



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia da Qualidade 4.0



Anna Regina Righi da Silva
Camila Marcolin Marcon
Eduardo Alexandre Ganassoli
Luan Batista Peres de Abreu
Luana de Souza Santos
Solange Mielke

**ESTUDO DA REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CERÂMICAS
MONOPOROSAS**

**CURITIBA
2026**

Anna Regina Righi da Silva
Camila Marcolin Marcon
Eduardo Alexandre Ganassoli
Luan Batista Peres de Abreu
Luana de Souza Santos
Solange Mielke

ESTUDO DA REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CERÂMICAS MONOPOROSAS

Monografia apresentada como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Qualidade 4.0 - Certificado Black Belt. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Anderson Donato

**CURITIBA
2026**

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo focado na redução da absorção de água em cerâmicas monoporosas, visando adequar o produto às exigências da norma norte-americana ANSI A137:2022, que estabelece um limite máximo de 20%. Atualmente, a produção apresenta índices entre 20% e 21,5%, o que compromete a competitividade em um mercado que absorve cerca de 60% da produção da empresa. Utilizou-se a metodologia Seis Sigma – DMAIC, identificando-se, por meio de ferramentas de qualidade e experimentos (DOE), que a principal causa do problema era a insuficiência de matérias-primas fundentes e o excesso de componentes refratários na massa. Os resultados demonstraram que a nova formulação (Teste 15/2) reduziu a absorção de água para valores entre 19,0% e 19,2%, mantendo a estabilidade dimensional e a qualidade do produto. O projeto atingiu as metas econômicas, com um acréscimo de 0,65% no custo do produto final, abaixo do limite de 1% estabelecido. Conclui-se que a otimização química da massa é uma solução tecnicamente consistente e economicamente viável para garantir a conformidade normativa e a retenção de clientes estratégicos no mercado internacional.

Palavras-chave: Cerâmica Monoporosa. Absorção de Água. Seis Sigma. DMAIC. Formulação de Massa.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS DO TRABALHO	18
FIGURA 2 - CRONOGRAMA DO PROJETO	19
FIGURA 3 - PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 2024	21
FIGURA 4 - PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 2025	21
FIGURA 5 - ÁRVORE DE ESTRATIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS POSSÍVEIS CAUSAS DO PROBLEMA	25
FIGURA 6 - TEMPO DE CICLO DE QUEIMA VERSUS ABSORÇÃO DE ÁGUA NA PEÇA ..	26
FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA, RETRAÇÃO E MATÉRIA - PRIMA.....	27
FIGURA 8 - CUSTO DE CADA MATÉRIA-PRIMA	27
FIGURA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E A RETRAÇÃO	28
FIGURA 10 – CUSTO DOS INSUMOS	28
FIGURA 11 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE CERÂMICAS MONOPOROSAS	31
FIGURA 12 – MATRIZ GUT DAS CAUSAS PRIORIZADAS.....	33
FIGURA 13 – FORMULAÇÕES BASE PARA DOE	34
FIGURA 14 – RESULTADO DO DOE	34
FIGURA 15 – RELAÇÃO DE CAUSAS COMPROVADAS	35
FIGURA 16 – POSSÍVEIS SOLUÇÕES	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ANÁLISE DE RISCOS	37
TABELA 2 - FORMULAÇÕES LGQ.....	40
TABELA 3 – RESULTADOS FORMULAÇÃO LGQ.....	41
TABELA 4 – FÓRMULAS CRC	42
TABELA 5 – RESULTADOS FORMULAÇÃO CRC.....	42
TABELA 6 – FÓRMULAS CRC 2	43
TABELA 7 – RESULTADOS FORMULAÇÃO CRC 2.....	43
TABELA 8 – FÓRMULAS SAFIRA	44
TABELA 9 - RESULTADO FÓRMULA DA SAFIRA	44
TABELA 10 – FÓRMULAS COM BASE NA FÓRMULA SAFIRA.....	45
TABELA 11 - RESULTADO COM BASE NA FÓRMULA SAFIRA	45
TABELA 12 – FORMULAÇÕES PARA TESTE SEMI-INDUSTRIAL.....	46
TABELA 13 – RESULTADOS FORMULAÇÕES SEMI-INDUSTRIAL.....	46
TABELA 14 – FORMULAÇÕES	47
TABELA 15 – RESULTADOS PROVA INDUSTRIAL.....	48
TABELA 16 – FORMULAÇÕES	49
TABELA 17 – RESULTADOS TESTE EM ESCALA INDUSTRIAL	50
TABELA 18 – FORMULAÇÕES	51
TABELA 19 – DILATAÇÃO E GRETAMENTO	51
TABELA 20 – CONTROLE DOS PARÂMETROS	51

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	8
1.3. JUSTIFICATIVA.....	9
1.4. HIPÓTESE	9
1.5. OBJETIVO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. SEIS SIGMA E PROJETOS BLACK BELT	12
2.2. CERÂMICAS MONOPOROSAS	13
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO DE ÁGUA	13
2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA COMO PARÂMETRO DE QUALIDADE	14
2.5. APLICAÇÕES DE SEIS SIGMA NA INDÚSTRIA CERÂMICA	14
2.6. SÍNTESE DA REVISÃO	15
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO	15
3. METODOLOGIA	16
3.1. FASE DEFINIR (DEFINE)	16
3.1.1. Descrição do problema	16
3.1.2. Descrição do indicador.....	19
3.1.3. Descrição do histórico.....	20
3.1.4. Descrição de metas	22
3.1.5. Descrição dos ganhos.....	22
3.1.6. Descrição do alinhamento entre a universidade e a empresa	23
3.2. FASE MEDIR (MEASURE)	24
3.2.1. Descrição dos critérios.....	24
3.2.2. Descrição dos focos.....	26
3.2.3. Descrição das metas específicas.....	29
3.2.4. Descrição do alcance da meta geral	29
3.3. FASE ANALISAR (ANALYZE)	30
3.3.1. Descrição do processo gerador do problema	30
3.3.2. Descrição das causas potenciais e sua priorização.....	31
3.3.3. Descrição da comprovação das causas principais	33
3.4. FASE MELHORAR (IMPROVE).....	35
3.5. FASE CONTROLAR (CONTROL)	54

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO MAPA DE RACIOCÍNIO	58
5. CONCLUSÕES	59
6 LISTA DE ANEXOS	62

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda internacional por produtos cerâmicos de alta qualidade e desempenho exige que indústrias do setor adotem processos cada vez mais eficientes e alinhados as especificações técnicas de mercados exigentes, como o norte-americano. No segmento de revestimentos, as cerâmicas monoporosas tem um importante espaço, principalmente na aplicação em ambientes internos, pois esse produto apresenta uma baixa densidade devido a elevada quantidade de poros do material, o que acarreta também um material de elevada absorção de água.

Atualmente, algumas indústrias nacionais apresentam produtos monoporosos com elevada absorção de água, ultrapassando o valor de 20%, o que é permitido pela norma nacional, porém esse valor não é aceito em determinados locais, como no EUA, que tem como limite 20%. Essa limitação compromete a competitividade da empresa no mercado externo, tornando essencial a adequação do processo produtivo as exigências do setor.

