TECNOLOGIAS CAx NA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA DO SUL DO ESPÍRITO SANTO: ADOÇÃO, MATURIDADE DE MANUFATURA E RELAÇÃO COM O TRL

Nicolly Rodovalho da Costa, Victor Santos Pinheiro, Marcelo Chagas

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim, Rodovia ES-482, Fazenda Morro Grande, 29.322-000 - Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil, nicollyrodovalho@gmail.com, victorpinheiro584@gmail.com marcelo.chagas@ifes.edu.br

Resumo:

A transformação digital da indústria metal-mecânica depende da capacidade de integrar ferramentas computacionais de projeto, engenharia e manufatura. Este trabalho investiga a adoção de tecnologias CAx em empresas do setor metal-mecânico de Cachoeiro de Itapemirim e região sul do Espírito Santo, correlacionando o nível de maturidade tecnológica (TRL) e de manufatura (MRL) ao cenário socioeconômico regional. Foi realizado um levantamento exploratório por meio de questionário eletrônico, confrontando os dados de adoção de softwares com indicadores macroeconômicos do arranjo produtivo capixaba. Os resultados indicam a predominância do CAD, utilização pontual de CAM e ausência de uso declarado de softwares CAE dedicados. A análise demonstra que os produtos fabricados na região possuem elevado nível de maturidade mercadológica (TRL 9). No entanto, o TRL elevado não atua como indicador direto da maturidade digital ou da capacidade de manufatura (MRL). Conclui-se que o descompasso entre produtos de alto valor comercial e processos produtivos de baixo nível de integração digital ameaça a sustentabilidade econômica do setor.

Palavras-chave: Manufatura digital. Desenvolvimento de produtos. Engenharia assistida por computador. Maturidade tecnológica.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica

Introdução:

O desenvolvimento de produtos industriais demanda a integração entre concepção, análise, fabricação e gestão dos processos produtivos. Nas empresas metal-mecânicas, essa integração pode ser apoiada por tecnologias CAx (*Computer-Aided Technologies*), entre as quais se destacam o CAD (*Computer-Aided Design*), o CAE (*Computer-Aided Engineering*) e o CAM (*Computer-Aided Manufacturing*). Essas ferramentas estruturam diferentes etapas do ciclo de desenvolvimento, desde a representação geométrica tridimensional até o planejamento de manufatura e a análise de comportamento físico de estruturas de engenharia.

A relevância analítica deste estudo ganha contornos críticos quando confrontada com a importância socioeconômica do setor. No Espírito Santo, a indústria metalmecânica atua como um segmento altamente estratégico, movimentando mais de R$ 8 bilhões anuais, respondendo por aproximadamente 20% do Produto Interno Bruto (PIB) estadual e sustentando cerca de 30 mil empregos diretos (INVISTA NO ES, 2025, SINDIFER-ES, 2026). Indicadores conjunturais do Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN) apontam uma sólida trajetória de crescimento da economia capixaba, impulsionada de forma proeminente pelo avanço e sustentação das suas principais cadeias industriais (IJSN, 2026). De acordo com dados de planejamento econômico territorial divulgados pelo IJSN (2025), a carteira histórica de investimentos de longo prazo previstos para o Estado atinge patamares recordes, nos quais a transformação industrial de base e a infraestrutura logística figuram como pilares de competitividade.

No âmbito municipal, o cenário também é expressivo: Cachoeiro de Itapemirim destaca-se como a 8ª maior economia do Estado, registrando um PIB de R$ 6,147 bilhões (IBGE, 2021). O mercado de trabalho local é fortemente influenciado pela Fabricação de Produtos de Minerais Não Metálicos (beneficiamento de rochas ornamentais), setor que lidera a absorção de mão de obra industrial na cidade com 8.201 empregos formais registrados (MTE, 2024). Essa imensa cadeia produtiva de rochas

demanda um arranjo metalmecânico regional especializado no fornecimento de bens de capital complexos, como teares convencionais, máquinas de corte multifios, pontes rolantes e politrizes automáticas. Estudos sobre o setor fornecedor apontam a importância estratégica das trajetórias de desenvolvimento dessas máquinas para a sustentabilidade da economia capixaba (SILVA; GRASSI, 2019).

