v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO OPERACIONAL E MECÂNICA DA UTILIZAÇÃO DE ESCAVADEIRA HIDRÁULICA NA LIMPEZA DE PANELAS DE GUSA

OPERATIONAL AND MECHANICAL EVALUATION OF THE USE OF A HYDRAULIC EXCAVATOR FOR CLEANING HOT METAL LADLES

EVALUACIÓN OPERATIVA Y MECÁNICA DEL USO DE UNA EXCAVADORA HIDRÁULICA EN LA LIMPIEZA DE CUCHARAS DE ARRABIO

Flávio Teodoro Chaves Duarte[1], Felipe Farage David[2]

e7109089
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9089

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

O presente artigo apresenta um estudo de caso sobre a utilização da escavadeira hidráulica na limpeza de panelas de gusa. A limpeza constitui uma atividade essencial para a continuidade operacional do processo siderúrgico, porém apresenta desafios relacionados à produtividade, à confiabilidade dos equipamentos e à exposição dos trabalhadores a condições severas de temperatura. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar operacional e mecanicamente a utilização de uma escavadeira hidráulica adaptada para o processo de limpeza de panelas de gusa em uma usina siderúrgica. A pesquisa foi conduzida por meio de um estudo de caso, com observações operacionais realizadas ao longo de 180 dias, abrangendo a análise das adaptações realizadas no equipamento, dos mecanismos de desgaste observados e dos indicadores de desempenho operacional. Os resultados obtidos indicaram redução do tempo necessário para a limpeza das panelas e aumento da capacidade operacional observada no período analisado. Também foram identificadas diferenças quanto à quantidade de trabalhadores envolvidos diretamente na atividade e às condições de exposição ao calor, embora não tenha sido realizada uma avaliação ocupacional instrumental completa. As observações relacionadas à manutenção indicaram a necessidade de acompanhamento periódico dos componentes hidráulicos e do implemento rompedor. Dessa forma, no contexto específico analisado, a utilização da escavadeira hidráulica apresentou-se como uma alternativa aplicável à limpeza de panelas de gusa, com resultados operacionais favoráveis, considerando-se as limitações do estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Escavadeira hidráulica. Panela de gusa. Ferro-gusa. Siderurgia.

ABSTRACT

This article presents a case study on the use of a hydraulic excavator for cleaning hot metal ladles. Cleaning is an essential activity for the continuity of the steelmaking process; however, it presents challenges regarding productivity, equipment reliability, and worker exposure to extreme temperatures. In this context, the study aimed to evaluate—from both operational and mechanical perspectives—the use of a hydraulic excavator adapted for cleaning hot metal ladles at a steel plant.

[1] Graduando em Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), com interesse acadêmico em Engenharia Mecânica e manutenção industrial.
[2] Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), é professor do IFMG e pesquisador na área de processos e produtos siderúrgicos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The research was conducted as a case study involving operational observations over a 180-day period, encompassing an analysis of equipment modifications, observed wear mechanisms, and operational performance indicators. The results showed a reduction in the time required to clean the ladles and an increase in operational capacity during the analyzed period. Differences were also identified regarding the number of workers directly involved in the activity and heat exposure conditions, although a comprehensive instrumental occupational assessment was not performed. Maintenance-related observations indicated a need for periodic monitoring of hydraulic components and the breaker attachment. Thus, within the specific context analyzed, the use of a hydraulic excavator proved to be a viable alternative for cleaning hot metal ladles, yielding favorable operational results, given the study's limitations.

***KEYWORDS**: Hydraulic excavator. Hot metal ladle. Hot metal. Steel industry.*

RESUMEN
Este artículo presenta un estudio de caso sobre el uso de una excavadora hidráulica para la limpieza de cucharas de arrabio. La limpieza es una actividad esencial para la continuidad operativa del proceso siderúrgico; sin embargo, plantea desafíos relacionados con la productividad, la fiabilidad de los equipos y la exposición de los trabajadores a condiciones de temperatura extremas. En este contexto, el estudio
tuvo como objetivo evaluar, desde los puntos de vista operativo y mecánico, el uso de una excavadora hidráulica adaptada para la limpieza de cucharas de arrabio en una planta siderúrgica. La investigación se llevó a cabo mediante un estudio de caso con observaciones operativas realizadas a lo largo de 180 días, abarcando el análisis de las adaptaciones del equipo, los mecanismos de desgaste observados y los indicadores de desempeño operativo. Los resultados indicaron una reducción del tiempo necesario para la limpieza de las cucharas y un aumento de la capacidad operativa durante el período analizado. Asimismo, se identificaron diferencias en cuanto a la cantidad de trabajadores directamente involucrados en la actividad y a las condiciones de exposición al calor, si bien no se realizó una evaluación ocupacional instrumental completa. Las observaciones relativas al mantenimiento señalaron la necesidad de un seguimiento periódico de los componentes hidráulicos y del implemento rompedor. De este modo, en el contexto específico analizado, el uso de la excavadora hidráulica se presentó como una alternativa viable para la limpieza de cucharas de arrabio, con resultados operativos favorables, teniendo en cuenta las limitaciones del estudio.

***PALABRAS CLAVE:** Excavadora hidráulica. Cuchara de arrabio. Arrabio. Industria siderúrgica.*

INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica caracteriza-se por processos contínuos de alta complexidade e ambientes operacionais extremamente severos. A escassez de recursos naturais, a concorrência de grandes mercados e a demanda crescente por aços com requisitos mais rigorosos de composição química tornam necessária a busca por eficiência e economia nos processos siderúrgicos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nesse contexto, as panelas de gusa desempenham papel fundamental na movimentação do ferro-gusa líquido entre a etapa de redução e a aciaria. Esses equipamentos são constituídos por uma carcaça metálica revestida internamente por materiais refratários, dimensionados para suportar elevadas temperaturas, solicitações termomecânicas e o contato com o ferro-gusa e a escória durante os sucessivos ciclos operacionais. Além da função de transporte do metal líquido, dependendo da configuração do processo siderúrgico, as panelas de gusa podem também ser utilizadas em operações de pré-tratamento, como a dessulfuração do ferro-gusa antes de seu carregamento no conversor (Biswas; Sarkar, 2020; Nag *et al.*, 2021; Francisco, 2023). Durante os ciclos de operação, o contato com o metal e a escória, associado aos processos de aquecimento e resfriamento, pode provocar desgaste do revestimento refratário e favorecer a solidificação de ferro-gusa e escória aderidos às paredes e ao fundo do recipiente, formando incrustações que dificultam a limpeza e podem reduzir a capacidade útil da panela (Francisco, 2023).

