

A Utilização de Simulador de Realidade Virtual no Treinamento de Habilidades nos Processos de Soldagem ao Arco Elétrico

The Use of Virtual Reality Simulator in Skill Training for Electric Arc Welding Processes

El Uso de Simulador de Realidad Virtual en el Entrenamiento de Habilidades en Procesos de Soldadura por Arco Eléctrico

Recebido
Received
Recibido
Dez. 2024

Aceito
Accepted
Aceptado
Mar. 2025

Publicado
Published
Publicado
Jul./Set. 2025
Jul./Sep. 2025

<https://git.fateczl.edu.br>

e_ISSN
2965-3339

DOI
10.29327/2385846.3.4-6

São Paulo
v. 3 | n. 4
v. 3 | i. 4
e34135
Julho-Setembro
July-September
Julio-Septiembre
2025



Juliano Neves Panao^{1,2}

juliano.panao@unesp.br
juliano.panao@fatec.sp.gov.br

Edgar Dutra¹

edgar.dutra@fatec.sp.gov.br

Nasareno das Neves^{1,2}

nasareno.neves@fatec.sp.gov.br
n.neves@unesp.br

Gislaine Batistela¹

gislaine.batistela@unesp.br

Jorge Muniz¹

jorge.muniz@unesp.br

1 – FEG – UNESP

2 – FATEC São Paulo – Itaquera

Resumo:

Este trabalho estuda de forma abrangente o impacto de duas estratégias de ensino no aprendizado de processos de soldagem ao arco elétrico, comparando o uso de simuladores de realidade virtual (VR) com o treinamento prático em equipamentos de soldagem reais. Ao criar um ambiente virtual seguro e controlado, essa tecnologia possibilita que o treinamento aconteça sem os riscos do ambiente real. A realidade virtual permite que os alunos pratiquem soldagem de forma imersiva, evitando a exposição a materiais perigosos, o que adiciona uma camada de segurança essencial. Nossa análise aprofunda-se nos efeitos do simulador sobre a eficiência do treinamento, destacando especialmente o impacto positivo do feedback imediato, que acelera o desenvolvimento de habilidades e a compreensão das técnicas envolvidas. Além disso, essa abordagem promove a economia de recursos como materiais e energia. Os resultados indicam não só ganhos educativos, mas também econômicos, evidenciando a crescente importância dessa tecnologia na capacitação de profissionais especializados em soldagem.

Palavras-chave: Realidade Virtual; Treinamento; Soldagem a arco; Simulador.

Abstract:

This study comprehensively examines how virtual reality (VR) simulators can enhance learning in arc welding processes compared to training on real welding equipment. By creating a safe and controlled virtual environment, this technology allows training

to take place without the risks associated with real-world settings. Virtual reality enables students to practice welding immersively, avoiding exposure to hazardous materials and adding a vital layer of safety. Our analysis delves into the simulator's effects on training efficiency, particularly highlighting the positive impact of immediate feedback, which accelerates skill development and comprehension of techniques. Moreover, this approach promotes resource savings, including materials and energy. The results indicate educational and economic benefits, underscoring the growing importance of this technology in training specialized welding professionals.

Keywords: *Virtual Reality; Training; Arc Welding; Simulator.*

Resumen:

Este trabajo estudia de forma exhaustiva cómo los simuladores de realidad virtual (VR) pueden optimizar el aprendizaje en los procesos de soldadura al arco eléctrico, en comparación con el entrenamiento en equipos de soldadura reales. Al crear un entorno virtual seguro y controlado, esta tecnología permite que el entrenamiento se realice sin los riesgos del entorno real. La realidad virtual permite a los estudiantes practicar soldadura de forma inmersiva, evitando la exposición a materiales peligrosos, lo que añade una capa esencial de seguridad. Nuestro análisis se profundiza en los efectos del simulador sobre la eficiencia del entrenamiento, destacando especialmente el impacto positivo de la retroalimentación inmediata, que acelera el desarrollo de habilidades y la comprensión de las técnicas involucradas. Además, este enfoque fomenta el ahorro de recursos, como materiales y energía. Los resultados indican no solo beneficios educativos, sino también económicos, evidenciando la creciente importancia de esta tecnología en la capacitación de profesionales especializados en soldadura.

Palabras clave: *Realidad Virtual; Entrenamiento; Soldadura por Arco; Simulador.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem, um dos processos de união mais utilizados na fabricação de estruturas metálicas e equipamentos em diferentes segmentos, é amplamente reconhecida pela sua capacidade de unir componentes de maneira permanente, garantindo a integridade estrutural da peça final (LASSITER et al., 2023).

O domínio de habilidades nos processos de soldagem ao arco elétrico é essencial para a garantia do alcance dos requisitos mínimos e a integridade de uma junta soldada. Os estudantes, especialmente aqueles que são iniciantes em atividades práticas como soldagem, geralmente enfrentam frustração devido à curva de aprendizado inicial (PRASETYA et al., 2023).

Segundo OKIMOTO et al. (2015), o treinamento em soldagem manual ou semiautomática exige habilidades técnicas aprofundadas e familiaridade com equipamentos e consumíveis específicos, essenciais para a execução de tarefas em geometrias complexas ou locais de difícil acesso, onde a automação é impraticável.

RODRÍGUEZ e GONZÁLEZ (2019) enfatiza que apesar de sua ampla aplicação, a soldagem apresenta desafios significativos que requerem contínuo desenvolvimento e inovação. A soldagem é um componente crítico em várias disciplinas de engenharia, incluindo engenharia industrial, mecânica, aeronáutica e naval. É essencial para o projeto, implementação e controle de qualidade de estruturas soldadas.

A soldagem é potencialmente perigosa, em especial quando não se tem pleno conhecimento dos riscos de saúde e segurança, podem impactar negativamente à integridade física dos aprendizes, caso todos os procedimentos e equipamentos de proteção individual não sejam utilizados (ZULKIFLI et al., 2022).