No entanto, a análise da maturidade tecnológica de tais produtos exige cuidado conceitual. A escala TRL (*Technology Readiness Level*) foi desenvolvida para avaliar o nível de prontidão de uma tecnologia a partir de evidências de validação operacional. Na indústria regional, as máquinas metalmecânicas operam em condições comerciais severas e consolidadas, o que as enquadra no nível máximo: **TRL 9**. Contudo, a maturidade de mercado de um produto não implica que seus processos fabris estejam otimizados através de fluxos digitais. Essa dimensão produtiva é mais bem mapeada pelo MRL (*Manufacturing Readiness Level*), que avalia os riscos associados à produção e a repetibilidade industrial.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a adoção de tecnologias CAx em empresas metal-mecânicas de Cachoeiro de Itapemirim e região sul do Espírito Santo, discutindo como o uso de CAD, CAE e CAM se relaciona com o TRL elevado dos produtos fabricados localmente e com as perspectivas de evolução do MRL regional em um cenário econômico altamente competitivo.

Metodologia:

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa empírica, qualitativa e exploratória, estruturada sob a forma de um estudo de caso múltiplo. A coleta de dados ocorreu entre abril e julho de 2026, utilizando um questionário estruturado disponibilizado pela plataforma Google Forms e encaminhado por meio eletrônico a empresas do setor metal-mecânico de Cachoeiro de Itapemirim e da região sul do Espírito Santo.

O instrumento foi elaborado para mapear a utilização efetiva de ferramentas computacionais empregadas nas atividades de projeto, engenharia e fabricação, investigando especificamente os sistemas CAD, CAE e CAM. A amostra efetivamente respondente foi constituída por três empresas de médio e grande porte da região, identificadas como Empresas A, B e C.

Além das respostas obtidas, foram consideradas metodologicamente relevantes as empresas contatadas que não responderam ao questionário. Esta ocorrência foi tipificada como "ausência de resposta", separando-a da declaração de "não utilização", evitando vieses estatísticos e permitindo mapear o comportamento de engajamento do arranjo produtivo local face às pesquisas de modernização digital. Os dados coletados foram confrontados conceitualmente com as réguas de TRL e MRL publicadas pela ISO 16290 e pela EMBRAPII.

Resultados:

Os resultados obtidos junto às três empresas respondentes demonstram uma forte presença de ferramentas CAD, com menções nominais ao AutoCAD, BricsCAD, Autodesk Inventor e SolidWorks. O levantamento identificou que a transição para ferramentas subsequentes de engenharia e fabricação é restrita. O CAM foi observado exclusivamente na Empresa C, por meio do software EDGECAM. Registrou-se ausência absoluta de softwares CAE dedicados nas três organizações. A Tabela 1 consolida a distribuição dessas tecnologias.

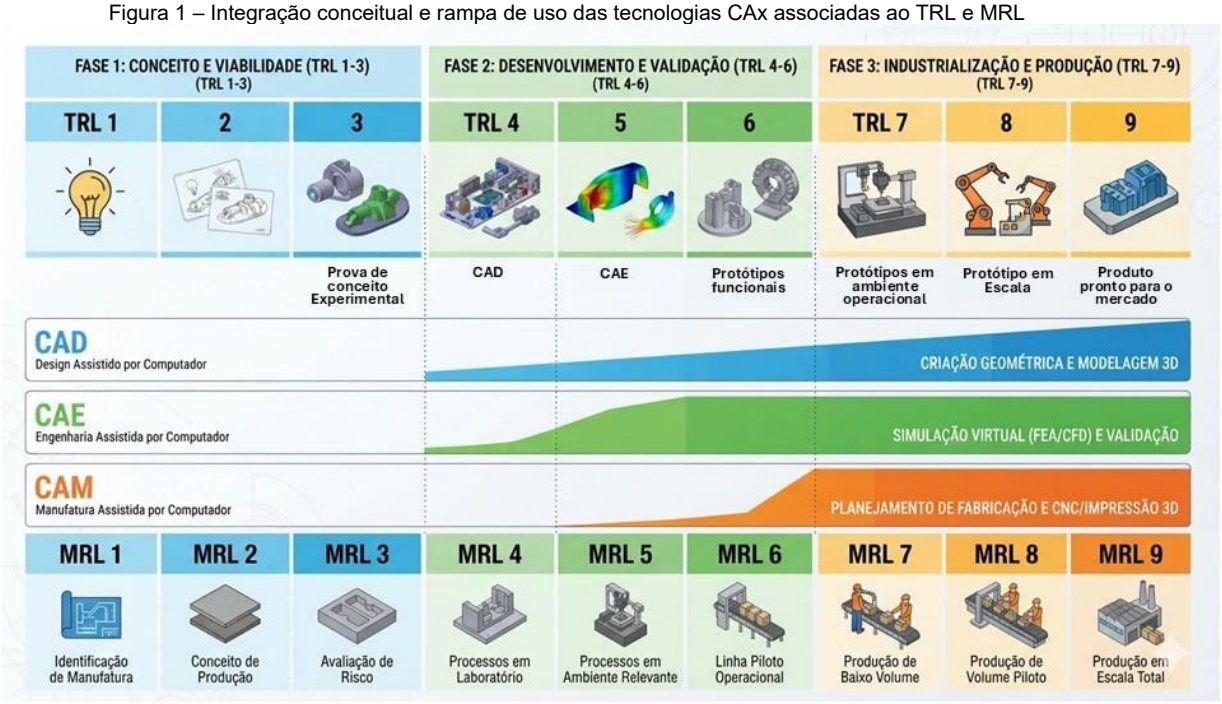
Tabela 1 – Tecnologias computacionais declaradas pelas empresas respondentes