A região em contato com a escória está sujeita a mecanismos de corrosão e erosão, enquanto os ciclos térmicos podem promover danos por choque térmico, condições que influenciam diretamente a vida útil do revestimento refratário (Francisco, 2023). Moubray (1997) e Mobley (2014) complementam que a manutenção adequada desses equipamentos é fundamental para evitar falhas catastróficas, e que a gestão da integridade refratária impacta diretamente os custos operacionais e a segurança do processo.

Historicamente, a limpeza dessas panelas era realizada por meio de métodos manuais ou com o auxílio de ferramentas pneumáticas simples, como marteletes pneumáticos e ferramentas de impacto, expondo os trabalhadores a riscos elevados de calor radiante, poeira mineral e material particulado, além de riscos de acidentes mecânicos. Ferreira *et al.* (2018) e Gregório (2017) identificam, em revisão de literatura, que os riscos físicos mais mencionados em ambientes laborais adversos incluem temperatura inadequada, ruído excessivo e má qualidade do ar. Gregório (2017) acrescenta que a saúde do trabalhador é um campo da saúde coletiva centrado no processo saúde-doença dos trabalhadores expostos a riscos ocupacionais, e que a prevenção de acidentes exige medidas de proteção coletiva e individual.

A crescente busca por melhorias em produtividade, segurança e confiabilidade dos ativos industriais tem impulsionado a adoção de soluções mecanizadas para atividades de manutenção em ambientes siderúrgicos. Entre essas soluções destaca-se a utilização da escavadeira hidráulica adaptada para operação em condições severas de temperatura, equipada com rompedores hidráulicos e sistemas de proteção térmica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No entanto, a literatura específica sobre a utilização de escavadeiras hidráulicas equipadas com rompedor na limpeza de panelas de gusa ainda apresenta limitações quanto à avaliação conjunta dos aspectos operacionais, mecânicos e de segurança envolvidos nessa atividade. Nesse contexto, o presente estudo justifica-se pela necessidade de analisar, em uma aplicação industrial específica, o comportamento operacional e mecânico desse tipo de equipamento, considerando os resultados observados durante o período de acompanhamento.

A análise também busca contribuir para a sistematização de informações técnicas relacionadas à utilização de equipamentos mecanizados em atividades de limpeza de panelas de gusa, bem como fornecer referências técnicas para futuras avaliações e aprimoramentos do processo.

O problema que orienta esta pesquisa pode ser sintetizado na seguinte questão: De que forma a utilização de escavadeiras hidráulicas adaptadas para operação em ambientes de elevada temperatura contribui para a melhoria da produtividade, confiabilidade e segurança operacional no processo de limpeza de panelas de gusa?

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. A indústria siderúrgica e o contexto brasileiro

A produção siderúrgica brasileira iniciou-se em 1925, com crescimento lento até meados da década de 1950. A primeira usina integrada da América do Sul (Usina Sabará) começou suas atividades em 1925, seguida pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em 1946, pela Acesita, Mannesmann, Cosipa e Usiminas durante a década de 1950. A característica de várias dessas usinas foi a estatização posterior à sua fundação, dada a irreversibilidade dos investimentos e a insuficiência de recursos financeiros. Com a criação do BNDES em 1952, este passou a receber a responsabilidade pela continuidade do funcionamento de diversas siderúrgicas, dando prioridade ao setor (Scherrer, 2006).

O modelo de substituição de importações incentivava a industrialização, direcionando os investimentos para o setor siderúrgico (Scherrer, 2006). A recessão econômica da década de 1980 afetou a demanda por aço, e as empresas passaram a exportar o excedente a preços menores. O setor tornou-se desatualizado e obsoleto, com endividamento, gestão burocratizada e baixa autonomia. As privatizações tiveram início em 1988, com empresas de menor porte, e a partir de 1991, com o Programa Nacional de Desestatização (PND), as empresas de maior porte foram privatizadas, colaborando para a competitividade do Brasil na produção de aço (Scherrer, 2006).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da siderurgia, com produção significativa de aço bruto, usinas integradas e semi-integradas, sendo a rota dos altos-fornos a predominante no país (Viana, 2019). O processo de produção do aço em usinas integradas é intensivo em energia e matérias-primas, exigindo minério de ferro, coque e calcário em grandes quantidades. De maneira geral, o processo de produção completo do aço envolve três etapas: redução do minério de ferro em ferro-gusa, refino do ferro-gusa em aço e laminação (Viana, 2019).

1.2. Panelas de gusa: função, estrutura e ciclo operacional

As panelas de gusa são recipientes utilizados para receber, transportar e transferir o ferro-gusa líquido produzido nos altos-fornos para as etapas subsequentes do processo siderúrgico. A movimentação dessas panelas constitui uma etapa importante na integração entre a produção de gusa e a aciaria, devendo ser realizada de maneira a garantir disponibilidade operacional e minimizar as perdas térmicas do metal durante o transporte. Dependendo da configuração da usina, a panela de gusa também pode ser utilizada em operações de pré-tratamento do metal líquido, como a dessulfuração, antes de sua transferência para a etapa de refino primário (Ferreira Filho *et al.*, 2003; Nicolau *et al.*, 2014; Biswas; Sarkar, 2020).