Diante desse cenário, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo reduzir absorção de água nas cerâmicas monoporosas para até 20%, utilizando a metodologia Seis Sigma – DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). A aplicação dessa abordagem visa identificar as causas raiz que contribuem para a alta absorção de água e propor soluções sustentáveis que garantam a qualidade do produto, a eficiência operacional e o atendimento aos requisitos do mercado americano.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria cerâmica tem passado por avanços significativos nos últimos anos, impulsionada pela crescente demanda por produtos que atendam a requisitos técnicos e normativos cada vez mais rigorosos, especialmente nos mercados internacionais. Os revestimentos cerâmicos, produzidos a partir de minerais inorgânicos não metálicos, são moldados e submetidos a processos de queima em altas temperaturas, adquirindo propriedades de resistência e durabilidade. A classificação desses materiais é, em grande parte, determinada pela taxa de absorção de água: quanto menor esse índice, maior sua resistência mecânica e maior sua densidade.

Entre os principais tipos de revestimentos cerâmicos estão as cerâmicas monoporosas que tem como característica apresentar absorção de água maior ou igual a 10% e são recomendadas para paredes internas, devido a sua menor resistência mecânica. Outras classes de revestimento cerâmico que são dadas pela absorção de água são: porcelanato, grés, semi-grés e semi-poroso.

A produção de revestimentos monoporosos na empresa, foco deste estudo, apresenta atualmente uma taxa de absorção de água entre 20% e 21,5%, que varia conforme o formato e tipo de produto. Embora a norma internacional que utilizamos no Brasil (ABNT NBR ISO 13006:2020) permita valores superiores a 20%, desde que devidamente declarados, o EUA não segue essa norma e tem sua própria norma a americana ANSI A137:2022, que é mais restritiva e estabelece um limite máximo de 20%. Cerca de 60% da produção da fábrica é destinada ao mercado dos Estados Unidos, o que torna essa diferença normativa um fator crítico. Apesar de, no momento, não haver fiscalização ativa sobre essa exigência, a não conformidade pode comprometer o fornecimento e a permanência da empresa nesse mercado estratégico futuramente.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nesse cenário, torna-se fundamental adequar o processo produtivo para assegurar que os revestimentos monoporosos atendam ao limite de absorção exigido pela norma ANSI. Essa adaptação não visa apenas garantir a continuidade do fornecimento a um cliente estratégico responsável por compra significativa da produção, mas também preservar o relacionamento comercial, a reputação da empresa e sua competitividade no mercado norte-americano. Portanto, solucionar este problema é uma medida necessária para garantir conformidade com os padrões legais e técnicos em vigor, reduzir riscos comerciais e fortalecer a posição da empresa em um cenário global cada vez mais exigente.

1.3. JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de adequação do processo produtivo da empresa as exigências norma norte-americana, em especial a norma americana ANSI A137:2022, que estabelece um limite máximo de 20% de absorção de água para revestimentos cerâmicos monoporosos. Dado que uma parcela significativa da produção de aproximadamente 60% é destinada ao mercado dos Estados Unidos, atender a esse requisito técnico torna-se essencial para manter a presença da empresa nesse mercado estratégico e assegurar o fornecimento a clientes-chave, como um parceiro comercial responsável por cerca de 30% do volume produzido de janeiro até abril.

Além disso, atualmente no comitê internacional de normas cerâmicas, existe uma discussão para uma possível mudança na norma ABNT NBR ISO 13006:2020, mudança a qual é influenciada pela EUA e caso essa mudança ocorra, isso vai afetar o cenário nacional de cerâmica monoporosa. A revisão do processo atual e a busca por menores valores de absorção de água são ações preventivas que podem evitar a perda de contratos e prejuízos comerciais, além de abrir novas oportunidades de crescimento internacional.

Assim, o presente trabalho é relevante por propor soluções técnicas que contribuam para a conformidade com padrões regulatórios, assegurem a competitividade da empresa no mercado externo e promovam a sustentabilidade do negócio a longo prazo, diante de um cenário global cada vez mais exigente e competitivo.

1.4. HIPÓTESE

A cerâmica monoporosa é caracterizada como um revestimento cerâmico poroso produzido por meio de prensagem e monoqueima rápida, conforme definido por Oliveira (2000). Esse tipo de revestimento apresenta elevada absorção de água, característica diretamente relacionada à quantidade e ao tamanho dos poros presentes no material. A porosidade, por sua vez, é influenciada tanto pelas propriedades das matérias-primas utilizadas quanto pelos parâmetros de processamento.

Entre os fatores ligados ao material, destacam-se as características das matérias-primas empregadas na formulação da massa cerâmica, como granulometria,

plasticidade e fundência. Já os parâmetros de processo que afetam a absorção de água incluem as etapas de compactação e sinterização. No entanto, ajustes no processo apresentam limitações: aumentos excessivos na pressão de compactação podem gerar defeitos, como deformações e furos, enquanto elevações na temperatura de queima acarretam maior consumo de gás, impactando significativamente os custos de produção. Considerando que a massa cerâmica representa cerca de 5% do custo total do produto e o gás aproximadamente 20%, a otimização da formulação da massa surge como a alternativa mais eficaz e economicamente viável para reduzir a absorção de água.

Estudos relatam que a absorção de água em cerâmicas monoporosas pode ser reduzida significativamente com o ajuste da formulação, especialmente pela adição de componentes que favoreçam a densificação do corpo de massa durante a sinterização. Um exemplo é o óxido de manganês (MnO_2) que, mesmo em pequenas quantidades, atua como agente densificante, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência mecânica (YANG et al., 2024). Outra estratégia promissora é a incorporação de vidro reciclado à massa cerâmica, o qual atua como fundente, promovendo o fechamento dos poros e melhorando propriedades como retração linear e resistência à flexão (ZACCARON et al., 2016).

Dessa forma, a busca por uma formulação otimizada, que combine maior fundência e adequada compactação, tem como objetivo atingir valores de absorção de água inferiores a 20%, atendendo as exigências da norma americana ANSI A137:2022, sem comprometer a qualidade e características dimensionais do produto final e nem elevar de forma expressiva o custo de fabricação. Essa abordagem representa uma solução tecnicamente consistente e econômica para o aprimoramento das cerâmicas monoporosas destinadas ao mercado internacional.

1.5. OBJETIVO

A meta principal é atender a norma americana ANSI A137:2022, que estabelece um limite máximo de 20% de absorção de água para revestimentos cerâmicos monoporosos, sem alterar as características dimensionais do produto (isso afetaria toda a rede de cadastro dos produtos tanto da empresa como dos

distribuidores) e sem elevar o custo do produto em mais de 1% (valor que a empresa considera o limite para viabilizar a projeto sem afetar a área comercial).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será apresentada uma revisão do estado da arte sobre os temas relacionados ao estudo da redução de absorção de água em cerâmicas monoporosas.

