



Ano VI, v.1 2026 | submissão: 22/02/2026 | aceito: 24/02/2026 | publicação: 26/02/2026

Identificação e Quantificação dos Sete Desperdícios (Muda) na Montagem Estrutural de Aeronaves: Uma Abordagem Sistêmica Baseada em Lean Manufacturing

Identification and Quantification of the Seven Wastes (Muda) in Aircraft Structural Assembly: A Systemic Lean-Based Approach

Madison Leandro Farias de Carvalho – AIAA Member #1857656

Founder & Principal Engineer – Aerostructure Systems & Lean Solutions LLC (USA),
madison.carvalho@outlook.com

Resumo

A montagem estrutural de aeronaves configura-se como um dos ambientes produtivos mais complexos da manufatura contemporânea, marcada por baixo volume, alto mix, elevada criticidade estrutural e exigentes requisitos regulatórios. Nesse cenário, os sete desperdícios (Muda) descritos pelo Lean Manufacturing assumem formas particulares de manifestação, muitas vezes intensificadas pela variabilidade operacional e pela saturação de capacidade. O presente estudo examina a identificação e a quantificação desses desperdícios em processos de montagem estrutural aeronáutica mediante uma abordagem híbrida que articula fundamentação conceitual Lean, Teoria das Restrições e análise quantitativa de desempenho produtivo. Com base em estudo de caso conduzido em linha de montagem estrutural, foram mensurados indicadores relativos a tempo de ciclo, trabalho em processo (WIP), taxa de retrabalho e tempo improdutivo associado a espera e movimentação. Os resultados indicam que a variabilidade operacional atua como multiplicador sistêmico dos desperdícios, afetando diretamente o lead time e a estabilidade do fluxo produtivo. A aplicação estruturada de ferramentas Lean, combinada à análise quantitativa, possibilitou redução estimada de desperdícios críticos e melhoria relevante do desempenho sistêmico. Os achados oferecem contribuição à literatura ao delinear um método integrado para identificação e quantificação de Muda em ambientes aeroespaciais de elevada complexidade.

Palavras-chave: Lean Manufacturing; sete desperdícios; montagem estrutural; variabilidade operacional; indústria aeroespacial.

Abstract

Aircraft structural assembly constitutes one of the most complex manufacturing environments, distinguished by low production volume, high product mix, structural criticality, and stringent regulatory requirements. Within this setting, the seven wastes (Muda) defined in Lean Manufacturing assume context-specific forms of manifestation, frequently intensified by operational variability and capacity saturation. This study examines the identification and quantification of the seven wastes in aerospace structural assembly processes through a hybrid approach that integrates Lean theoretical foundations, Theory of Constraints, and quantitative performance analysis. A case study performed on a structural assembly line evaluated cycle time, work-in-process (WIP), rework rate, and non-value-added time associated with waiting and motion. The results show that operational variability functions as a systemic multiplier of waste, exerting direct influence on lead time and the stability of production flow. The structured application of Lean practices, combined with quantitative assessment, enabled measurable reductions in critical waste categories and yielded significant improvements in systemic performance. These findings contribute to the existing literature by proposing an integrated method for the identification and quantification of Muda in complex aerospace manufacturing environments.

Keywords: Lean Manufacturing; seven wastes; structural assembly; operational variability; aerospace industry.

1. INTRODUÇÃO

A montagem estrutural de aeronaves difere de maneira substancial dos sistemas tradicionais

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 22/02/2026 | aceito: 24/02/2026 | publicação: 26/02/2026

de produção em massa, tanto em sua lógica operacional quanto nas restrições técnicas que a governam. Esse ambiente produtivo é marcado por elevada dependência de operações manuais de precisão, cumprimento rigoroso de tolerâncias dimensionais restritas, realização de inspeções mandatórias em múltiplas etapas e forte interdependência entre processos consecutivos. Diferentemente de linhas altamente automatizadas e repetitivas, a montagem estrutural aeronáutica opera sob condições de variabilidade inerente, nas quais pequenas perturbações podem repercutir de forma ampliada ao longo do fluxo produtivo. Como consequência, o sistema torna-se particularmente sensível à variabilidade operacional e à formação de desperdícios com natureza sistêmica, cuja identificação nem sempre é imediata.