Estruturalmente, as panelas de gusa são constituídas por uma carcaça metálica revestida internamente por materiais refratários, cuja função é proteger a estrutura metálica e reduzir as perdas térmicas durante os ciclos de operação. O revestimento refratário é submetido a condições severas de serviço, envolvendo elevadas temperaturas, ciclos sucessivos de aquecimento e resfriamento, solicitações mecânicas e interação química com o ferro-gusa e a escória. Essas condições favorecem mecanismos de degradação como corrosão, erosão e danos decorrentes de choque térmico, tornando a seleção e a manutenção dos materiais refratários fatores relevantes para a confiabilidade e a vida útil da panela (Francisco, 2023; Nag *et al.*, 2021). Em aplicações industriais de panelas de gusa, materiais de alta alumina e refratários do sistema Al_2O_3-SiC-C são utilizados em regiões do revestimento de trabalho devido à necessidade de resistência às condições termomecânicas e químicas impostas pelo processo (Nag *et al.*, 2021).

De maneira geral, o ciclo operacional de uma panela de gusa compreende o recebimento do ferro-gusa líquido, seu transporte, eventual realização de operações de pré-tratamento, transferência do metal para a etapa subsequente do processo e preparação da panela para um novo ciclo. Durante essas operações ocorrem perdas térmicas e ciclos térmicos sucessivos que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

influenciam o desempenho do revestimento refratário e a condição operacional do equipamento (Nicolau *et al.*, 2014; Francisco, 2023).

Após o esvaziamento, podem permanecer aderidos às paredes e ao fundo da panela resíduos de escória e ferro-gusa solidificado, tornando necessárias operações periódicas de inspeção e limpeza antes do retorno do recipiente ao ciclo produtivo. A adequada conservação da panela, incluindo a integridade do revestimento refratário e a remoção de materiais solidificados acumulados, contribui para a manutenção de sua capacidade útil, disponibilidade e segurança operacional.

1.3. Processo de limpeza de panelas e utilização de escavadeiras hidráulicas

Após os ciclos de recebimento, transporte e esvaziamento do ferro-gusa líquido, podem permanecer aderidos às paredes e ao fundo das panelas resíduos de escória e incrustações de gusa solidificado, formando depósitos usualmente denominados “cascão” no ambiente operacional, conforme ilustrado na Figura 1. A remoção desses resíduos é necessária para preservar as condições operacionais da panela e evitar interferências no processo produtivo subsequente. A formação dessas incrustações ocorre devido ao resfriamento progressivo do ferro-gusa residual e da escória que permanecem aderidos às paredes e ao fundo do recipiente após o esvaziamento do ferro-gusa líquido. Esses depósitos podem atingir espessuras significativas, reduzindo a capacidade útil da panela e dificultando sua operação, inspeção e preparação para novos ciclos.

Figura 1. Acúmulo de incrustações solidificadas (“cascão”) no interior da panela de gusa



Fonte: Acervo pessoal (2024).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em razão das limitações dos métodos manuais, as siderúrgicas passaram a adotar sistemas mecanizados com escavadeiras hidráulicas adaptadas para operação em ambientes de elevada temperatura.

Segundo Merritt (1967), as escavadeiras hidráulicas possuem braço articulado e sistemas hidráulicos capazes de executar operações de impacto e remoção com maior mobilidade operacional. Quando adaptadas com rompedor hidráulico e proteções térmicas, essas máquinas permitem maior afastamento do operador da zona de risco (Parker Hannifin, 2021; Trelleborg Sealing Solutions, 2021). A exposição contínua a temperaturas elevadas pode afetar o desempenho dos sistemas hidráulicos, especialmente por alterações nas propriedades do fluido e pelo envelhecimento dos materiais de vedação (Mobley, 2014; Parker Hannifin, 2021; Trelleborg Sealing Solutions, 2021).

1.4. Confiabilidade, tribologia e sistemas hidráulicos em equipamentos de operação severa

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um equipamento desempenhar adequadamente sua função durante determinado período sob condições específicas de operação (Moubray, 1997). Em operações siderúrgicas, a confiabilidade dos equipamentos torna-se crítica devido à elevada intensidade térmica dos processos e aos impactos econômicos decorrentes de interrupções produtivas. A identificação precoce de falhas é essencial para evitar interrupções inesperadas, e empresas do setor mineral e siderúrgico estão investindo em programas estruturados de manutenção baseada em condição (Mobley, 2014).

Os mecanismos de desgaste representam uma das principais causas de degradação dos componentes mecânicos. Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), os mecanismos de desgaste mais frequentes incluem o desgaste abrasivo, adesivo, erosivo e a fadiga superficial. No caso das escavadeiras utilizadas na limpeza de panelas, destacam-se o desgaste abrasivo pelo contato com incrustações solidificadas de elevada dureza e o desgaste por impacto do rompedor hidráulico (Hutchings; Shipway, 2017). O sistema hidráulico é o principal responsável pela transmissão de potência em escavadeiras (Merritt, 1967). Sua eficiência depende das propriedades do fluido hidráulico, especialmente a viscosidade.

A exposição a temperaturas elevadas pode alterar as propriedades do fluido hidráulico, especialmente sua viscosidade, contribuindo para perdas de eficiência e aceleração de mecanismos de desgaste no sistema. Dessa forma, a seleção de um fluido hidráulico adequado às condições de operação e o monitoramento periódico de suas propriedades constituem

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aspectos importantes para a confiabilidade de equipamentos submetidos a ambientes termicamente severos (Mobley, 2014).

Os materiais de vedação também são afetados: elastômeros NBR apresentam limitações em altas temperaturas, enquanto fluorelastômeros FKM oferecem maior resistência térmica e química (Parker Hannifin, 2021; Trelleborg Sealing Solutions, 2021). Sob o ponto de vista estrutural, as escavadeiras com rompedores estão sujeitas a carregamentos dinâmicos repetitivos que podem provocar fadiga mecânica em componentes como lança, braço e pontos de articulação (Budynas; Nisbett, 2020).