2.1. SEIS SIGMA E PROJETOS BLACK BELT

O Seis Sigma surgiu na década de 1980 na Motorola como uma metodologia para redução de defeitos e melhoria da qualidade. Desde então, consolidou-se como uma das ferramentas de maior impacto na gestão de processos industriais. Segundo Montgomery (2019), o Seis Sigma é baseado em técnicas estatísticas e no gerenciamento por dados, buscando reduzir a variabilidade e promover melhorias sustentáveis no desempenho dos processos.

O ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) é a espinha dorsal dos projetos Seis Sigma. Cada fase possui objetivos específicos e garante que a solução proposta seja embasada em dados e estatística. De acordo com Pyzdek e Keller (2018), os projetos Black Belt são conduzidos por profissionais altamente capacitados, com domínio de ferramentas estatísticas, que têm como missão liderar melhorias de grande impacto estratégico.

No contexto industrial brasileiro, Werkema (2011) destaca que a integração entre Lean e Seis Sigma gera resultados expressivos, unindo a eliminação de desperdícios à redução de variabilidade. Essa sinergia é fundamental em setores que lidam com altos volumes produtivos e grande complexidade operacional, como a indústria cerâmica.

Além disso, Carvalho e Paladini (2012) reforçam que a gestão da qualidade deve ser entendida como parte estratégica do negócio, e não apenas como um setor isolado. Assim, metodologias robustas como o Seis Sigma ampliam a competitividade, sobretudo em mercados onde a qualidade é um fator decisivo.

2.2. CERÂMICAS MONOPOROSAS

As cerâmicas monoporosas são um dos principais materiais utilizados para revestimentos internos de parede, o que não demandam alta resistência mecânica. Caracterizam-se por elevada porosidade e absorção de água, o que limita sua aplicação em áreas externas ou sujeitas a condições severas.

De acordo com Kingery, Bowen e Uhlmann (1976), a microestrutura da cerâmica influencia diretamente suas propriedades finais, sendo a absorção de água uma das mais críticas. Esse parâmetro está relacionado ao tamanho, à distribuição e à conectividade dos poros, que, por sua vez, dependem do processo de fabricação.

A ABNT NBR 13006 (2020) estabelece critérios de absorção de água para diferentes grupos de revestimentos cerâmicos. Para os monoporosos, a norma permite absorções elevadas, mas ainda dentro de limites que garantam durabilidade mínima. Já a ISO 10545-3 (2021) apresenta o método padronizado de determinação da absorção, da porosidade aparente e da densidade relativa e densidade aparente.

O controle desse parâmetro é vital, pois, segundo Callister (2018), cerâmicas com absorção excessiva apresentam menor resistência mecânica, maior suscetibilidade a fissuras e degradação precoce em contato com água.

2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água em cerâmicas monoporosas é determinada por diversos fatores que interagem entre si ao longo do processo produtivo.

A composição da massa é determinante para o desempenho final. A proporção entre argilas, feldspatos e aditivos influencia a formação de fases vítreas durante a queima. Riley (1997) aponta que formulações com maior teor de fundentes tendem a reduzir a porosidade final.

Outro fator relevante é a granulometria. Partículas mais finas favorecem a compactação e reduzem espaços vazios, diminuindo a absorção. Já granulometrias muito heterogêneas podem gerar falhas de sinterização (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976).

A compactação também exerce forte influência. A pressão aplicada durante a moldagem impacta diretamente a densidade da peça crua. Kingery et al. (1976)

destacam que densidades maiores na etapa verde resultam em menor absorção após a queima.

O ciclo de queima é outro aspecto fundamental. Tanto a temperatura máxima quanto a taxa de aquecimento e resfriamento influenciam a formação da fase líquida e a eliminação de poros. Segundo Norton (1974), uma curva inadequada pode gerar defeitos como trincas, empenamento e retenção de poros abertos.

Por fim, a porosidade é considerada a principal responsável pela absorção. Callister (2018) reforça que a absorção de água é consequência direta da porosidade, sendo que poros abertos e interconectados permitem maior penetração de líquidos.

Assim, a redução da absorção passa pela combinação adequada de formulação, compactação e sinterização, etapas que precisam ser tratadas de forma integrada dentro do processo de melhoria.

2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA COMO PARÂMETRO DE QUALIDADE

A absorção de água é considerada um dos indicadores mais relevantes na avaliação de revestimentos cerâmicos. A ABNT NBR 13006 (2020) classifica os revestimentos de acordo com a taxa de absorção, que pode variar desde menor que 0,5% para porcelanatos até acima de 10% para cerâmicas monoporosas.

Segundo Silva et al. (2020), esse parâmetro é determinante para definir a área de aplicação do produto, influenciando diretamente sua durabilidade e desempenho. No caso das monoporosas, a redução da absorção dentro dos limites normativos pode ampliar sua competitividade e reduzir reclamações de clientes relacionadas a infiltrações e manchas.

Além disso, a absorção elevada está associada a menor resistência mecânica e maior degradação química. Riley (1997) aponta que produtos com porosidade controlada apresentam desempenho superior em ambientes úmidos, o que justifica a busca contínua por melhorias no processo produtivo.

2.5. APLICAÇÕES DE SEIS SIGMA NA INDÚSTRIA CERÂMICA

A indústria cerâmica é caracterizada por processos complexos e variáveis, o que a torna um campo fértil para aplicação de metodologias como o Seis Sigma. Segundo

Carvalho e Paladini (2012), ferramentas estatísticas permitem identificar pontos críticos de controle e reduzir variações indesejadas.

No contexto da absorção de água, projetos Black Belt podem atuar em diferentes frentes: ajuste da formulação da massa, controle mais rigoroso da granulometria, padronização da pressão de compactação, revisão da curva de queima e monitoramento estatístico das propriedades físicas.

Embora existam poucos relatos publicados especificamente em cerâmica monoporosa, Norton (1974) e Kingery et al. (1976) já destacavam a importância do controle sistemático dos parâmetros de processo para reduzir variabilidades. A abordagem Seis Sigma oferece justamente a estrutura necessária para transformar esse controle em resultados mensuráveis.

2.6. SÍNTESE DA REVISÃO

A revisão bibliográfica evidencia que a absorção de água em cerâmicas monoporosas é um parâmetro crítico, diretamente relacionado à sua durabilidade e aplicação final. Fatores como formulação da massa, compactação e queima exercem influência decisiva, e ajustes nessas etapas podem reduzir a porosidade e, conseqüentemente, a absorção.

Ao mesmo tempo, o Seis Sigma se mostra uma metodologia robusta para conduzir esse tipo de projeto, pois permite identificar causas raiz, quantificar variações e implementar soluções sustentáveis. A união entre o conhecimento técnico em cerâmica e as ferramentas estatísticas do Black Belt possibilita alcançar a meta de redução na absorção de água, alinhando ganhos de qualidade, custo e competitividade.