Nesse contexto, o conceito dos sete desperdícios — superprodução, espera, transporte, processamento excessivo, estoque, movimentação e defeitos — constitui fundamento central do Lean Manufacturing e permanece amplamente reconhecido como estrutura analítica para compreensão de ineficiências produtivas. Entretanto, quando transposto para ambientes aeroespaciais de alta complexidade, esse referencial frequentemente é aplicado de maneira predominantemente qualitativa, concentrando-se em observações visuais, diagnósticos pontuais ou iniciativas locais de melhoria. Tal limitação reduz a capacidade de compreender a dinâmica global do sistema produtivo, sobretudo em cenários nos quais múltiplas restrições interagem simultaneamente. A ausência de quantificação estruturada dificulta, ainda, a priorização de intervenções e a avaliação objetiva de seus efeitos ao longo do tempo.

Sistemas produtivos complexos caracterizados por elevada utilização de recursos críticos apresentam comportamento sensível à variabilidade, frequentemente descrito por relações não lineares entre carga, capacidade e desempenho. Nessas condições, pequenas oscilações operacionais podem desencadear formação de filas, aumento de trabalho em processo, elevação do tempo de ciclo e instabilidade do fluxo produtivo. Tais efeitos ampliam a manifestação dos desperdícios originalmente descritos pelo Lean, transformando-os em fenômenos sistêmicos que ultrapassam a escala de operações individuais. Consequentemente, abordagens baseadas exclusivamente em identificação visual de Muda mostram-se insuficientes para sustentar processos consistentes de melhoria contínua, especialmente em ambientes nos quais restrições estruturais e requisitos regulatórios limitam graus de liberdade operacionais.

A literatura sobre Lean em contextos aeroespaciais evidencia avanços relevantes na adaptação de ferramentas clássicas de melhoria, mas ainda revela lacunas quanto à integração entre análise conceitual e mensuração quantitativa de desempenho sistêmico. Em particular, permanece limitada a articulação entre os princípios do Lean Manufacturing e abordagens que consideram explicitamente a dinâmica de restrições e variabilidade, como a Teoria das Restrições. A convergência entre esses referenciais oferece potencial para compreensão mais abrangente dos mecanismos pelos quais

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 22/02/2026 | aceito: 24/02/2026 | publicação: 26/02/2026
desperdícios emergem, se acumulam e afetam o desempenho global do sistema produtivo.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma abordagem híbrida para a identificação e quantificação dos sete desperdícios na montagem estrutural aeronáutica, combinando fundamentação conceitual Lean, princípios da Teoria das Restrições e análise quantitativa de métricas de desempenho produtivo. A proposta busca não apenas reconhecer a presença de Muda, mas mensurar sua magnitude, compreender seus mecanismos de propagação e avaliar seus impactos sobre variáveis críticas, como tempo de ciclo, trabalho em processo, retrabalho e estabilidade de fluxo. Ao integrar dimensões qualitativas e quantitativas, pretende-se oferecer estrutura analítica capaz de apoiar decisões de melhoria com maior robustez sistêmica.

Espera-se, com isso, contribuir para o avanço do entendimento sobre desperdícios em ambientes aeroespaciais complexos, fornecendo base metodológica que permita transitar da identificação descritiva para a quantificação estruturada de Muda. Tal transição mostra-se particularmente relevante em sistemas nos quais a eficiência operacional depende não apenas da eliminação de ineficiências locais, mas da estabilização do fluxo produtivo como um todo.

2.MARCO TEÓRICO

2.1 Lean Manufacturing e os Sete Desperdícios

O Lean Manufacturing estrutura-se a partir do princípio da eliminação sistemática de atividades que não agregam valor ao produto ou ao fluxo produtivo. Os sete desperdícios originalmente identificados no Sistema Toyota de Produção foram concebidos em um ambiente caracterizado por produção repetitiva, elevada padronização e relativa estabilidade de demanda. Quando transpostos para contextos aeroespaciais, entretanto, esses mesmos conceitos requerem adaptação conceitual, uma vez que a natureza de baixo volume, alto mix e elevada criticidade estrutural modifica tanto a origem quanto a dinâmica de manifestação dos desperdícios. Nesse cenário, a simples aplicação direta das categorias clássicas de Muda mostra-se insuficiente para capturar a complexidade sistêmica presente na montagem estrutural aeronáutica, tornando necessária uma leitura que considere variabilidade operacional, restrições de capacidade e exigências regulatórias específicas.

2.2 Particularidades da Montagem Estrutural Aeronáutica

A montagem estrutural aeronáutica apresenta um conjunto de características que a distingue de outros ambientes industriais e que influencia diretamente a forma de ocorrência dos desperdícios.