A soldagem ocupa um papel central na fabricação industrial contemporânea, sendo apontada como uma das tecnologias mais relevantes no setor global de manufatura, conforme observado por GAO (2020). Considerando essa relevância, o foco em qualificar profissionais e integrar tecnologias inovadoras é não apenas justificado, mas essencial. Esse direcionamento busca otimizar processos, promovendo eficiência no uso de materiais e energia, enquanto reduz impactos ambientais, como a emissão de carbono, que é uma preocupação crescente nas práticas industriais atuais.

Com base nestas afirmações, justifica-se a busca não somente por processos de soldagem que atendam às demandas emergentes, mas também pela formação de profissionais capazes de explorar ao máximo os processos disponíveis, visando atender aos requisitos de qualidade e produtividade cada vez mais exigentes. Para responder à crescente demanda por profissionais qualificados, a *American Welding Society* - AWS (2024) informa que existe uma demanda de 330.000 novos profissionais até 2028, sendo uma média de 82.500 de vagas de emprego a serem preenchidas a partir de 2024.

CHUNG, TUNG e LOU (2020) destacam as vantagens dos simuladores de VR em termos de segurança, eficiência de custos e engajamento em comparação com os métodos tradicionais, sugerindo que pesquisas adicionais poderiam melhorar

a compreensão dessas diferenças.

O estudo realizado tem como objetivo avaliar a eficácia do uso de simuladores de VR no treinamento e desenvolvimento de habilidades em soldagem ao arco elétrico, considerando desempenho, retenção de conhecimento e percepção dos usuários em relação à experiência de aprendizagem em comparação aos métodos convencionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tecnologia de realidade virtual (VR) é usada para projetar e simular processos industriais, como o de soldagem, por exemplo (PRASETYA et al., 2023).

De acordo com RODRÍGUEZ e GONZÁLEZ (2019), estratégias de ensino por meio da utilização dos recursos de VR e de realidade aumentada (AR) são uma alternativa econômica para a realização de práticas de laboratório buscando o desenvolvimento de habilidades. O ensino de habilidades em soldagem sempre foi um desafio, não somente pela necessidade de conhecimentos básicos sobre cada processo, mas também pelo desenvolvimento de habilidades que dependem de treinamento intensivo e na maioria das vezes exaustivo, além da exposição dos alunos e pessoas próximas a riscos de saúde e segurança.

A prática de soldagem, reconhecida pela exigência de habilidades técnicas precisas, encontra nos simuladores de VR uma ferramenta para o desenvolvimento seguro e progressivo de competências. Esses simuladores criam ambientes controlados onde o aluno pode praticar as técnicas de soldagem, superando os desafios iniciais de forma segura e evitando os custos associados ao treinamento físico. Como observado por PRASETYA et al. (2023), a realidade virtual se apresenta como uma solução mais econômica e eficaz, ao mesmo tempo que promove um aprendizado profundo e baseado na repetição sem desperdício de materiais.

SCOTTI (2017) afirma que soluções tecnológicas e de automação de soldagem podem ajudar a suprir a escassez de mão de obra especializada e a tornar o processo de produção mais eficiente, sustentável e de alta qualidade.

A prática de soldagem apresenta riscos que podem afetar diretamente a saúde e a segurança dos aprendizes. Esses perigos tornam-se ainda mais significativos quando as normas de segurança não são seguidas com adequadamente, elevando a probabilidade de acidentes e danos à saúde dos envolvidos. A falta de experiência dos estudantes pode aumentar o risco de acidentes, sublinhando a importância de um ambiente controlado para o treinamento (ZULKIFLI et al., 2022). Diante desses desafios, a utilização de simuladores de VR se destaca como uma solução para aprimorar o treinamento. Esta tecnologia proporciona um ambiente de aprendizado imersivo onde os alunos são capazes de desenvolver habilidades de soldagem em um ambiente seguro e controlado (CHUNG et al., 2020)

Nesse cenário, o uso de simuladores de realidade virtual torna-se ainda mais relevante, pois não apenas melhora o acesso ao treinamento, mas também

proporciona benefícios econômicos e ambientais, como a economia de recursos e a redução de emissões.

3. MÉTODO

Para compreender a eficácia de simuladores de VR em comparação ao treinamento com equipamentos reais, foi estruturado um estudo experimental que envolveu estudantes do curso de Tecnologia em Mecânica, com foco em Processos de Soldagem, da Fatec Itaquera. A amostra incluiu dez alunos que não possuíam experiência prévia em soldagem, divididos de forma aleatória em dois grupos de cinco participantes, uma escolha feita para garantir a comparabilidade entre os grupos e minimizar possíveis vieses.

O treinamento de um dos grupos foi conduzido exclusivamente com o simulador de VR VRTEX 360, enquanto o segundo grupo utilizou equipamentos de soldagem reais. Ambos os grupos seguiram um cronograma de 180 minutos, voltado para o desenvolvimento de técnicas fundamentais de soldagem, o que permitiu uma uniformidade nas condições de prática. Ao término do treinamento, todos os participantes realizaram uma solda em equipamento real, o que possibilitou uma avaliação direta entre os métodos de ensino.

As variáveis analisadas foram qualidade das juntas soldadas, produtividade, tempo de processo e custo por peça. Para a avaliação da qualidade das soldas, realizamos uma inspeção visual e dimensional somente nas peças soldadas após o treinamento (uma peça de cada aluno de ambos os grupos) utilizando o equipamento de soldagem real. Os critérios de descontinuidade analisados foram: escória, sobreposição, respingos, deposição insuficiente, desalinhamento, falta de fusão, mordedura, reforço excessivo e porosidade, todos essenciais para assegurar a integridade das soldas.