Empresa	CAD	CAM	CAE	Outros
A	Inventor e AutoCAD	Não utiliza	Não utiliza	Não utiliza
B	BricsCAD	Não utiliza	Não utiliza	Não utiliza
C	SolidWorks e AutoCAD	EDGECAM	Não utiliza	Schedulle (PCP)

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Para demonstrar o comportamento dinâmico e a intensidade de uso de cada ferramenta computacional ao longo do ciclo de vida produtivo regional, os dados coletados foram correlacionados com as etapas evolutivas das réguas de prontidão tecnológica e manufatura. A Figura 1 apresenta o diagrama conceitual e a rampa de uso integrada do CAD, CAE e CAM.

Figura 1 – Integração conceitual e rampa de uso das tecnologias CAx associadas ao TRL e MRL



Fonte: Autores.

Complementarmente, a Tabela 2 apresenta o mapeamento analítico do impacto teórico e prático que a introdução controlada de cada tecnologia exerce sobre os níveis das matrizes TRL e MRL no contexto do arranjo produtivo local.

Tabela 2 – Contribuição potencial das ferramentas CAx nas escalas TRL e MRL locais

Etapa Industrial	Software	Impacto no TRL Regional	Impacto no MRL Regional
Geometria	CAD	Transita o conceito	Define a geometria base

e Projeto		(TRL 2) para modelo virtual (TRL 4).	para o planejamento das tolerâncias de fábrica.
Simulação Estrutural	CAE	Valida funções críticas em ambiente virtual (TRL 5), eliminando falhas de fadiga.	Reduz os riscos de quebra e retrabalho no desenvolvimento de protótipos.
Manufatura Assistida	CAM	Garante que o protótipo operacional simule perfeitamente o produto comercial (TRL 6/7).	Eleva o processo para fabricação controlada, repetível e de alta qualidade (MRL 7 a 9).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Discussão:

O cruzamento dos resultados obtidos na Tabela 1 com a contextualização macroeconômica revela um paradoxo analítico essencial. As indústrias metal-mecânicas locais fabricam bens de capital pesados de alto valor e consolidados no mercado de rochas ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim. Equipamentos como teares multifios locais encontram-se plenamente operacionais e validados comercialmente, o que os classifica no nível máximo de maturidade tecnológica: **TRL 9**.

Esse cenário demonstra que o TRL mede exclusivamente a funcionalidade e o sucesso operacional da tecnologia em ambiente real, mas oculta ineficiências na cadeia de custos e de desenvolvimento digital. Como sugerido pela curva de intensidade da Figura 1, o CAD está plenamente consolidado desde o início do fluxo. Contudo, a ausência de ferramentas CAE (Tabela 1) resulta em uma engenharia baseada em superdimensionamento estrutural. Em um polo que consome toneladas de aço estrutural para montar pórticos e cabeçotes de teares, a falta de otimização topológica por simulação virtual eleva o custo direto de matéria-prima das máquinas e o consumo de energia dos motores industriais, fragilizando a competitividade de um setor estadual de R$ 8 bilhões (INVISTA NO ES, 2025).

A análise dos dados evidencia que a maturidade de manufatura do processo fabril regional permanece estagnada em níveis intermediários (**MRL 4 a 5**). Enquanto a tecnologia do produto atinge o topo de mercado, os processos produtivos assemelham-se a oficinas sob encomenda. Relatórios conjunturais do IJSN (2026) e da FINDES (2026) sinalizam que a expansão sustentada da produtividade manufatureira capixaba esbarra diretamente em restrições técnicas e na necessidade urgente de capacitação da força de trabalho voltada à automação e digitalização.

A falta de integração com softwares CAM nas Empresas A e B indica que a programação de peças usinadas e o ajuste de tolerâncias ainda dependem de processos predominantemente analógicos executados manualmente na própria máquina. Isso aumenta o tempo de preparação de fábrica (*setup*), gerando desperdícios ocultos e retrabalhos que limitam o ganho de escala e a repetibilidade fabril exigidos pelos níveis avançados de manufatura integrada (MRL 8 a 9). A Empresa C desponta como o caso de maior maturidade gerencial da amostra ao associar o CAD ao CAM e ao software Schedulle para Planejamento e Controle da Produção (PCP), provando que os impactos econômicos positivos e a redução de riscos de manufatura ocorrem quando a digitalização avança para além do desenho de prancheta e alcança a inteligência de fábrica (GAO, 2010; GROOVER, 2013).