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO

A revisão da literatura demonstra que a aplicação da metodologia Seis Sigma, aliada ao conhecimento técnico sobre o comportamento das massas cerâmicas, permite a identificação das principais variáveis que impactam a absorção de água nas peças monoporosas. Dessa forma, a integração entre a abordagem estatística e a engenharia de materiais representa uma estratégia eficaz para otimização do processo produtivo e atendimento às normas internacionais de qualidade.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseia-se na aplicação do Seis Sigma, por meio do ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), utilizado para o desenvolvimento de projetos de melhoria contínua e redução de variabilidade nos processos produtivos.

Conforme Werkema (2011), o DMAIC constitui uma abordagem estruturada que combina ferramentas estatísticas e técnicas de gestão da qualidade para eliminar causas de não conformidades e otimizar o desempenho dos processos. Segundo Montgomery (2019), o método é amplamente aplicado em ambientes industriais, pois permite que as decisões sejam tomadas com base em dados e análises quantitativas, reduzindo a subjetividade e aumentando a confiabilidade das soluções propostas.

A escolha dessa metodologia justifica-se pela necessidade de obter redução consistente da absorção de água nas cerâmicas monoporosas, atendendo aos limites especificados pela norma americana ANSI A137.1:2022. A aplicação do DMAIC possibilita identificar as variáveis mais críticas do processo de fabricação e estabelecer ações eficazes para garantir que as peças produzidas permaneçam dentro do padrão exigido. O desenvolvimento do projeto seguiu as cinco fases do ciclo DMAIC, descritas a seguir:

3.1. FASE DEFINIR (DEFINE)

Se refere a primeira fase do método DMAIC que envolve a iniciação do projeto. Nesta etapa, são definidos os tópicos elencados abaixo:

3.1.1. Descrição do problema

O objetivo desta etapa é compreender o problema e definir claramente o escopo e as metas do projeto.

Nesta fase foram realizadas reuniões com as equipes do laboratório da indústria cerâmica: técnico de massa, coordenador e analista de qualidade dos produtos, além de reuniões com empresa de consultoria para dar suporte as

formulações de massas, a fim de identificar os principais impactos da absorção de água elevada sobre a conformidade do produto e sobre o mercado exportador.

Foram definidos os seguintes elementos:

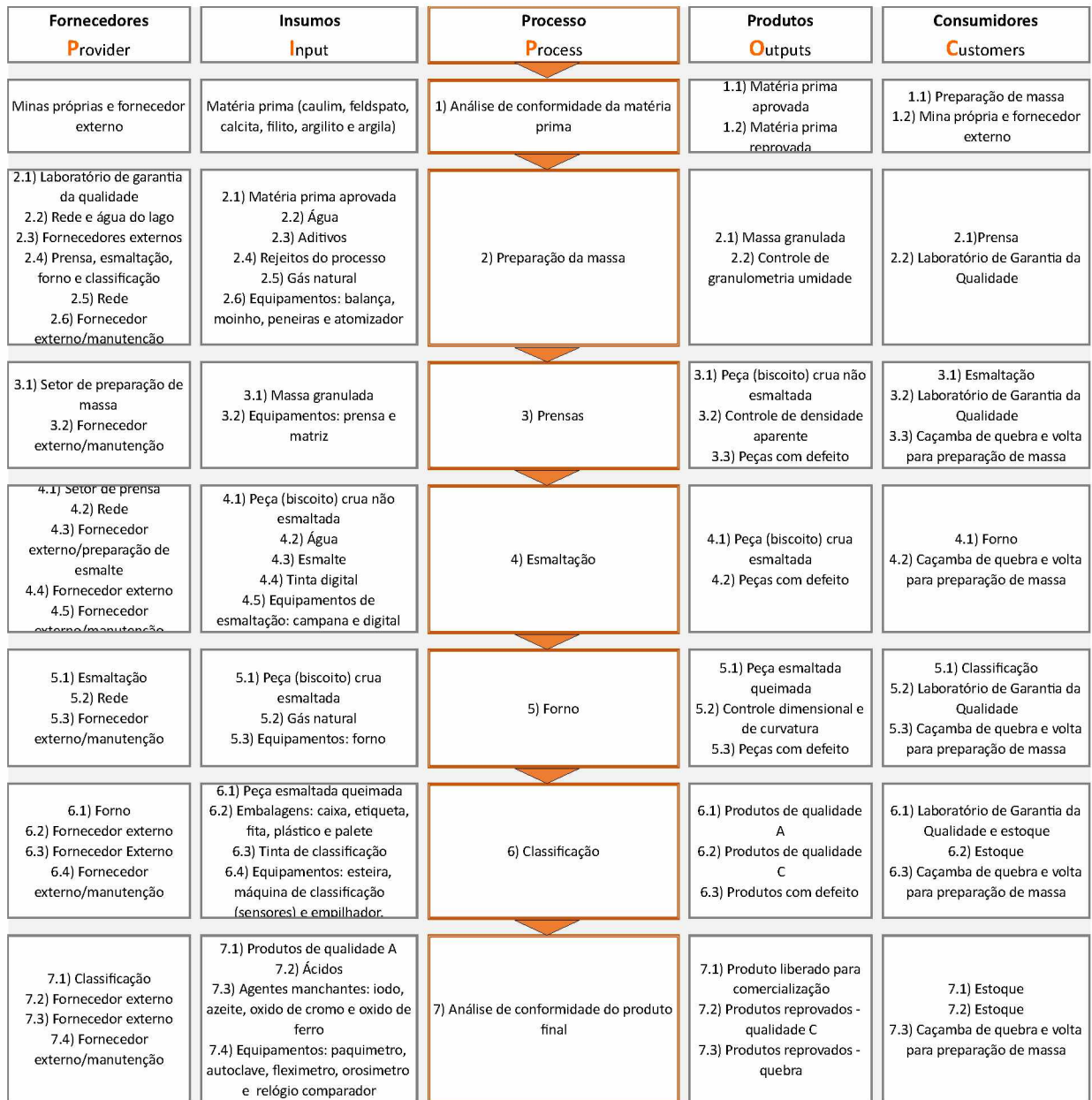
- Problema: As peças cerâmicas monoporosas apresentavam absorção de água entre 19,7% e 21,6%, acima do limite exigido pela norma ANSI A137.1:2022 (máximo de 20%);

- Meta do projeto: Reduzir a absorção média de água das peças monoporosas para $\leq 20\%$ sem alterar as características dimensionais da peça e aumentando no máximo 1% no custo final do produto;

- Indicador principal (Y): Percentual de absorção de água das peças.

O mapeamento inicial do processo produtivo foi realizado por meio de um fluxograma, contemplando as principais etapas desde a preparação da massa até a inspeção final. Esse mapeamento permitiu visualizar os pontos críticos de controle e estabelecer as fronteiras do projeto. Na figura 1, são apresentadas as principais etapas do trabalho.

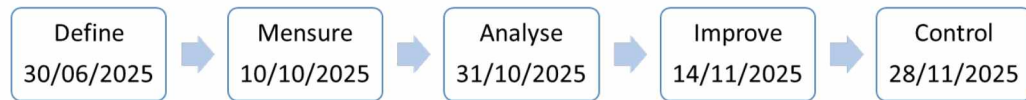
FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS DO TRABALHO



FONTE: O AUTOR (2025)

Além disso, foi elaborado um Plano do Projeto DMAIC, definindo cronograma e entregas de cada fase. Na Figura 2, é ilustrado esse cronograma.