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização do estudo e do equipamento

O presente artigo consiste em um estudo de caso desenvolvido em uma siderúrgica brasileira de grande porte, com o objetivo de avaliar a utilização de uma escavadeira hidráulica adaptada no processo de limpeza de panelas de gusa. A pesquisa adotou uma abordagem mista, com componentes qualitativos e quantitativos de caráter descritivo, fundamentada em observação direta das operações, análise das adaptações, registros de manutenção e revisão bibliográfica sobre processos siderúrgicos, confiabilidade, tribologia e sistemas hidráulicos em condições severas. O estudo de caso, conforme Yin (2015), foi selecionado por permitir a análise detalhada de uma aplicação tecnológica específica em ambiente industrial real. A abordagem qualitativa, segundo Gil (2022), buscou compreender os processos e interações observados, sem pretensão de generalização estatística, embora dados quantitativos complementares, como tempos de ciclo e indicadores de manutenção, tenham sido utilizados para subsidiar as análises.

O estudo foi conduzido na área de manutenção de panelas de uma usina siderúrgica da região Sudeste, que opera com altos-fornos e convertedores a oxigênio (BOF), produzindo cerca de 5 milhões de toneladas de aço bruto por ano. O equipamento analisado consiste em uma escavadeira hidráulica de 22 toneladas, modelo Caterpillar 320D, adaptada para operação em altas temperaturas (Figura 2), utilizada no processo de limpeza de panelas de gusa com capacidade de 120 toneladas. O equipamento conta com rompedor hidráulico de 1.500 kg, proteções térmicas na lança com mantas refletivas, cabine pressurizada com filtros HEPA e ar-condicionado, além de adaptações nos sistemas hidráulicos com fluido hidráulico selecionado para as condições severas de operação e vedações em fluorelastômero (FKM/Viton) para suportar as temperaturas elevadas do ambiente operacional.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Escavadeira hidráulica adaptada em operação na limpeza de panela de gusa



Fonte: Acervo pessoal (2024).

O ambiente de operação é caracterizado por elevada carga térmica, decorrente das altas temperaturas das panelas e de seus revestimentos refratários durante o ciclo operacional, conforme descrito por Biswas e Sarkar (2020). O processo de limpeza das panelas com a escavadeira hidráulica compreende desde a inspeção inicial da panela até sua liberação para novo ciclo operacional, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3. O fluxo operacional padronizado inclui o posicionamento da panela na área de limpeza, a remoção mecanizada das incrustações solidificadas com o rompedor hidráulico, a inspeção visual da superfície interna e a liberação para o próximo ciclo produtivo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Fluxograma do processo de limpeza de panelas de gusa com escavadeira hidráulica e rompedor



Fonte: Elaboração própria (2026).

2.2. Procedimentos de coleta e análise de dados

As informações utilizadas neste estudo foram obtidas por meio de observação direta realizada ao longo de 180 dias, com visitas periódicas à área de limpeza de panelas para acompanhamento das atividades operacionais. Durante as observações, foram registrados aspectos como o tempo de ciclo de limpeza, os procedimentos operacionais adotados pelos operadores, as interações entre os trabalhadores e o equipamento, as condições ambientais e as principais dificuldades ou intercorrências durante a operação. As observações foram documentadas em diário de campo, com registro descritivo das atividades, condições operacionais e percepções da equipe envolvida (Marconi; Lakatos, 2022).

Foram analisados, também, os registros de manutenção disponíveis para a escavadeira hidráulica durante o período de estudo, incluindo ordens de serviço de manutenção corretiva e preventiva, relatórios de inspeção de componentes críticos, registros de substituição de peças como ponteiras, vedações, mangueiras e fluidos, além do histórico de intervenções emergenciais. A análise desses registros permitiu identificar os principais modos de falha, a frequência de intervenções e os componentes mais suscetíveis à degradação em ambiente de alta temperatura (Mobley, 2014). Foram coletados, ainda, dados operacionais referentes ao tempo de limpeza por panela nos métodos manual e mecanizado, ao número de operadores envolvidos em cada método, e à capacidade diária de processamento de panelas, com base nos registros e observações disponíveis. As considerações relacionadas à exposição ao calor possuem caráter indicativo, uma vez que não foi realizada uma campanha específica e sistemática de avaliação de IBUTG durante o período de estudo. As informações utilizadas foram baseadas nas observações disponíveis e em medições pontuais, não sendo suficientes para caracterizar integralmente a exposição ocupacional dos trabalhadores. Dessa forma, os resultados relacionados ao calor são apresentados como indicação das condições observadas e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como uma limitação do estudo, recomendando-se avaliações instrumentais específicas em trabalhos futuros.

Não foi possível determinar retrospectivamente o número total de operações realizadas durante o período analisado, devido à indisponibilidade de uma base histórica consolidada contendo o registro individual de todas as atividades. Dessa forma, os dados quantitativos apresentados neste estudo correspondem aos valores e intervalos efetivamente disponíveis nos registros consultados e nas observações realizadas, sendo analisados de maneira descritiva. Não foram realizadas estimativas retrospectivas do número total de operações nem cálculos estatísticos que dependessem de uma série histórica completa.

Complementarmente, foi realizada pesquisa bibliográfica em livros, artigos científicos, normas técnicas e documentos especializados, com o objetivo de fornecer embasamento teórico para a análise dos aspectos operacionais, mecânicos e de confiabilidade observados durante o estudo. Foram consultadas bases de dados como SciELO, Google Acadêmico, Scopus e portal de periódicos CAPES, utilizando os descritores: "escavadeira hidráulica", "limpeza de panelas", "alto-forno", "siderurgia", "confiabilidade", "tribologia", "sistemas hidráulicos", "segurança do trabalho" e "refratários". A análise mecânica foi desenvolvida a partir da avaliação das condições de operação da escavadeira hidráulica em ambiente siderúrgico, considerando os efeitos da exposição ao calor sobre o sistema hidráulico, incluindo fluido, vedações e mangueiras, as cargas dinâmicas geradas pelo rompedor hidráulico durante a operação de impacto, os mecanismos de desgaste observados nos componentes críticos, como ponteiras, articulações e cilindros, e a integridade estrutural da lança, do braço e dos pontos de articulação submetidos a carregamentos cíclicos. A análise de confiabilidade foi conduzida de forma qualitativa, com base nos registros de manutenção disponíveis, inspeções visuais e informações obtidas junto à equipe operacional, buscando identificar os principais modos de falha, a frequência das intervenções e os fatores associados à continuidade operacional do equipamento.