A produtividade foi medida pela quantidade de juntas concluídas ao longo dos 180 minutos, com foco na eficiência e consistência de cada método. Tempo de processo abrangeu a cronometragem das etapas de preparação das juntas e da soldagem em si, oferecendo uma visão detalhada sobre o ritmo e a agilidade proporcionada por cada abordagem.

Finalmente, o custo por peça foi calculado a partir dos gastos com processo, inspeção, matéria-prima, arame de solda, gás de proteção e energia elétrica.

A pesquisa investiga se o treinamento com simuladores de realidade virtual em soldagem GMAW oferece uma alternativa mais segura, econômica e eficiente que o método tradicional, especialmente no desenvolvimento de habilidades práticas. A análise busca identificar vantagens competitivas que os simuladores possam trazer, proporcionando uma base sólida para sua adoção em programas de capacitação profissional.

Para assegurar uma análise minuciosa e precisa dos dados, foi aplicado inicialmente o Teste t, que permitiu uma avaliação quantitativa, verificando a significância das diferenças de desempenho entre os dois métodos de treinamento. Em seguida, utilizou-se o Diagrama de Pareto na avaliação

qualitativa das discontinuidades, proporcionando uma visão detalhada das principais causas e da frequência com que ocorrem RODRÍGUEZ e GONZÁLVEZ (2019); PRASETYA et al. (2023).

3.1 Dicionário de Dados

O dicionário de dados (tabela 1) é uma ferramenta essencial para organizar e documentar informações sobre as variáveis envolvidas em um estudo ou análise de dados, servindo como uma referência clara e estruturada, facilitando o entendimento de cada variável usada na pesquisa, incluindo seu propósito, tipo, unidade de medida e qualquer outra informação relevante.

Tabela 1 – Dicionário de dados

Variável	Descrição
Aluno	Identificação do aluno (variável categórica)
Idade	Idade do aluno (em anos)
Grupo	Grupo de treinamento (simulador de realidade virtual ou equipamento real)
Descontinuidades	Número de descontinuidades nas soldas realizadas (variável quantitativa)
Tempo de Treinamento	Tempo total de treinamento (em minutos)
Juntas Produzidas	Número de juntas soldadas produzidas durante o treinamento
Custo Total	Custo total do treinamento (em reais)

Fonte: Autoria Própria

O objetivo desta ferramenta neste trabalho foi de detalhar as variáveis coletadas neste estudo (tabela 2), comparando o uso de simuladores de VR com equipamentos de soldagem reais.

Tabela 2 – Detalhamento das variáveis por grupo

Variável	Grupo Simulador de Realidade Virtual	Grupo Equipamento Real
Aluno	A1, A2, A3, A4, A5	A6, A7, A8, A9, A10
Idade	20, 38, 52, 46, 19	20, 27, 42, 31, 38
Descontinuidades	Falta de fusão, Porosidade, Escória, Sobreposição, Mordedura, Deposição Insuficiente, Respingos, Reforço excessivo, Desalinhamento	Falta de fusão, Porosidade, Escória, Sobreposição, Mordedura, Deposição Insuficiente, Respingos, Reforço excessivo, Desalinhamento
Tempo de Treinamento	36, 36, 36, 36, 36	36, 36, 36, 36, 36
Juntas Produzidas	20, 20, 20, 20, 20	4, 4, 4, 4, 4
Custo Total por junta	2.40, 2.40, 2.40, 2.40, 2.40	22.94, 22.94, 22.94, 22.94, 22.94

Fonte: Autoria Própria

Cada variável analisada é descrita de maneira que seu significado e função na análise fiquem claros para todos os envolvidos no projeto. Esse nível de detalhamento permite que pesquisadores e analistas entendam de forma precisa como os dados foram estruturados, facilitando tanto a interpretação dos resultados quanto a replicação do estudo em outras circunstâncias ou com novas amostras.

3.2. Análise Exploratória e Visualização dos Dados

Para realizar a análise dos dados (tabela 3), utilizamos tanto o Microsoft Excel quanto o Minitab. O Excel foi essencial para a construção de gráficos como o de Pareto, que nos ajudaram a identificar as principais descontinuidades. Já o

Minitab foi utilizado para conduzir análises estatísticas mais complexas, como o Teste t, garantindo que pudéssemos comparar de forma rigorosa os métodos de treinamento.

Tabela 3 – Análise Exploratória dos dados		
Métrica	Teste t (Valor-P)	Dif. Real x VR
Descontinuidades	0,291	-
Juntas Produzidas	-	500%
Tempo de Processo	-	500%
Custos	-	956%

Fonte: Autoria Própria

3.3. Teste T de Student

Para comparar as médias das métricas principais entre os grupos que treinaram com o simulador de VR e os que usaram o equipamento real, aplicamos o teste t, com auxílio do software Minitab. Esse teste estatístico é ideal para avaliar se as diferenças observadas entre as médias dos dois grupos são significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso, o que nos ajuda a validar cientificamente se as vantagens de produtividade, eficiência e custo oferecidas pelo simulador VR são realmente superiores.

Através desta ferramenta, conseguimos validar com rigor as diferenças em produtividade, eficiência e economia proporcionadas pelo simulador em comparação ao método tradicional, oferecendo uma base sólida para nossas conclusões. Esse teste é particularmente indicado quando comparamos duas amostras independentes, pois permite verificar se a diferença entre as médias é realmente significativa. Vale lembrar que ele parte de dois pressupostos: os dados precisam seguir uma distribuição normal, e as variâncias entre os grupos devem ser semelhantes.

Neste estudo, comparamos o desempenho de dois métodos de treinamento em soldagem — um usando o simulador de VR e o outro com o equipamento real. Analisamos quatro métricas principais: descontinuidades, quantidade de juntas produzidas, tempo de processo e custos. No entanto, o teste t foi aplicado apenas para analisar as descontinuidades observadas nas soldas. Os dados foram coletados de dois grupos, cada um com cinco alunos, após 180 minutos de treinamento. A seguir, detalhamos os resultados encontrados para cada uma das métricas. As descontinuidades avaliadas nas soldas produzidas foram: inclusão de escória, sobreposição, respingos, deposição insuficiente, desalinhamento, falta de fusão, mordedura, reforço excessivo e porosidade.