Conclusão

O estudo identificou a predominância de tecnologias CAD nas empresas metal-mecânicas investigadas em Cachoeiro de Itapemirim e região sul do Espírito Santo, com presença pontual de CAM

e ausência de uso declarado de ferramentas CAE específicas entre as organizações respondentes. Os resultados evidenciam que a digitalização regional está concentrada majoritariamente na modelagem e documentação geométrica bidimensional e tridimensional.

A principal contribuição teórica e prática deste trabalho reside na quebra da associação direta entre sofisticação de ferramentas digitais e maturidade tecnológica, situando esse debate no coração de uma cadeia industrial cujos rumos de investimentos são balizados estrategicamente por indicadores do IJSN (2025). Os produtos fabricados pela metal-mecânica sul-capixaba possuem elevado grau de prontidão mercadológica, atingindo o nível TRL 9. No entanto, a falta de ferramentas integradas de engenharia assistida por computador (CAE) e manufatura (CAM) cria um gargalo na maturidade de produção (MRL), tornando o setor vulnerável diante da necessidade de gains de produtividade e do desperdício de matéria-prima por superdimensionamento.

Como limitação da pesquisa, aponta-se o caráter exploratório e o tamanho reduzido da amostra de respondentes diretos. Recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação de auditorias tecnológicas presenciais ampliadas nas empresas metal-mecânicas locais para mensurar quantitativamente o impacto da ausência de simulação estrutural nos custos de matéria-prima das máquinas produzidas no Espírito Santo.

Referências:

AUTODESK. **Autodesk Inventor e AutoCAD**: ferramentas de projeto e engenharia. Autodesk Inc., 2026. Disponível em: autodesk.com.br. Acesso em: 2 set. 2026.

DASSAULT SYSTÈMES. **SOLIDWORKS**: soluções de CAD 3D. 2026. Disponível em: solidworks.com. Acesso em: 2 set. 2026.

EMBRAPII – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Manual de Operação das Unidades EMBRAPII**: Anexo 1 – Níveis de Maturidade Tecnológica. Brasília, DF: EMBRAPII, 2020. Disponível em: embrapii.org.br. Acesso em: 2 set. 2026.

FINDES – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **PIM-PF: Indústria do ES cresce 20,2% e lidera o país no primeiro semestre**. Observatório Findes, 2026. Disponível em: findes.com.br. Acesso em: 2 set. 2026.

GAO – U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Best Practices**: DOD can achieve better outcomes by standardizing the way manufacturing risks are managed. Washington, DC: GAO, 2010. GAO-10-439.

GROOVER, Mikell P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.

HEXAGON. **EDGECAM**: CAM software for CNC programming. Hexagon Manufacturing Intelligence, 2026. Disponível em: edgecam.com. Acesso em: 2 set. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios**: Cachoeiro de Itapemirim (ES). Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: ibge.gov.br. Acesso em: 2 set. 2026.

IJSN – INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. **Investimentos Anunciados e Concluídos no Espírito Santo (2024-2029)**. Vitória: IJSN, 2025. Disponível em: ijsn.es.gov.br. Acesso em: 2 set. 2026.

IJSN – INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. **Panorama Econômico e Indicadores de Production Industrial**. Vitória: IJSN, 2026. Disponível em: ijsn.es.gov.br. Acesso em: 2 set. 2026.

INVISTA NO ES. **Metalmecânica**: Indústria Capixaba. Governo do Estado do Espírito Santo, 2025. Disponível em: invistanoes.es.gov.br. Acesso em: 2 set. 2026.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16290:2013** – Space systems: Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. Geneva: ISO, 2013.

MTE – MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Relação Anual de Informações Sociais (RAIS)**: Empregos formais por setor econômico em Cachoeiro de Itapemirim. Brasília: MTE, 2024.

SILVA, Maycon Chaga da; GRASSI, Robson Antônio. Um estudo de difusão de inovações tecnológicas: o caso do setor fornecedor de máquinas e equipamentos para a produção de rochas ornamentais no Espírito Santo. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 50, n. 1, p. 119–134, maio 2019. DOI: 10.61673/ren.2019.783.

SINDIFER-ES – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS E DE MATERIAL ELÉTRICO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Indicadores do Desempenho do Setor Metalmecânico Capixaba**. Vitória: Sindifer, 2026.

Agradecimentos:

Este trabalho contou com financiamento da FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo através do Edital Fapes N°13/2025 - Universal