Foram considerados, de forma indicativa, aspectos relacionados à exposição ao calor radiante durante a atividade de limpeza das panelas, tendo como referência a metodologia estabelecida pela Norma Regulamentadora NR-15 (Brasil, 2022). Entretanto, não foi realizada uma avaliação instrumental sistemática do índice IBUTG nas diferentes condições de operação. A análise foi complementada pela observação das condições ambientais e pela consulta à literatura técnica, sendo utilizada apenas para contextualizar a exposição ao calor no processo estudado. A geração de poeira mineral e material particulado, as exigências ergonômicas comparativas entre os métodos manual e mecanizado e os riscos mecânicos associados ao

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

manuseio de ferramentas e à operação de equipamentos pesados também foram considerados na análise.

2.3. Comparação entre métodos e limitações do estudo

Os resultados obtidos com a utilização da escavadeira hidráulica foram comparados às práticas operacionais anteriormente empregadas na unidade siderúrgica. A comparação considerou indicadores como o tempo de ciclo de limpeza, a quantidade de operadores necessários, a capacidade diária de processamento, a exposição ocupacional ao calor e a frequência de manutenção corretiva dos equipamentos. A partir dessa análise comparativa, buscou-se identificar os impactos da mecanização sobre a produtividade, confiabilidade operacional e segurança dos trabalhadores envolvidos no processo de limpeza das panelas. Os dados referentes ao método manual foram obtidos a partir de registros históricos da unidade e de informações fornecidas pela equipe operacional, enquanto os dados do método mecanizado foram coletados durante o período de observação direta, possibilitando uma comparação de caráter descritivo, considerando a diferença na origem dos dados.

O estudo apresenta algumas limitações metodológicas que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A pesquisa foi desenvolvida em uma única unidade siderúrgica, refletindo as condições operacionais específicas do ambiente analisado, o que limita a generalização dos resultados para outras plantas com características distintas.

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de caráter descritivo, com abordagem qualitativa e quantitativa descritiva. O componente qualitativo está relacionado aos procedimentos de limpeza, às condições de manutenção e aos aspectos de segurança envolvidos na atividade. O componente quantitativo foi utilizada de forma descritiva para apresentar os intervalos de tempo de limpeza, a capacidade operacional observada e a quantidade de trabalhadores envolvidos na execução da atividade, sem aplicação de análise estatística inferencial.

A análise financeira detalhada, com indicadores de custo-benefício e retorno sobre o investimento, também não foi contemplada no escopo desta pesquisa. Apesar dessas limitações, as observações realizadas permitiram identificar benefícios operacionais, mecânicos e ocupacionais associados à mecanização do processo de limpeza de panelas siderúrgicas, contribuindo para ampliar o conhecimento técnico sobre a aplicação dessa tecnologia em ambientes industriais de elevada severidade operacional.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desempenho operacional e produtividade

Os resultados obtidos durante o acompanhamento das atividades indicaram melhorias operacionais relevantes após a adoção da escavadeira hidráulica no processo de limpeza das panelas de gusa. Em comparação ao método manual anteriormente empregado, a mecanização permitiu maior agilidade na remoção das incrustações solidificadas aderidas às superfícies internas das panelas, contribuindo para a redução do tempo necessário para a execução das atividades de limpeza. O método manual demandava entre 45 e 60 minutos para a limpeza completa de uma panela, enquanto o método mecanizado com escavadeira hidráulica reduziu esse tempo para aproximadamente 15 a 20 minutos. Considerando esses intervalos, estima-se uma redução do tempo de execução entre aproximadamente 56% e 75%. Esses valores devem ser interpretados de forma descritiva, considerando a ausência de uma série histórica consolidada com o número total de operações. Essa redução impacta diretamente a disponibilidade das panelas para retorno ao processo produtivo, aspecto considerado estratégico para a logística operacional das usinas siderúrgicas. A disponibilidade adequada das panelas constitui um fator importante para garantir a continuidade da produção e evitar restrições operacionais nas etapas subsequentes do processo siderúrgico.

Além da maior rapidez operacional, observou-se redução significativa da necessidade de intervenção direta dos trabalhadores em áreas sujeitas à exposição ao calor radiante e ao material particulado gerado durante a remoção das incrustações solidificadas. No método manual, a atividade envolvia aproximadamente quatro a cinco trabalhadores, enquanto no método mecanizado, a operação foi realizada com um trabalhador diretamente envolvido na condução da escavadeira. Essa diferença representa uma redução da quantidade de trabalhadores diretamente expostos à área de execução da limpeza. No entanto, não foram realizados estudos estatísticos de acidentes ou avaliação quantitativa de risco ocupacional que permitam estabelecer uma relação direta entre a mecanização e a redução da ocorrência de acidentes ou doenças ocupacionais. Assim, o resultado é interpretado como uma indicação de potencial redução da exposição dos trabalhadores aos riscos associados à permanência próxima à atividade de limpeza. A utilização do rompedor hidráulico associado à escavadeira também proporcionou maior controle sobre as operações de remoção dos resíduos, favorecendo a padronização das atividades executadas e reduzindo a variabilidade operacional observada no método manual, onde a eficiência dependia diretamente da habilidade e experiência de cada operador.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Outro aspecto observado foi a maior flexibilidade operacional proporcionada pelo equipamento, que permitiu a realização das atividades de limpeza com menor esforço físico dos operadores e melhor adaptação às diferentes condições encontradas nas panelas durante o processo produtivo. O braço articulado da escavadeira, combinado com a mobilidade do equipamento sobre esteiras, possibilitou o posicionamento preciso do rompedor em diferentes ângulos e regiões da panela, alcançando áreas de difícil acesso que no método manual demandavam esforço e tempo adicionais. Os resultados obtidos neste estudo indicam que, no contexto analisado, a utilização da escavadeira hidráulica apresentou desempenho operacional favorável, com ganhos expressivos de produtividade e eficiência operacional.