Resultados do Teste t (descontinuidades):

- Estatística t: -1,129
- Valor-p: 0,291

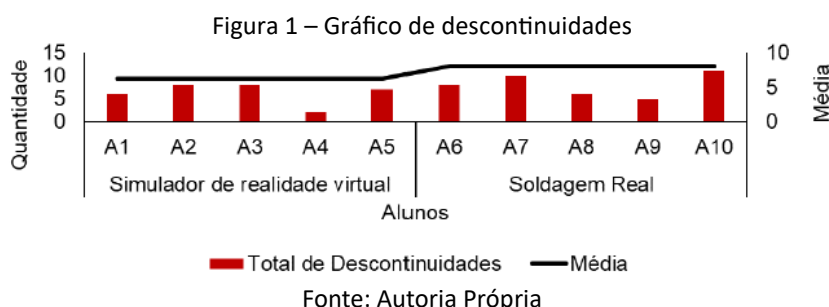
O teste de hipótese foi realizado para a métrica “Descontinuidades” (defeitos nas soldas):

- Hipótese Nula (H0): Não há diferença significativa entre a quantidade média de descontinuidades nos dois métodos de treinamento.

- Hipótese Alternativa (H1): Existe uma diferença significativa entre a quantidade média de descontinuidades nos dois métodos.

Como o valor-p (0,291) é maior que o nível de significância de 0,05; não rejeitamos a hipótese nula. Concluímos que não há evidências suficientes para afirmar que existe uma diferença significativa nas descontinuidades entre os dois métodos de treinamento.

O gráfico abaixo (figura 1) mostra a evolução das descontinuidades evidenciadas após a análise da qualidade das soldas em ambos os métodos de treinamento.



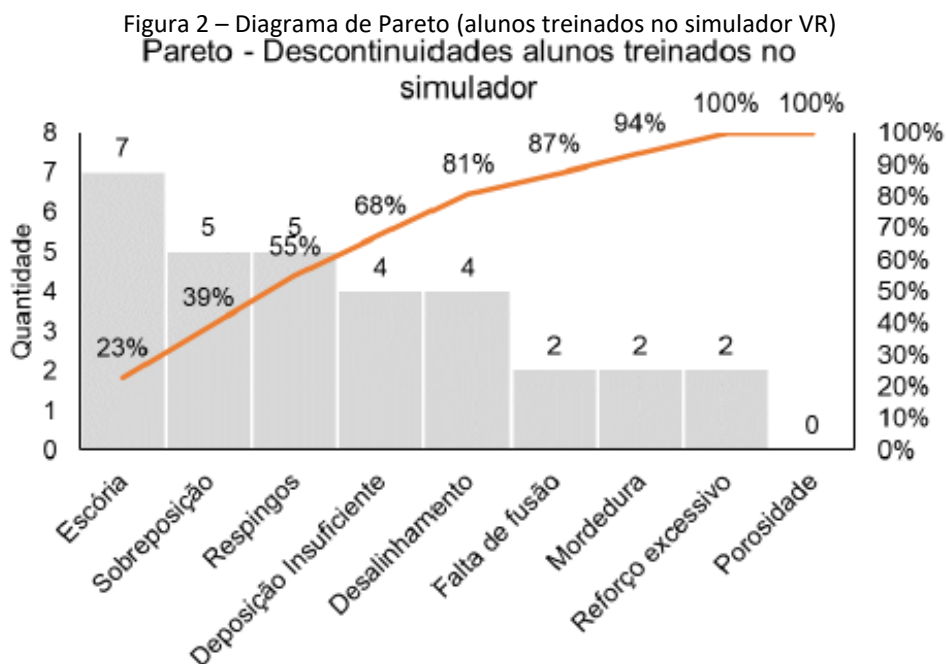
Embora esta ferramenta tenha mostrado que não há uma diferença significativa na quantidade média de descontinuidades entre os dois métodos de treinamento, é importante realizar uma análise mais detalhada e qualitativa para entender melhor os tipos específicos de defeitos que ocorrem com mais frequência em cada método, desta forma, será realizada também posteriormente a análise através do Diagrama de Pareto para uma análise qualitativa das descontinuidades.

3.4. Diagrama de Pareto

Para analisar de forma qualitativa as descontinuidades encontradas nas soldas, utilizando o software Microsoft Excel aplicamos o diagrama de Pareto, que nos ajudou a identificar os tipos de defeitos mais frequentes e críticos. Essa ferramenta visual é extremamente útil para destacar quais problemas afetam mais a qualidade das soldas, guiando-se pelo princípio de que cerca de 80% dos problemas são originados por apenas 20% das causas. Com o diagrama de Pareto, conseguimos identificar e priorizar as áreas que requerem mais atenção e intervenção, facilitando a implementação de melhorias precisas e eficientes no treinamento em soldagem. Isso é fundamental para garantir que tanto o método com simulador quanto o método tradicional consigam manter altos padrões de qualidade nas soldas.

