe, provou ser um diferencial significativo, simplificando a manutenção, otimizando a gestão de peças de reposição e reduzindo custos operacionais a longo prazo. Essa abordagem superou os desafios da eletrônica obsoleta anteriormente utilizada e reforçou a robustez da solução. A integração com a IHM intuitiva e a capacidade de exportação de dados alinham o sistema às boas práticas de engenharia, facilitando a rastreabilidade, a análise estatística e a documentação técnica, contribuindo para a formação de profissionais com visão interdisciplinar entre controle, materiais e automação.

Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação da correlação entre o coeficiente de restituição e outras propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos,



como a expansão da aplicação do sistema para ensaiar outros tipos de materiais, como polímeros e compósitos, ajustando-se os parâmetros de impacto. Também, a incorporação de sensores adicionais, como os de força, para uma análise mais detalhada da dinâmica do impacto, assim como a exploração de algoritmos de aprendizado de máquina para predição de falhas ou classificação de materiais com base nos dados coletados, são linhas de desenvolvimento promissoras que podem ampliar significativamente o valor e a aplicabilidade desta ferramenta.

REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10545-5: **Placas cerâmicas para revestimento – Parte 5: Determinação da resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-5: **Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas**. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E23-18: **standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. West Conshohocken, PA, 2018.

BARSOUM, M. W. **Fundamentals of Ceramics**. 3rd ed. Bristol: IOP Publishing, 2019.

BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 7th ed. Oxford: Newnes, 2019.

CALLISTER, W. D.; RATZLAFF, V. R. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

GOLDENSTEIN, H.; YAMAGUCHI, D. K.; FROESCHER, B. R.; ZUCOLOTO, M. E. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2020.

KROENKE, D. C.; AUER, C. M. **Automação e Instrumentação: A Interação entre Materiais e Processos**. Editora Técnica, 2021.

MARTINEZ, Larissa Pereira Lopes. **Estudo do comportamento de diferentes materiais de cobertura frente à chuva de granizo, a partir do impacto de uma esfera de aço**. 2016. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) — Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall,



2010.

OMRON. **CX-Programmer Operation Manual**. Tokyo: Omron Corporation, 2021.

REIS, A. L.; LIMA, E. S. **Gestão de manutenção e confiabilidade industrial**. 3. ed. São Paulo: Elsevier, 2017.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

WEINTEK. **EasyBuilder Pro User Manual**. Taipei: Weintek Labs, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à minha esposa, Mirela, por sua paciência, compreensão e apoio incondicional durante todas as etapas da realização deste trabalho. Sua força, incentivo e presença constante foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios encontrados ao longo desta jornada. Agradeço também a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste projeto. Por fim, sou profundamente grato à minha família e aos amigos pelo suporte, carinho e compreensão nos momentos em que mais precisei.