A capacidade diária de processamento de panelas, que no método manual era de oito a dez unidades, elevou-se para vinte a vinte e cinco panelas por dia com o método mecanizado. No período analisado, observou-se capacidade operacional superior do método mecanizado em relação aos valores históricos disponíveis para o método manual.

3.2. Avaliação da integridade mecânica e adaptações do equipamento

A avaliação mecânica indicou que a manutenção das propriedades adequadas do fluido hidráulico constitui um aspecto relevante para a operação confiável da escavadeira em ambiente siderúrgico de elevada temperatura. A exposição térmica pode alterar propriedades do fluido, especialmente sua viscosidade, comprometendo a eficiência do sistema hidráulico e favorecendo mecanismos de desgaste dos componentes internos. Nesse contexto, a utilização de fluido hidráulico selecionado de acordo com as condições severas de operação, associada ao acompanhamento periódico de sua condição, mostrou-se uma medida importante para a estabilidade operacional do sistema. Durante o período analisado, o monitoramento das condições do fluido integrou as práticas de manutenção adotadas para reduzir ocorrências relacionadas à sua degradação e preservar o desempenho dos componentes hidráulicos.

As vedações do sistema hidráulico também foram objeto de adaptações importantes. Elastômeros convencionais do tipo NBR (borracha nitrílica) apresentam limitações para operação contínua em temperaturas elevadas, degradando-se rapidamente em condições próximas a panelas quentes. A substituição das vedações de NBR por fluorelastômeros do tipo FKM (Viton) representou uma adaptação técnica fundamental para o aumento da confiabilidade operacional do equipamento. Os fluorelastômeros do tipo FKM apresentam, de maneira geral, maior resistência térmica e química em comparação aos elastômeros NBR, sendo empregados em aplicações que exigem maior estabilidade em condições severas de operação (Parker Hannifin, 2021; Trelleborg Sealing Solutions, 2021). A substituição do material de vedação foi adotada

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como medida de manutenção preventiva, sendo observada durante o período analisado a necessidade de acompanhamento desse componente. Conforme Budynas e Nisbett (2020), componentes submetidos a carregamentos cíclicos e elevados gradientes térmicos estão sujeitos à nucleação e propagação de trincas por fadiga, exigindo inspeções periódicas e procedimentos adequados de reparo. Nesse sentido, a inspeção visual diária dos pontos de articulação da lança e do braço da escavadeira passou a fazer parte da rotina operacional, permitindo a identificação precoce de trincas ou deformações estruturais antes que pudessem evoluir para falhas catastróficas.

As adaptações implementadas incluíram também a instalação de mantas térmicas refletivas na lança, no braço e nas mangueiras hidráulicas, reduzindo a transferência de calor radiante para os componentes críticos do equipamento. Essas proteções, juntamente com a cabine pressurizada com filtros HEPA e ar-condicionado, contribuíram para condições potencialmente mais favoráveis de exposição do operador ao calor radiante, à poeira mineral e aos ruídos característicos da operação mecanizada. Moubray (1997) destaca que o monitoramento da condição dos fluidos lubrificantes constitui uma das ferramentas para aumento da confiabilidade e redução de falhas em equipamentos industriais. Complementarmente, Mobley (2014) ressalta que programas de análise de óleo podem auxiliar na identificação precoce de mecanismos de desgaste interno e degradação dos sistemas hidráulicos. Recomenda-se a realização periódica de análises do óleo hidráulico, considerando parâmetros como viscosidade, presença de água e partículas metálicas, como ferramenta complementar para acompanhamento das condições do sistema.

3.3. Análise de falhas e manutenção preventiva

Durante o período de acompanhamento das operações, observou-se que os principais modos de falha potencialmente associados à utilização da escavadeira hidráulica no processo de limpeza de panelas siderúrgicas estão relacionados às condições severas de temperatura, aos carregamentos dinâmicos gerados pelo rompedor hidráulico e ao desgaste progressivo dos componentes submetidos à abrasão. Entre os componentes mais suscetíveis à degradação destacam-se as ponteiras dos rompedores hidráulicos, os elementos de vedação do sistema hidráulico, as mangueiras flexíveis e os componentes estruturais sujeitos à transmissão contínua de vibrações e impactos.

O contato repetitivo com incrustações solidificadas de elevada dureza favorece a ocorrência de desgaste abrasivo nas ferramentas de trabalho, conforme ilustrado na Figura 4, exigindo inspeções periódicas e substituições programadas para manutenção da eficiência operacional. As ponteiras dos rompedores, fabricadas em aço de alta resistência ao desgaste,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

apresentaram redução progressiva de seu comprimento útil ao longo das operações, com necessidade de substituição a cada intervalo aproximado de 200 horas operacionais, dependendo da intensidade de uso e das características dos resíduos removidos. Esse desgaste é característico do mecanismo de desgaste abrasivo descrito por Hutchings e Shipway (2017), que ocorre quando partículas duras, como as incrustações solidificadas, entram em contato com superfícies metálicas, promovendo a remoção de material por ação de corte ou sulcamento.

Figura 4. Desgaste observado na ponteira do rompedor após a operação de limpeza



Fonte: Acervo pessoal (2024).