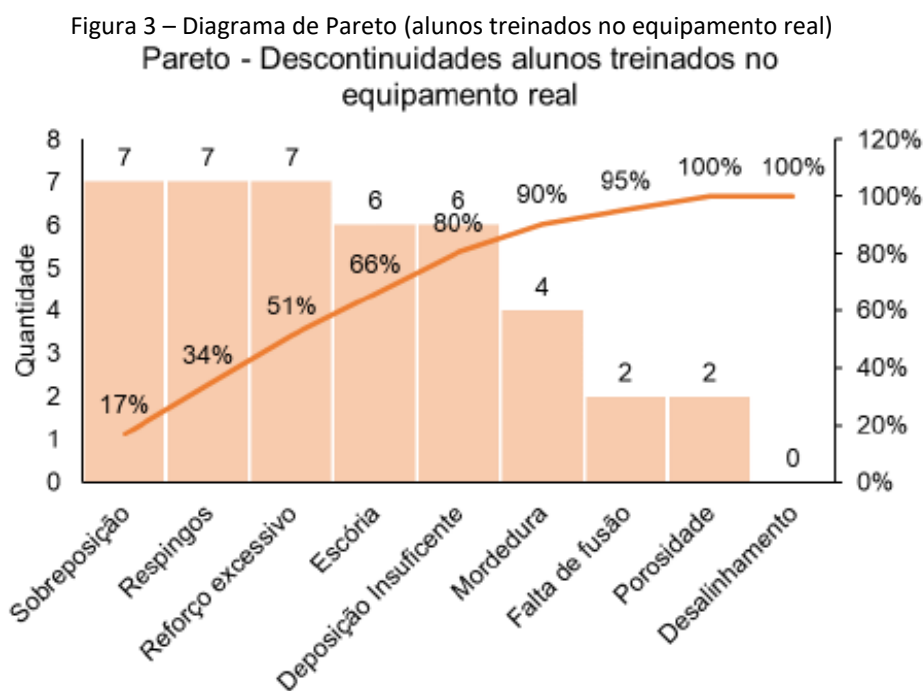
No processo de identificar as causas mais comuns de descontinuidades, o gráfico de Pareto mostrou-se eficaz ao visualizar os principais fatores que contribuem para os defeitos encontrados. Na análise dos dados, como ilustram as figuras 2 e 3, observamos que, no simulador de realidade virtual, descontinuidades como escória vítrea, sobreposição, respingos, deposição insuficiente e desalinhamento corresponderam a 81% dos problemas identificados. Esses resultados orientam nosso foco para um treinamento mais direcionado, ajustando as variáveis que

afetam essas cinco questões principais.



Fonte: Autoria Própria

Já nos resultados observados nas atividades dos alunos treinados com o equipamento real (figura 3), os defeitos de sobreposição, respingos e reforço excessivo se destacaram em termos percentuais. Somados a escória e deposição insuficiente, esses defeitos representam 80% das descontinuidades encontradas, o que também orienta a necessidade de um treinamento focado nessas áreas específicas.



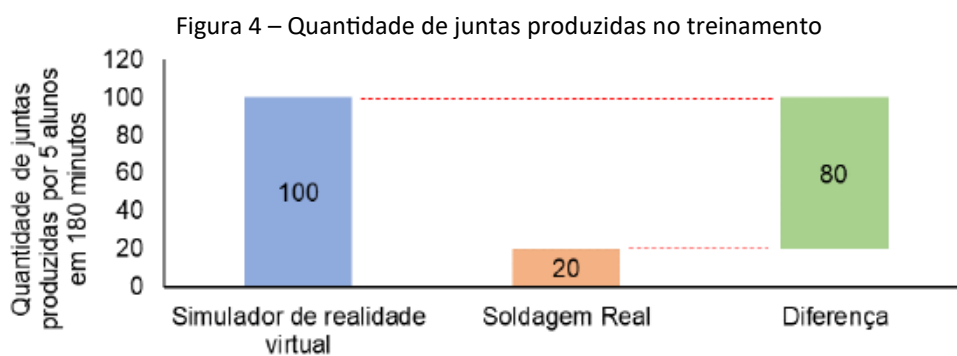
Fonte: Autoria Própria

4. ANÁLISE COMPARATIVA

4.1 Juntas produzidas

No comparativo realizado, cada grupo de alunos realizou o treinamento sob um prazo determinado de 180 minutos estabelecido como métrica para a realização do comparativo.

A figura 4 abaixo mostra a quantidade de juntas produzidas no período determinado.



Fonte: Autoria Própria

4.2. Descontinuidades

Na tabela 4 é apresentado um resumo das descontinuidades encontradas nas peças realizadas durante o treinamento, a análise a partir do Gráfico de Pareto e as ações relevantes para um plano de ação de melhorias.

- Escória é a descontinuidade mais frequente no simulador, enquanto Sobreposição e Respingos são comuns em ambos os métodos, mas predominam no treinamento real;
- Reforço Excessivo é um problema maior no treinamento com equipamento real, indicando um possível excesso de material depositado;
- Desalinhamento não é um problema significativo no treinamento real, mas aparece no simulador, sugerindo a necessidade de melhorar as técnicas de alinhamento no ambiente virtual

Concentrando-se nos 80% dos problemas principais, as ações mais relevantes a serem tomadas seriam as indicadas na tabela acima para os dois grupos.

Portanto, podemos verificar que o grupo que usou o simulador de realidade virtual produziu significativamente mais juntas que o grupo que utilizou o equipamento de soldagem real, refletindo em um melhor aproveitamento do tempo e de aprendizagem.

Tabela 4 – Comparativo das Descontinuidades (80% dos Problemas)

Descontinuidade	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real	Ação Relevante
Escória	7 (23%)	6 (66% acumulado)	Desenvolver treinamento específico para a remoção de escória, instruindo sobre técnicas de soldagem e o uso correto de ferramentas e acessórios para a remoção da escória
Sobreposição	5 (39% acumulado)	7 (17%)	Introduzir treinamento focado sobre técnicas para a obtenção de uma deposição uniforme para evitar a sobreposição. Utilizar simuladores para praticar em um ambiente seguro e controlado antes de aplicar no equipamento real.
Respingos	5 (55% acumulado)	7 (34% acumulado)	Desenvolver exercícios práticos que ensinem técnicas para reduzir respingos, com ajustes de parâmetros de soldagem e inclinação da tocha e limpeza do bocal.
Deposição Insuficiente	4 (68% acumulado)	6 (80% acumulado)	Focar no treinamento para garantir a quantidade adequada de material de solda, ajustando as velocidades de soldagem e de alimentação do arame / corrente de soldagem.
Desalinhamento	4 (81% acumulado)	0 (0%)	Desenvolver exercícios para reforçar o alinhamento adequado das peças. Utilizar a ajuda existente no simulador para o treinamento desta habilidade durante o treinamento, no equipamento real traçar os linhas para facilitar o controle do alinhamento durante a soldagem.