FIGURA 2 - CRONOGRAMA DO PROJETO



FONTE: O AUTOR (2025)

O estudo foi desenvolvido em uma indústria cerâmica localizada no estado do Paraná, cuja linha de produção é voltada para revestimentos monoporosos destinados, majoritariamente, à exportação para o mercado norte-americano.

As análises foram realizadas no laboratório de controle de qualidade da empresa, seguindo as normas ABNT NBR ISO 13006:2020 e ANSI A137.1:2022 para determinação da absorção de água.

3.1.2. Descrição do indicador

O indicador selecionado para monitoramento do projeto é a taxa de absorção de água das peças cerâmicas monoporosas, expressa em percentual. Esse parâmetro está diretamente relacionado à conformidade com a norma americana ANSI A137.1:2022, que estabelece limite máximo de 20% de absorção de água para esse tipo de produto.

O cálculo do indicador segue as seguintes fórmulas:

$$\% \text{ de peças que atendem norma} = \frac{\text{Soma da absorção medida em cada amostra}}{\text{N}^\circ \text{ de amostras}}$$

$$\% \text{ de absorção de água (norma)} = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso Inicial}}{\text{Peso Inicial}} \times 100$$

- Meta: ≤ 20%.

Fonte de dados: Ensaio normativos de absorção de água realizados em laboratório interno, conforme metodologia prevista na ANSI A137.1:2022.

3.1.3. Descrição do histórico

A análise histórica dos resultados ilustrada na Figura 3, demonstra que no ano de 2024, apenas os meses de agosto e setembro apresentaram valores médios de absorção de água abaixo de 20%, atendendo à norma ANSI A137.1:2022. Nos demais meses, o indicador ultrapassou o limite máximo estabelecido, resultando em média anual de 20,35%.

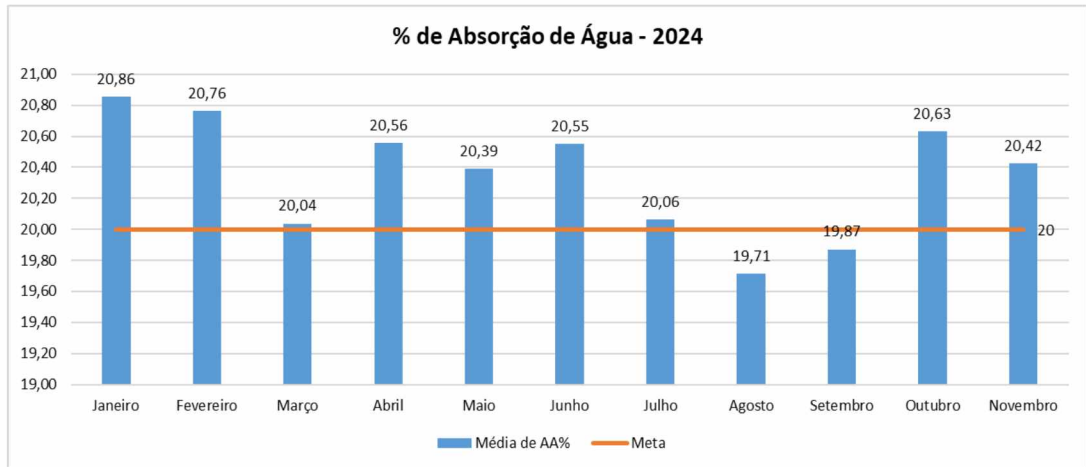
Na Figura 4 é ilustrado o período de janeiro a junho de 2025, onde todos os meses apresentaram índices superiores a 20%, com média trimestral de 21,10%, evidenciando uma tendência de piora do desempenho do processo em relação ao que a norma solicita.

Os resultados indicam que a absorção de água das cerâmicas monoporosas tem se mantido acima do limite aceitável em grande parte dos períodos analisados. Embora tenha ocorrido leve melhoria no segundo semestre de 2024, o aumento observado em 2025 demonstra a necessidade de intervenção estruturada no processo produtivo, de forma a:

- Garantir a conformidade com normas norte-americanas;
- Atender às exigências de clientes estrangeiros.

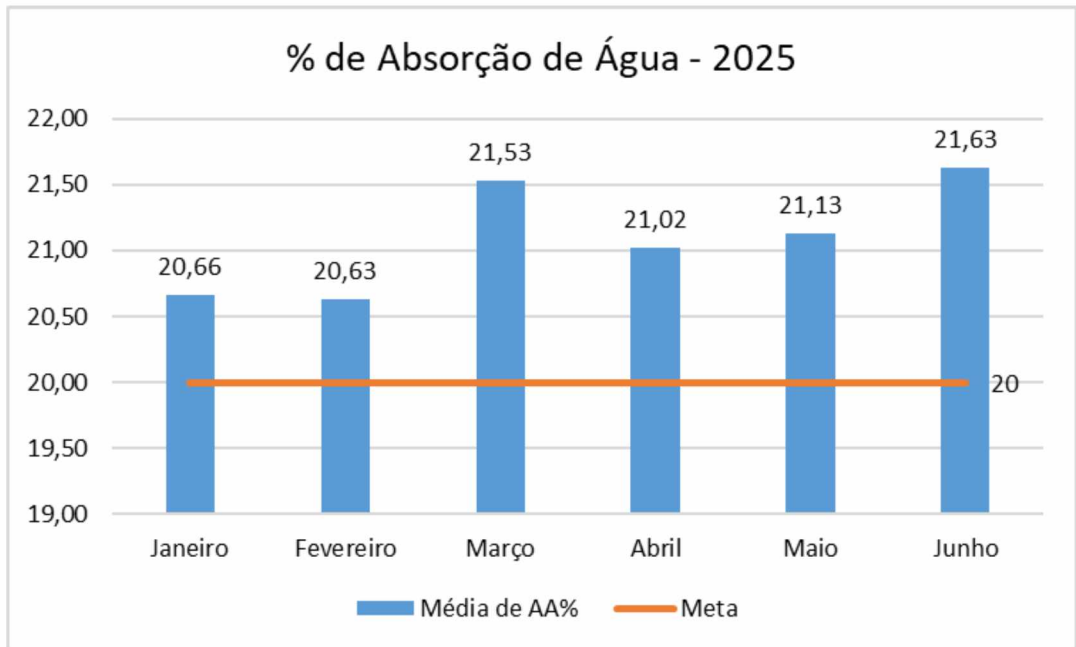
A implementação do projeto DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) surge como abordagem metodológica adequada para tratar o problema de forma sistemática, utilizando ferramentas estatísticas e de qualidade para identificar as causas raízes e propor ações eficazes de melhoria contínua.

FIGURA 3 - PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 2024



FONTE: O AUTOR (2025)

FIGURA 4 - PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 2025



FONTE: O AUTOR (2025)

Esses resultados reforçam a importância do desenvolvimento do projeto DMAIC com o objetivo de reduzir a absorção da água para igual ou inferior à 20%, atendendo à exigência de clientes internacionais e estando em conformidade com normativas.