Nos sistemas hidráulicos, a exposição ao calor radiante proveniente das panelas pode acelerar o envelhecimento dos fluidos e dos materiais elastoméricos utilizados nas vedações. Conforme Parker Hannifin (2021) e Trelleborg Sealing Solutions (2021), a utilização de materiais com maior resistência térmica contribui para o aumento da vida útil dos componentes e para a redução da probabilidade de vazamentos e falhas operacionais. As mangueiras hidráulicas, embora protegidas por mantas térmicas, também apresentaram sinais de ressecamento e endurecimento ao longo do tempo, exigindo inspeção visual diária e substituição preventiva em intervalos programados. Os registros de manutenção indicaram a ocorrência de intervenções corretivas no sistema hidráulico, especialmente relacionadas a vazamentos em cilindros e conexões. Entretanto, a ausência de uma série histórica quantitativa consolidada anterior à implementação das adaptações não permite determinar, de forma objetiva, a magnitude de eventual redução dessas intervenções.

Sob o ponto de vista estrutural, a operação contínua com rompedor hidráulico também submete a lança, o braço e os pontos de articulação da escavadeira a carregamentos cíclicos repetitivos. Conforme Budynas e Nisbett (2020), esse tipo de solicitação favorece mecanismos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de fadiga mecânica ao longo do tempo, tornando recomendável a realização de inspeções periódicas em regiões sujeitas a concentração de tensões. Dessa forma, a adoção de práticas sistemáticas de manutenção preventiva constitui um fator importante para garantir a confiabilidade operacional e prolongar a vida útil do equipamento.

Com base nas condições de operação observadas e nos modos de falha potencialmente associados aos componentes analisados, foi estruturada uma recomendação de manutenção preventiva para o acompanhamento do equipamento. Essa programação deve ser entendida como uma proposta técnica para orientar inspeções e intervenções, não representando necessariamente um cronograma formal adotado pela unidade estudada.

A proposta de manutenção preventiva compreende inspeções diárias de pré-operação, verificando visualmente mangueiras, cilindros e ponteira, além do nível e temperatura do óleo hidráulico e lubrificação dos pontos de articulação; inspeções semanais com verificação detalhada do sistema de vedação dos cilindros, inspeção estrutural da lança e braço para identificação de trincas ou deformações, e medição de temperatura do sistema hidráulico; inspeções mensais com coleta de amostra de óleo hidráulico para análise físico-química, verificação da integridade das proteções térmicas e inspeção do sistema de pressurização da cabine; e manutenções programadas com substituição de vedações a cada 500 horas operacionais, troca de óleo hidráulico a cada 1.000 horas e substituição da ponteira conforme critério de desgaste máximo estabelecido.

3.4. Segurança do trabalho e discussão integrada

A utilização da escavadeira hidráulica esteve associada à redução da permanência dos trabalhadores nas proximidades da panela durante a atividade de limpeza. A cabine pressurizada e climatizada apresentou temperaturas observadas entre 22 °C e 24 °C, enquanto no método manual, foram registradas temperaturas pontuais entre 32 °C e 36 °C na região próxima à panela. Esses valores indicam uma condição potencialmente favorável à redução da exposição ocupacional ao calor; entretanto, como não foi realizada uma campanha sistemática de avaliação do IBUTG, os dados não permitem caracterizar quantitativamente o risco térmico ocupacional. Além disso, a precisão do rompedor hidráulico controlado por joystick pode contribuir para maior controle dos impactos e menor risco de danos acidentais ao revestimento refratário, uma vez que o operador pode ajustar a intensidade e a direção dos impactos, favorecendo a remoção dos depósitos indesejados e o controle da interação do rompedor com o revestimento refratário. Entretanto, essa hipótese não foi quantificada no presente estudo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A mecanização também proporcionou avanços importantes na segurança ocupacional, com a cabine pressurizada e equipada com filtros HEPA constituindo uma medida de engenharia destinada a reduzir a exposição do operador ao material particulado gerado durante a operação de limpeza. Adicionalmente, a redução do número de operadores expostos de quatro a cinco para um representa uma redução do número de trabalhadores diretamente expostos aos riscos presentes na atividade de limpeza, sem que isso permita quantificar a redução da probabilidade de acidentes de trabalho, especialmente quedas, contato com superfícies quentes e projeção de partículas durante a operação de limpeza mecanizada. As adaptações realizadas no equipamento foram relacionadas às condições específicas da atividade de limpeza, buscando proporcionar maior adequação operacional e mecânica durante a utilização do rompedor hidráulico. As observações realizadas indicaram a necessidade de atenção ao posicionamento do implemento e ao controle dos impactos durante a remoção das incrustações. Entretanto, não foi realizada uma avaliação sistemática da integridade do revestimento refratário, nem foram obtidos dados suficientes para determinar alterações em sua vida útil ou estabelecer quantitativamente os efeitos da utilização do rompedor sobre o refratário. Dessa forma, a integridade do revestimento é considerada uma limitação do presente estudo e constitui tema relevante para avaliações futuras.

Nesse contexto, recomenda-se que a operação do rompedor seja realizada com controle de posicionamento e intensidade dos impactos, evitando contato inadequado ou prolongado com regiões do revestimento refratário. A definição de parâmetros operacionais específicos, entretanto, requer avaliação técnica e acompanhamento sistemático da integridade do revestimento.

A utilização de escavadeiras hidráulicas na limpeza de panelas apresentou resultados operacionais favoráveis e condições potencialmente favoráveis sob os aspectos mecânico e ocupacional, destacando-se a maior agilidade na remoção das incrustações solidificadas, a redução da exposição dos trabalhadores às condições severas de temperatura e a possibilidade de adaptação do equipamento para operar em ambientes de elevada solicitação térmica e mecânica. Comparada ao método manual, a escavadeira apresentou condições potencialmente favoráveis à redução da exposição aos riscos físicos, além de melhoria do desempenho operacional, enquanto em relação aos removedores hidráulicos fixos destaca-se pela mobilidade e capacidade de operar em diferentes posições e ângulos, adaptando-se às diversas geometrias das panelas. A limitada disponibilidade de estudos acadêmicos específicos sobre o tema, com a maioria das informações concentradas em catálogos técnicos, patentes ou relatórios industriais, reforça a contribuição aplicada deste estudo para o conhecimento técnico-científico da área.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado permitiu compreender que a limpeza de panelas constitui uma etapa importante para a continuidade operacional do processo produtivo em usinas siderúrgicas, envolvendo condições severas de temperatura, desgaste mecânico significativo e exposição ocupacional intensa. Os resultados observados ao longo dos 180 dias de acompanhamento demonstraram que a utilização de escavadeiras hidráulicas com rompedores representa uma alternativa mecanizada tecnicamente viável para a remoção de incrustações solidificadas aderidas ao interior das panelas de gusa, apresentando, no contexto analisado, desempenho operacional superior aos valores históricos disponíveis para o método manual.