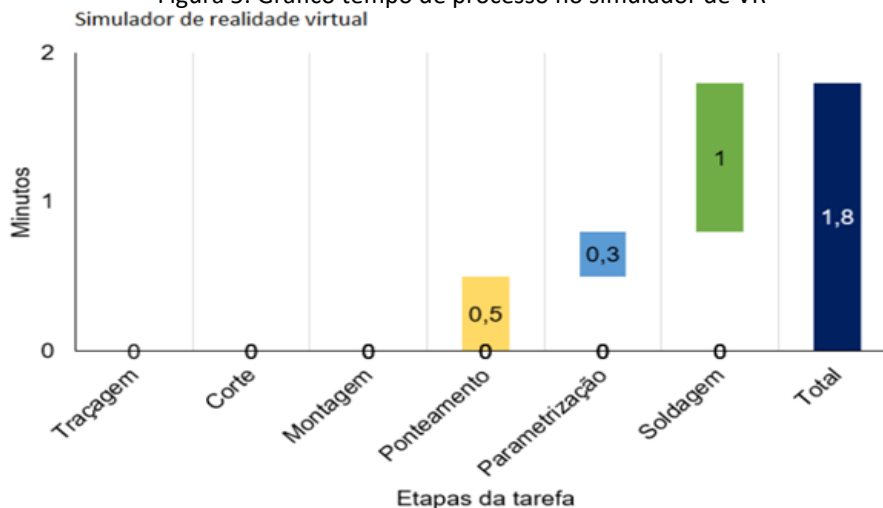
Fonte: Autoria Própria

4.3 Tempo de processo

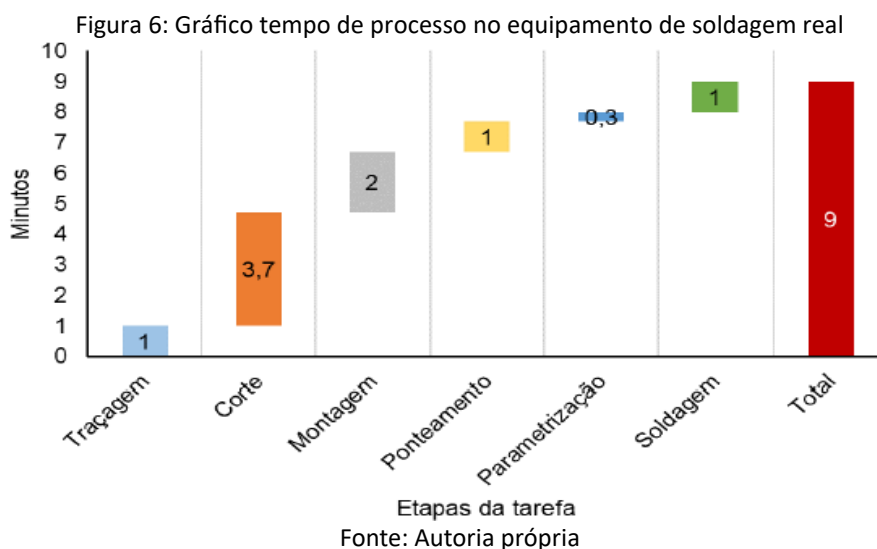
Sobre o tempo de processo, para a realização deste comparativo foram levadas em consideração todas as etapas para a obtenção da junta antes da realização do exercício, utilizando o equipamento real com o objetivo de realizar o comparativo de custos, sendo elas: traçagem, corte, montagem, ponteamto, parametrização e soldagem.

O gráfico da figura 5 evidencia ganho significativo em tempo de processo no treinamento realizado no simulador de realidade virtual. O tempo de processo foi significativamente menor para os alunos que utilizaram o simulador de realidade virtual – 1,8 min/ peça (figura 5) em comparação com os alunos que utilizaram o equipamento de soldagem real – 9,0 minutos/peça (Figura 6).

Figura 5: Gráfico tempo de processo no simulador de VR



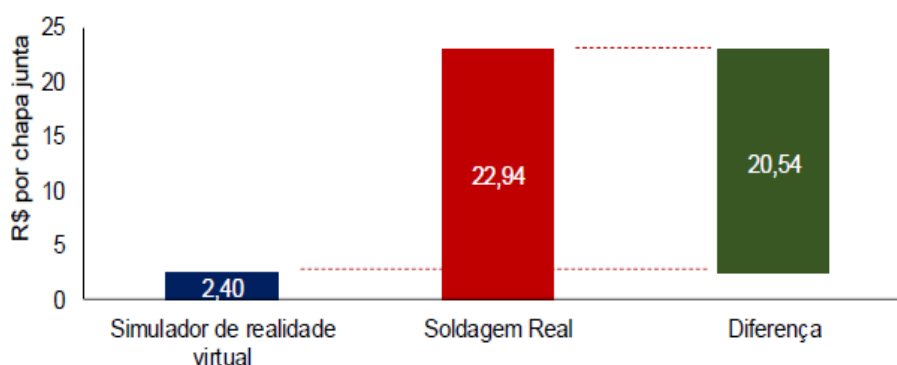
Fonte: Autoria própria



4.4 Custos

Os custos referem-se ao total / peça produzida por aluno durante o treinamento, levando em consideração os materiais utilizados e outros custos associados ao processo.

Figura 7: Gráfico Custo por peça
Preço de uma junta soldada



Fonte: Autoria própria

Os custos por peça foram significativamente menores para os alunos que utilizaram o simulador de VR (R\$ 2,40) em comparação com os alunos que utilizaram o equipamento real (R\$ 22,94).