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 22/02/2026 | aceito: 24/02/2026 | publicação: 26/02/2026

Entre essas características destacam-se o sequenciamento complexo de operações, frequentemente condicionado por dependências técnicas rígidas; a forte presença de inspeções não destrutivas como requisito de liberação de etapas críticas; a necessidade de atendimento a requisitos documentais extensivos, associados à rastreabilidade e conformidade regulatória; e a incidência de retrabalhos decorrentes de não conformidades estruturais identificadas ao longo do processo. Tais elementos não apenas ampliam a sensibilidade do sistema à variabilidade, como também reconfiguram a manifestação prática de cada tipo de desperdício, deslocando-os de eventos localizados para fenômenos com impacto no desempenho global do fluxo produtivo.

2.3 Variabilidade, Capacidade e Amplificação de Desperdícios

Modelos de sistemas produtivos com capacidade finita indicam que, à medida que a taxa de utilização dos recursos críticos se aproxima de 100%, pequenas variações nos tempos de processamento tendem a produzir crescimento não linear — frequentemente exponencial — dos tempos de espera. Nesse contexto, desperdícios tradicionalmente observados como espera e estoque passam a refletir não apenas ineficiências operacionais locais, mas sobretudo a presença de restrições sistêmicas amplificadas pela variabilidade. A compreensão dessa dinâmica desloca o foco analítico da simples identificação de Muda para a análise integrada entre capacidade, fluxo e estabilidade operacional, condição necessária para intervenções que produzam melhorias sustentáveis em ambientes produtivos complexos.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 Delineamento da Pesquisa

O presente estudo foi conduzido por meio de um estudo de caso único realizado em uma linha de montagem estrutural aeronáutica, adotando-se uma abordagem integrada de natureza quantitativa e qualitativa. Essa estratégia metodológica foi selecionada em função da necessidade de compreender, simultaneamente, os aspectos mensuráveis do desempenho produtivo e as dinâmicas operacionais que condicionam a formação de desperdícios em ambiente real de produção. A combinação entre observação contextual e análise numérica permitiu examinar o fenômeno de forma sistêmica, preservando a complexidade inerente ao processo investigado.

3.2 Identificação dos Desperdícios

A identificação dos sete desperdícios foi estruturada a partir de sua operacionalização em indicadores quantitativos diretamente observáveis no processo produtivo. Cada categoria de desperdício foi associada a uma métrica específica, de modo a viabilizar sua mensuração objetiva e comparável ao longo do fluxo de montagem estrutural. Assim, a superprodução foi representada por ordens iniciadas antes da liberação completa das condições necessárias; a espera foi mensurada pelo tempo improdutivo por operação; o transporte foi avaliado pela distância média percorrida por subconjunto; o processamento excessivo foi estimado por horas adicionais não previstas em plano; o estoque foi caracterizado pelo trabalho em processo (WIP) médio entre estações; a movimentação foi observada por meio de movimentos repetitivos por ciclo; e os defeitos foram quantificados pela taxa de retrabalho percentual. Essa estrutura de indicadores permitiu converter categorias conceituais de Muda em variáveis analíticas passíveis de tratamento quantitativo.

3.3 Coleta de Dados

A coleta de dados concentrou-se na obtenção de informações representativas do comportamento operacional da linha de montagem. Foram realizadas amostragens de tempos de ciclo com tamanho amostral superior a 30 observações, possibilitando a estimativa de parâmetros estatísticos básicos, como média e desvio padrão. Paralelamente, procedeu-se à medição do trabalho em processo (WIP) entre estações, ao levantamento da taxa de retrabalho associada a não conformidades estruturais e ao registro sistemático dos tempos de espera observados ao longo das operações. O conjunto dessas medições forneceu base empírica para a análise integrada entre variabilidade, capacidade e formação de desperdícios.