Sob os pontos de vista operacional e mecânico, a mecanização do processo proporcionou redução substancial do tempo de ciclo de limpeza e aumento da capacidade diária de processamento de panelas, conforme os valores observados no período analisado. A redução do número de operadores, aliada à maior agilidade e precisão das operações mecanizadas, contribuiu para a otimização dos recursos humanos e para a padronização dos procedimentos. Adicionalmente, ficou evidenciado que a operação em ambientes de alta temperatura exige cuidados específicos com os sistemas hidráulicos, sendo a seleção de fluido hidráulico adequado às condições severas de operação e a utilização de vedações de maior resistência térmica aspectos relevantes para a confiabilidade do equipamento. As adaptações implementadas, incluindo proteções térmicas e cabine pressurizada, mostraram-se tecnicamente compatíveis com as condições de operação observadas, embora a ausência de uma série histórica quantitativa não permita mensurar objetivamente seu efeito sobre a vida útil dos componentes críticos e a frequência das intervenções corretivas.

Em relação à segurança do trabalho e às perspectivas futuras, a mecanização apresentou condições potencialmente favoráveis à redução da exposição ao calor radiante, ao material particulado e à permanência próxima às fontes de risco mecânico. A cabine pressurizada com ar-condicionado e filtros HEPA pode contribuir para reduzir a exposição térmica do operador, enquanto a eliminação da permanência de múltiplos operadores próximos às fontes de calor pode contribuir para reduzir a exposição dos trabalhadores aos riscos associados à atividade. No entanto, os resultados estão restritos às condições da unidade e do período analisados, não sendo possível generalizá-los diretamente para outras siderurgias. As análises integradas dos resultados indicam que a utilização da escavadeira hidráulica adaptada apresenta potencial de contribuição para a eficiência operacional da atividade, especialmente pela redução do tempo de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

execução, pelo aumento da capacidade de atendimento e pela redução da exposição direta dos trabalhadores às condições adversas do ambiente de trabalho, alinhando-se às tendências de automação e mecanização.

Contudo, a limitada produção acadêmica sobre o tema sugere a realização de estudos futuros com dados operacionais mais abrangentes e análises experimentais que ampliem o conhecimento técnico no contexto siderúrgico brasileiro.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) – Campus Congonhas pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

BISWAS, Subir; SARKAR, Debasish**.** *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-43807-4.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-15 – Atividades e Operações Insalubres.** Brasília, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-15-atualizada-2022.pdf. Acesso em: 12 fev. 2026.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Shigley's Mechanical Engineering Design.** 11. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

FERREIRA, Aldo Pacheco; GRAMS, Mariana Tramontini; ERTHAL, Regina Maria de Carvalho; GIRIANELLI, Vania Reis; OLIVEIRA, Maria Helena Barros de. Revisão da literatura sobre os riscos do ambiente de trabalho quanto às condições laborais e o impacto na saúde do trabalhador. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 16, n. 3, p. 360-370, 2018. DOI: 10.5327/Z1679443520180267.

FERREIRA FILHO, G. A.; SILVA, J. S.; CASTRO, L. M.; ALVES, M. T.; AUAD, M. V. **Dessulfuração em panela de gusa via processo KR na Açominas**. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, 34., 2003, Rio de Janeiro. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2003. p. 311-320. DOI: 10.5151/2594-5300-2924.

FRANCISCO, M. S. M. **Estudo comparativo das propriedades termomecânicas e microestruturas de refratários aplicados em panela de gusa**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências – Materiais Convencionais e Avançados) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023. DOI: 10.11606/D.97.2023.tde-11122024-165300.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GREGÓRIO, D. S. **Riscos Ocupacionais:** Uma revisão da Literatura. ID on Line. Revista de Psicologia, v. 11, n. 34, p. 401-413, 2017. DOI: 10.14295/idonline.v11i34.697.

HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Philip. Tribology: **Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia científica.** 8. ed. Barueri, SP: Atlas, 2022.

MERRITT, Herbert E. **Hydraulic Control Systems.** New York: John Wiley & Sons, 1967.

MOBLEY, R. Keith. **Maintenance Engineering Handbook.** 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

NAG, Moumita *et al.* **Exploration of new quality refractory to improve hot metal ladle refractory performance.** *Engineering Failure Analysis*, v. 125, art. 105384, 2021. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105384.

NICOLAU, M. F.; SAMPAIO, R. S.; PASSAGLI, A. M. P.; OLIVEIRA, T. A.; ALMEIDA, P. C. L. **Logística de movimentação e análise das perdas térmicas da panela de gusa da VSB**. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 44., 2014, Belo Horizonte. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2014. p. 5539-5549. DOI: 10.5151/2594-357X-25562.

PARKER HANNIFIN. Parker O-Ring Handbook. **Cleveland:** Parker Seal Group, 2021. Disponível em: https://www.parker.com/literature/O-Ring%20Division%20Literature/ORD%205700.pdf. Acesso em: 12 fev. 2026.

SCHERRER, Cristina Mabel. **A indústria siderúrgica brasileira:** um estudo econométrico. 2006. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology.** 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS. Hydraulic seals – linear metric. [S. l.]: Trelleborg Sealing Solutions, 2021. Disponível em: https://www.trelleborg.com/seals/. Acesso em: 12 fev. 2026.

VIANA, Fernando Luiz E. **Indústria siderúrgica.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 4, n. 92, ago. 2019. (Caderno Setorial ETENE).

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.