Abaixo é apresentado um comparativo de custos entre o treinamento realizado com simulador de VR e equipamento real.

Os custos (tabela 5) foram analisados considerando diversos fatores, incluindo custos com o processo, tempo de inspeção, matéria-prima, consumíveis de soldagem (arame de solda e gás de proteção) e energia elétrica.

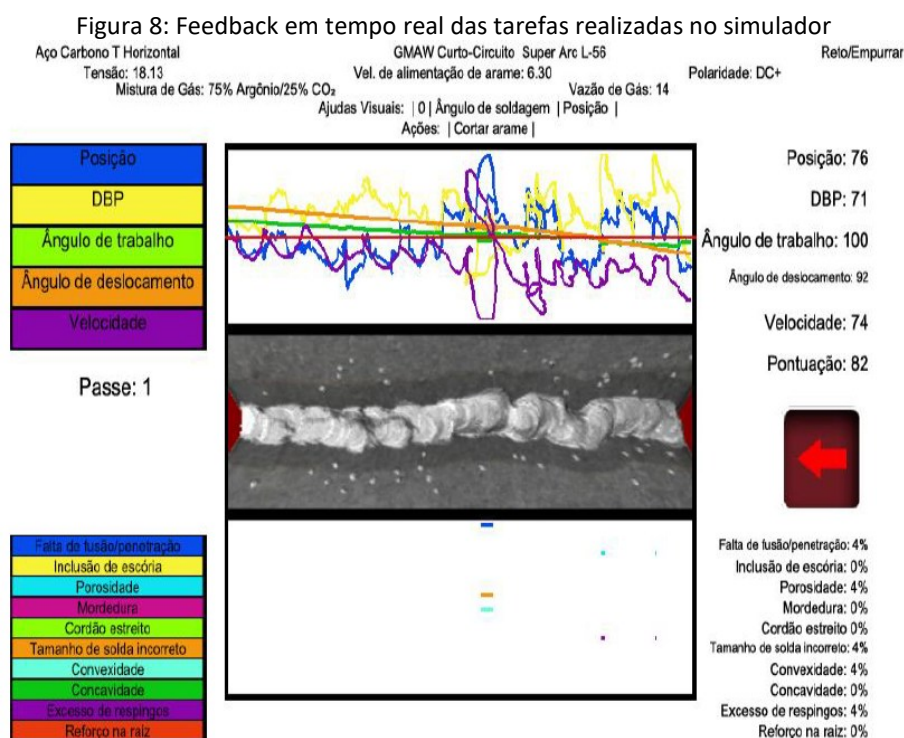
Os resultados apresentados na tabela 5 indicam uma diferença significativa nos custos entre os métodos de treinamento. O custo por peça do treinamento com o simulador de realidade virtual é substancialmente menor (R\$ 2,41) em comparação com o treinamento realizado com equipamento real (R\$ 22,94). Este diferencial é atribuído principalmente aos custos com o processo e matéria-prima no treinamento real.

Sobre o custo com tempo de inspeção, podemos considerar outro diferencial positivo sobre o uso de simuladores de realidade virtual, pelo fato de que o feedback do experimento realizado é feito em tempo real (figura 8), evidenciando as oportunidades de melhoria da técnica de soldagem e os defeitos relacionados a cada desvio.

Tabela 5 – Comparativo de custos por peça

Custo com:	Simulador (R\$)	Equipamento Real (R\$)
Processo	2,39	12,00
Tempo de Inspeção	0,00	5,33
Matéria Prima	0,00	4,67
Arame de solda	0,00	0,62
Gás de Proteção	0,00	0,21
Energia Elétrica	0,01	0,11
Custo Total	2,40	22,94

Fonte: Autoria própria



Sobre os custos com matéria prima, arame de solda e gases de proteção, estes não são utilizados no simulador de realidade virtual, proporcionando vantagens significativas em relação à segurança, exposição à radiação e fumos de soldagem aos alunos, além da contribuição com o meio ambiente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo realizado confirma que simuladores de VR são uma alternativa prática e segura para o treinamento em soldagem, agregando benefícios substanciais em economia de tempo e recursos. A implementação de simuladores de VR em como

ferramenta para potencializar o alcance de resultados superiores na aprendizagem pode revolucionar a formação de novos profissionais, com potencial para reduzir custos e aumentar a eficiência dos programas de treinamento, como mostrado na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Comparativo dos pontos positivos e negativos

Pontos Positivos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real	Pontos Negativos	Simulador de Realidade Virtual	Equipamento Real
Custo Reduzido	Menor custo total (R\$ 2.41)	-	Menor Realismo	Pode não replicar perfeitamente as condições reais	-
Segurança Aumentada	Ambiente seguro, sem riscos físicos	-	Descontinuidades Específicas	Alta ocorrência de escória	-
Flexibilidade e Repetição	Repetição ilimitada sem desgaste de materiais	-	Limitações Tecnológicas	Não captura todas as nuances do processo real	-
Redução de Descontinuidades	Menor ocorrência de reforço excessivo e desalinhamento	-	Custo Elevado	-	Maior custo total (R\$ 22.94)
Maior Realismo e Transferência	-	Experiência próxima das condições reais	Maior Ocorrência de Descontinuidades	-	Maior ocorrência de sobreposição e respingos
Identificação de Problemas Reais	-	Identificação de problemas específicos do campo	Riscos de Segurança	-	Riscos físicos como queimaduras e exposição a fumos

Fonte: Autoria própria

Os resultados indicam que o simulador de VR se destaca como uma ferramenta eficaz para o treinamento em soldagem, mostrando reduções substanciais de custos e tempo de treinamento em comparação ao método tradicional. Esse ganho financeiro é significativo: uma economia de quase 90% por peça, o que, além de ser econômico, atende a uma demanda prática que SCOTTI (2017) já tinha destacado, ao apontar a VR como um recurso que economiza materiais e energia.