3.1.4. Descrição de metas

O projeto tem como meta reduzir a absorção de água das peças cerâmicas para valores iguais ou inferiores a 20%, conforme a norma ANSI A137.1:2022, sem impactar no custo final do produto em mais de 1,0% e sem alterar as dimensões do produto.

3.1.5. Descrição dos ganhos

A adequação da fábrica às normas internacionais, especialmente à norma americana ANSI A137.1 e a norma internacional ABNT NBR ISO 13006, representa um avanço estratégico e técnico significativo para a organização. Conforme Paladini (2020), a qualidade não deve ser compreendida apenas como um atributo do produto, mas como um elemento estratégico que orienta todas as decisões empresariais. Nesse contexto, a adoção de padrões normativos reconhecidos internacionalmente é fundamental para garantir a competitividade e a sustentabilidade do negócio.

Em primeiro lugar, destaca-se o ganho em conformidade legal, assegurando que o processo produtivo e o produto estejam em total alinhamento com as exigências técnicas internacionais. Esse atendimento preventivo às normas evita possíveis sanções regulatórias, barreiras comerciais e rejeições alfandegárias, fortalecendo a imagem institucional da empresa frente a clientes e órgãos fiscalizadores. De acordo com a ABNT NBR ISO 13006 (2020), a conformidade técnica é essencial para a comercialização de revestimentos cerâmicos, uma vez que estabelece critérios padronizados de desempenho e classificação dos produtos.

Outro benefício relevante é a retenção de clientes-chave. A conformidade com normas internacionais consolida a relação de confiança e credibilidade com parceiros estratégicos, especialmente com clientes internacionais que exigem padrões de qualidade e desempenho específicos. Essa adequação é indispensável para garantir a continuidade comercial com o principal cliente da empresa, responsável por cerca de 30% da produção atual. Segundo Falconi (2014), a consistência na entrega de produtos conformes é um dos pilares da fidelização de clientes e da excelência operacional.

A ampliação do acesso a novos mercados é outro impacto direto da adequação. Ao atender aos requisitos da ANSI A137.1 (2017), a empresa se torna apta

a fornecer para clientes situados nos Estados Unidos e em outros países que adotam o mesmo referencial normativo. Tal adequação amplia o potencial de exportação e posiciona a empresa de forma competitiva em um cenário global cada vez mais exigente. Conforme Juran (1990), a padronização internacional é um diferencial que permite às organizações competirem em mercados diversos, assegurando confiança e previsibilidade quanto à qualidade do produto.

Do ponto de vista técnico, a conformidade promove uma melhoria significativa na qualidade do produto. O controle rigoroso da faixa de absorção de água, previsto nas normas, resulta em produtos com maior estabilidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade. Essa melhoria reduz a ocorrência de defeitos como manchas por umidade e aumenta a satisfação do cliente final.

De acordo com Campos (2014), a gestão da qualidade deve ser entendida como um processo contínuo de aprimoramento, pautado na redução de variabilidade e na busca por resultados sustentáveis.

A adequação normativa também minimiza riscos contratuais, evitando perdas financeiras associadas ao não atendimento de requisitos técnicos e ao cancelamento de pedidos. Tal prática fortalece a confiabilidade da empresa perante seus parceiros comerciais e garante maior previsibilidade operacional. Por fim, a conformidade com normas internacionais proporciona um incremento expressivo na competitividade. O alinhamento às boas práticas globais agrega valor percebido ao produto, reforça a reputação da marca e posiciona a empresa como referência em qualidade e inovação. Como afirmam Miguel (2021) e Paladini (2020), a adequação a normas técnicas não apenas eleva o padrão produtivo, mas também atua como fator estratégico para diferenciação em mercados altamente concorridos.

Em síntese, os ganhos obtidos com a adequação normativa abrangem dimensões legais, comerciais, técnicas e estratégicas, refletindo diretamente na sustentabilidade e no fortalecimento competitivo da organização no cenário internacional.

3.1.6 Descrição do alinhamento entre a universidade e a empresa

Com o objetivo de formalizar o alinhamento entre a universidade e a empresa de cerâmica monoporosas, foi elaborado e acordado um Business Case, o qual está

apresentado no Anexo 1 deste trabalho. Esse documento serviu como instrumento norteador para a definição conjunta dos objetivos, escopo, responsabilidades e metas do projeto, garantindo o comprometimento mútuo das partes envolvidas. Para fins ilustrativos, são apresentadas a seguir capturas de tela que exemplificam os principais trechos e elementos do referido Business Case, evidenciando a integração e a sinergia estabelecida entre a academia e o setor produtivo.

3.2. FASE MEDIR (MEASURE)

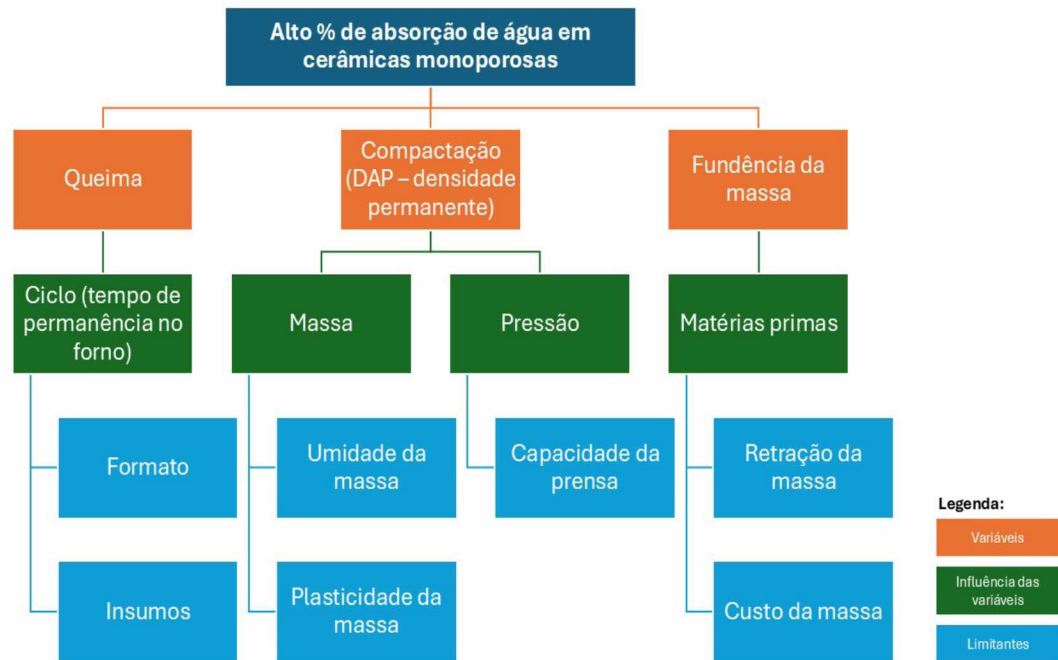
Depois de definir claramente o problema a ser estudado, os dados coletados foram organizados e separados para identificar quais variáveis eram mais importantes para as próximas etapas do projeto. Essa fase é essencial na metodologia DMAIC, pois ajuda a entender o tamanho do problema com base em dados numéricos. Para realizar essa etapa, seguiu-se os procedimentos metodológicos apresentados a seguir.