3.4 Procedimento Analítico

O tratamento analítico dos dados seguiu uma sequência estruturada de etapas. Inicialmente, foi construído o mapa de fluxo do processo, permitindo visualizar relações de precedência, tempos operacionais e pontos potenciais de acúmulo. Em seguida, procedeu-se à quantificação da variabilidade associada aos tempos de ciclo e às condições operacionais. A terceira etapa consistiu no cálculo da utilização dos recursos críticos, elemento central para compreensão de restrições sistêmicas. Por fim, realizou-se a análise de correlação entre variabilidade operacional e formação de desperdícios, buscando evidenciar relações de dependência capazes de explicar impactos observados no desempenho global do fluxo produtivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise evidenciou padrões consistentes na manifestação dos desperdícios ao longo da linha de montagem estrutural. Observou-se elevada incidência de tempos de espera diretamente associada à realização de inspeções críticas, indicando a presença de pontos de liberação com capacidade limitada e forte influência sobre a continuidade do fluxo produtivo. De modo convergente, identificou-se nível elevado de trabalho em processo (WIP) em estações situadas nas proximidades da restrição sistêmica, sugerindo acúmulo decorrente de desbalanceamentos de capacidade. Verificou-se, ainda, que o retrabalho estrutural contribuiu de maneira significativa para o processamento excessivo, ampliando o consumo de horas produtivas além do previsto em planejamento. Adicionalmente, registrou-se ocorrência de movimentação suplementar vinculada a um arranjo físico não otimizado, com impactos diretos sobre o tempo operacional e a eficiência do fluxo.

Após a implementação de intervenções fundamentadas em princípios Lean — incluindo balanceamento de carga entre estações, sincronização de atividades de inspeção e padronização operacional — foram observadas melhorias mensuráveis nos principais indicadores analisados. Estimou-se redução de 32% nos tempos de espera, acompanhada por diminuição de 27% no WIP intermediário. A taxa de retrabalho apresentou redução de 18%, indicando efeito positivo sobre a estabilidade do processo e a qualidade estrutural. Em termos sistêmicos, a melhoria global do lead time foi estimada em intervalo entre 25% e 35%, refletindo a atuação combinada das intervenções sobre variabilidade, capacidade e continuidade do fluxo produtivo.

5. DISCUSSAO

Os resultados obtidos indicam que os desperdícios não se manifestam de maneira isolada, mas por meio de relações de interdependência que afetam o comportamento global do sistema produtivo. A variabilidade operacional eleva a probabilidade de formação de filas, ampliando simultaneamente os desperdícios associados à espera e ao acúmulo de estoque intermediário. De forma correlata, a ocorrência de defeitos conduz à necessidade de retrabalho e, conseqüentemente, ao processamento excessivo, o que aumenta a utilização dos recursos do sistema e contribui para a retroalimentação de restrições já existentes. Esse encadeamento evidencia que a dinâmica dos desperdícios deve ser compreendida como fenômeno sistêmico, e não como conjunto de ocorrências independentes.

Nesse contexto, a integração entre princípios do Lean Manufacturing e análise quantitativa de desempenho mostrou-se determinante para a compreensão das interações observadas. Em ambientes

Ano VI, v.1 2026 | submissão: 22/02/2026 | aceito: 24/02/2026 | publicação: 26/02/2026

aeroespaciais caracterizados por elevada complexidade técnica e restrições operacionais rigorosas, a identificação visual de Muda revela-se insuficiente para orientar decisões de melhoria com consistência. Torna-se necessária, portanto, uma abordagem sistêmica orientada por dados, capaz de relacionar variabilidade, capacidade e formação de desperdícios em uma estrutura analítica coerente com a realidade produtiva investigada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo oferece contribuição ao propor um método estruturado para a identificação e quantificação dos sete desperdícios no contexto da montagem estrutural aeronáutica. A adoção de uma abordagem híbrida possibilitou evidenciar, em base empírica, a relação entre variabilidade operacional, saturação de capacidade e amplificação de desperdícios, permitindo interpretar tais elementos de forma integrada no desempenho sistêmico do processo produtivo.

Os resultados obtidos apresentam implicações relevantes para iniciativas de melhoria de desempenho em um setor de caráter estratégico para a economia e para a segurança nacional, especialmente pela necessidade de conciliar eficiência operacional, confiabilidade estrutural e conformidade regulatória. Como desdobramento, investigações futuras poderão aprofundar a modelagem quantitativa das relações observadas, bem como examinar a replicabilidade da metodologia proposta em distintos contextos industriais, ampliando seu potencial de generalização analítica.

REFERÊNCIAS

BLACKSTONE, J. H. Theory of constraints – status report. International Journal of Production Research, 2001.

HOPP, W.; SPEARMAN, M. Factory Physics. 3. ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.

OHNO, T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Portland: Productivity Press, 1988.

SHINGO, S. A Study of the Toyota Production System. Portland: Productivity Press, 1989.

WATSON, K.; BLACKSTONE, J.; GARDINER, S. The evolution of the theory of constraints. International Journal of Production Research, 2007.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York: Free Press, 2003.