Além disso, o tempo de processo por peça foi muito menor com o uso de VR, permitindo que os alunos aproveitassem melhor o tempo disponível para praticar, pois o simulador elimina várias etapas do treinamento convencional e o ambiente virtual oferece segurança total. Isso é essencial, principalmente em ambientes de aprendizado onde a prática frequente é fundamental para a retenção de habilidades.

Embora não tenha surgido uma diferença estatística significativa na média de descontinuidades entre os métodos (valor-p = 0,291), cada método apresentou padrões próprios de erro. Nos testes com o simulador, escória e desalinhamento se destacaram, o que indica áreas de melhoria no feedback oferecido pelo simulador, conforme aponta OKIMOTO (2015). Já com os equipamentos reais, problemas como reforço excessivo e sobreposição ocorreram com mais frequência, sugerindo que um treinamento inicial no simulador poderia ajudar a corrigir alguns desses erros antes de passar ao equipamento real.

Outro ponto forte do simulador é o feedback instantâneo, que ajuda o aluno a identificar e corrigir falhas em tempo real. Estudos como o de PRASETYA et al. (2023) corroboram essa vantagem, destacando que esse tipo de retorno rápido ajuda os alunos a progredirem mais rapidamente e a entenderem melhor os detalhes do processo de soldagem. Isso torna o aprendizado mais envolvente e ativo, reduzindo a necessidade de inspeções demoradas.

Os achados reforçam que o simulador de VR se destaca como uma ferramenta econômica e segura, promovendo o desenvolvimento acelerado e eficiente de competências essenciais. No contexto da escassez de soldadores qualificados (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2023), a tecnologia de VR oferece uma abordagem inovadora e prática, aprimorando tanto a capacitação profissional quanto a qualidade dos processos de soldagem.

PRASETYA et al. (2023), afirma que os simuladores de realidade RV foram desenvolvidos para serem utilizados como estratégia de ensino e não como substituição do treinamento real, com o objetivo principal de complementar e otimizar o processo de ensino-aprendizagem.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste estudo demonstram que o uso de simuladores de VR é uma opção vantajosa e acessível para o treinamento em soldagem ao arco elétrico. Essa abordagem não só facilita a retenção de conhecimento e o aprimoramento de habilidades práticas, mas também oferece benefícios adicionais em termos de segurança, economia de recursos e impacto ambiental positivo. Observando as descontinuidades mais comuns, percebe-se que ainda há espaço para aprimorar a qualidade das soldas em ambiente VR, reforçando a precisão e a efetividade do aprendizado.

O simulador de VR, além de oferecer economia de materiais e insumos, proporciona feedback em tempo real, tornando-se uma estratégia promissora para capacitação, com aplicação prática em contextos educacionais e produtivos. Essa tecnologia tem o potencial de mitigar a escassez de profissionais qualificados na área de soldagem, formando equipes mais preparadas para os desafios práticos do setor. Recomendamos, então, a adoção de simuladores VR para complementar o treinamento tradicional, otimizando tempo e reduzindo custos, além da garantia da formação de mão de obra mais especializada e em menor tempo.

REFERÊNCIAS

- CHUNG, C. C.; TUNG, C. C.; LOU, S. J. Research on optimization of vr welding course development with anp and satisfaction evaluation. *Electronics (Switzerland)*, v. 9, n. 10, p. 1–28, 1 out. 2020.
- GAO, Y.; ZHANG, S.; HE, J. Design and development of welding expert system. *Journal of Physics: Conference Series. Anais...IOP Publishing Ltd*, 23 nov. 2020.

LASSITER, T. et al. Welding Instructors' Perspectives on Using AI Technology in Welding Training. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, v. 60, n. 1, p. 233–243, 1 out. 2023.

OKIMOTO, M. L. L. R.; OKIMOTO, P. C.; GOLDBACH, C. E. User Experience in Augmented Reality Applied to the Welding Education. *Procedia Manufacturing*. Anais...Elsevier B.V., 2015.

PRASETYA, F. et al. Virtual Reality Adventures as an Effort to Improve the Quality of Welding Technology Learning During a Pandemic. *International journal of online and biomedical engineering*, v. 19, n. 2, p. 4–22, 2023a.

PRASETYA, F. et al. Virtual Reality Adventures as an Effort to Improve the Quality of Welding Technology Learning During a Pandemic. *International journal of online and biomedical engineering*, v. 19, n. 2, p. 4–22, 2023b.

RODRÍGUEZ-MARTÍN, M.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. Learning methodology based on weld virtual models in the mechanical engineering classroom. *Computer Applications in Engineering Education*, v. 27, n. 5, p. 1113–1125, 1 set. 2019.

SCOTTI, A. Aumento da eficácia do aprendizado de soldagem por aulas práticas assistidas por audiovisual de forma não passiva. *Soldagem e Inspeção*, v. 22, n. 3, p. 300–308, 1 jul. 2017.

WELDING WORKFORCE DATA. Disponível em: <https://weldingworkforcedata.com/>. Acesso em: 31 out. 2024.

ZULKIFLI, A. N. et al. ARC WELDING EDUCATION: MOBILE ARC WELDING LEARNING APP TO IMPROVE STUDENTS' MOTIVATION. *Journal of Creative Industry and Sustainable Culture*, v. 1, p. 51–69, 31 out. 2022.

"Os conteúdos expressos no trabalho, assim como os direitos autorais de figuras e dados, bem como sua revisão ortográfica e das normas são de inteira responsabilidade do(s) autor(es)."

"Os autores do trabalho declaram que durante a preparação do manuscrito foi utilizada a ferramenta ChatGPT, de Inteligência Artificial (IA), para apoio na organização das ideias e na reformulação pontual de trechos, visando maior clareza e coesão no texto. Após o uso destas ferramentas, os autores editaram e revisaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo da publicação."