3.2.1. Descrição dos critérios

O principal objetivo desta fase foi estabelecer a proposta e o plano de execução do projeto. A partir desse ponto, buscou-se compreender totalmente o problema a ser solucionado.

Para entender melhor os fatores que impactam diretamente na absorção de água nas cerâmicas monoporosas foi realizado uma análise do problema usando a estratificação. A estratificação consiste em dividir os dados em grupos ou categorias específicas, o que permite uma avaliação mais clara e direcionada das possíveis causas do problema, auxiliando na identificação de padrões e relações entre os fatores observados, conforme ilustrado na Figura 5.

FIGURA 5 - ÁRVORE DE ESTRATIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS POSSÍVEIS CAUSAS DO PROBLEMA



FONTE: O AUTOR (2025)

A primeira dimensão de estratificação considerada foi a compactação (DAP – densidade aparente permanente). Essa análise possibilitou verificar a relação entre massa e pressão, identificando eventuais variações na capacidade de absorção de água.

A segunda dimensão está relacionada à etapa de queima, avaliando o tempo de permanência no forno e temperatura de queima e suas possíveis variações conforme o formato das peças e os insumos utilizados.

Já a terceira dimensão busca estabelecer correlações entre a fundência da massa, característica determinada pelas matérias-primas empregadas e seus efeitos sobre a retração e o custo final do produto.

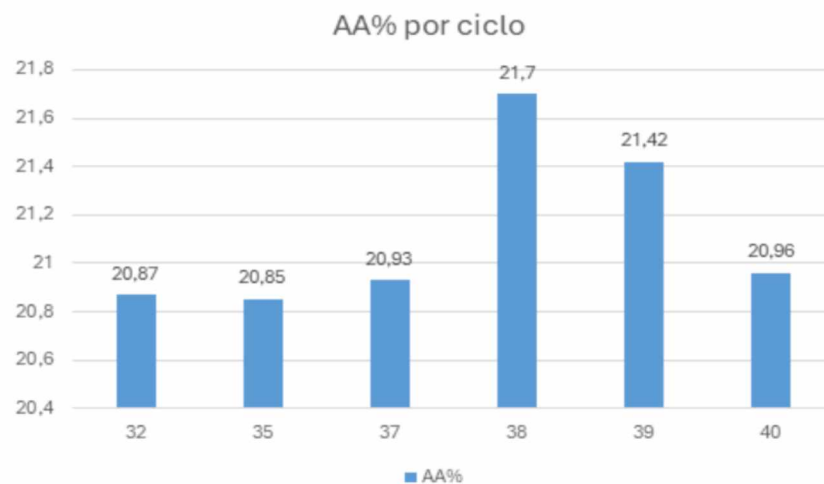
Os dados apresentados são considerados confiáveis, pois resultam de ensaios normatizados que contemplam diversos parâmetros, incluindo a absorção de água. Esse teste, de caráter essencial, é realizado semanalmente. Além disso, trimestralmente, amostras são mandadas ao Centro Cerâmico do Brasil (CCB), responsável pela avaliação e validação do processo.

3.2.2. Descrição dos focos

Ao analisar as possíveis variáveis que influenciam a absorção de água das peças cerâmicas, foram identificados três principais fatores a serem aprimorados: a compactação das peças, o processo de queima e a fluência da massa. Em consulta ao setor de prensas, verificou-se que a compactação já opera no limite de capacidade do equipamento (prensa) para alguns formatos específicos, como 4x10, 4x12, 6x18 e 33x60.

Ao avaliar a variável queima, considerando o tempo de ciclo, período em que a peça permanece no forno, observou-se que há pequenas variações nesse processo. No entanto, nenhum dos tempos de ciclo atualmente utilizados apresentou resultados satisfatórios. A Figura 6 apresenta um gráfico que ilustra a relação entre o tempo de queima e a absorção de água nas peças.

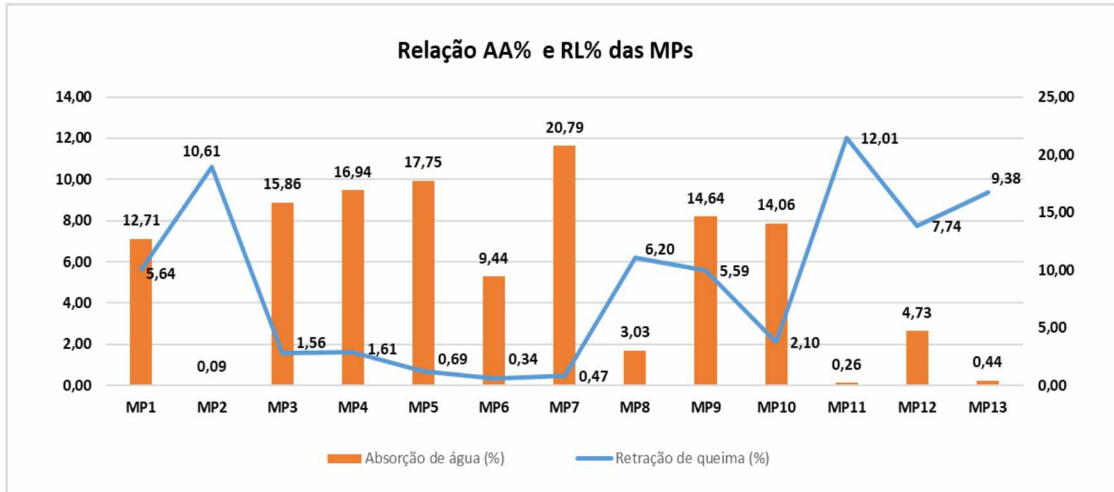
FIGURA 6 - TEMPO DE CICLO DE QUEIMA VERSUS ABSORÇÃO DE ÁGUA NA PEÇA



FONTE: O AUTOR (2025)

Ao examinar todas as matérias-primas utilizadas na formulação atual da massa, juntamente com aquelas disponíveis nas outras duas fábricas da mesma empresa, constatou-se que elas possuem propriedades diferentes. Isso mostra que há oportunidades de desenvolver novas formulações para melhorar os resultados. Na Figura 7 é lustrado um gráfico que estabelece correlações entre a absorção de água, retração e as matérias-primas.

FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA, RETRAÇÃO E MATÉRIA - PRIMA

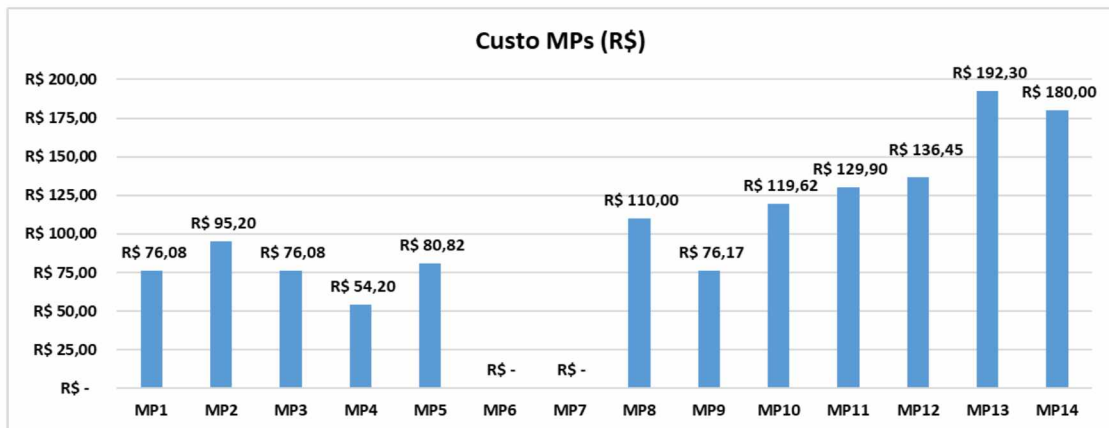


FONTE: O AUTOR (2025)

Ao observar o gráfico apresentado na Figura 7, verifica-se a relação entre os valores de absorção de água e retração de cada matéria-prima. Nota-se que algumas delas, como MP2, MP11 e MP13, apresentam elevado grau de fundência, o que se reflete em baixa absorção de água e alta retração.

Como o objetivo do trabalho é reduzir a absorção sem aumentar em mais de 1% o custo final do produto, foi avaliado o impacto do custo de cada matéria-prima conforme ilustrado na Figura 8.

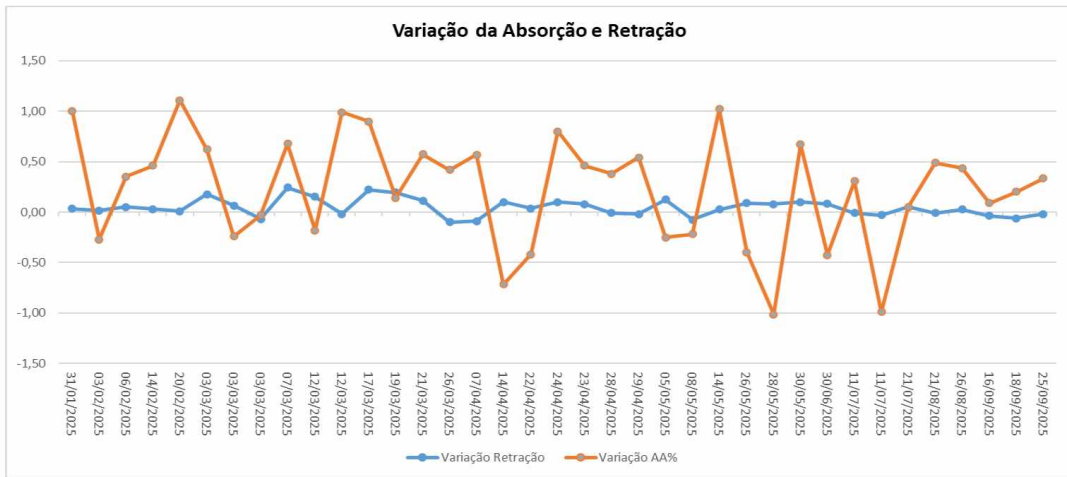
FIGURA 8 - CUSTO DE CADA MATÉRIA-PRIMA



FONTE: O AUTOR (2025)

Foi avaliado também como a massa atual está se comportando ao longo do tempo, onde analisa-se como varia a absorção de água e a retração, conforme ilustrado na Figura 9.

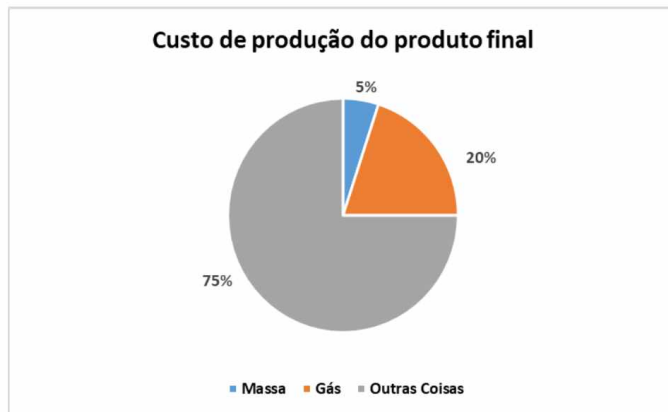
FIGURA 9 – CORRELAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E A RETRAÇÃO



FONTE: O AUTOR (2025)

Observou-se que o custo da formulação da massa, corresponde a aproximadamente apenas, a um quarto do custo do gás, conforme ilustrado no gráfico da Figura 10. Portanto, optou-se por concentrar o estudo nas formulações de massa.

FIGURA 10 – CUSTO DOS INSUMOS



FONTE: O AUTOR (2025)

3.2.3. Descrição das metas específicas

Com base no foco do problema optou-se por especificar as seguintes metas:

- **Meta 1** - Reduzir a absorção de água da massa $\leq 20\%$: baixar a absorção de água da massa para valores menores que 20%, utilizando uma maior quantidade de matérias-primas fundentes na massa como MP2, MP11 e MP13, porém compensando com matérias-primas que possuem baixa retração como MP5, MP6 MP7 e MP14 para não alterar a retração do produto e assim não afetar o tamanho final das peças.
- **Meta 2** - Aumentar no máximo 20% o custo da massa: realizar a meta 1, avaliando o custo de cada MP na formulação, de modo que não aumente mais do que 20%, uma vez que, 20% no custo de massa corresponde a 1% no custo do produto final, que é o limite da meta global do projeto para aumento de custo.

3.2.4. Descrição do alcance da meta geral

O alcance da meta geral do projeto encontra-se diretamente relacionado à absorção de água na massa e ao seu custo, considerando o impacto destes fatores no produto final. A meta estabelecida para a absorção de água da massa é equivalente à meta definida para o produto acabado, de forma a garantir que a melhoria no processo de fabricação seja refletida diretamente no desempenho do produto. Em relação ao custo, definiu-se que o aumento da massa não deve exceder 20%, o que corresponde a, no máximo, 1% de acréscimo no custo total do produto, uma vez que a massa representa cerca de 5% do custo final.

Para atender a essas diretrizes, buscou-se reduzir a absorção de água da massa para valores inferiores a 20%, utilizando proporções maiores de matérias-primas fundentes, como MP2, MP11 e MP13, de modo a melhorar o desempenho da massa. Ao mesmo tempo, foram consideradas matérias-primas de baixa retração, como MP5, MP6, MP7 e MP14, garantindo que a retração do produto não fosse alterada e que o tamanho final das peças permanecesse dentro das especificações. O planejamento da formulação levou também em conta o custo individual de cada matéria-prima, de forma que o incremento necessário para atingir a meta de absorção não resultasse em um

aumento de custo superior ao limite estabelecido, garantindo, assim, a viabilidade econômica do projeto.

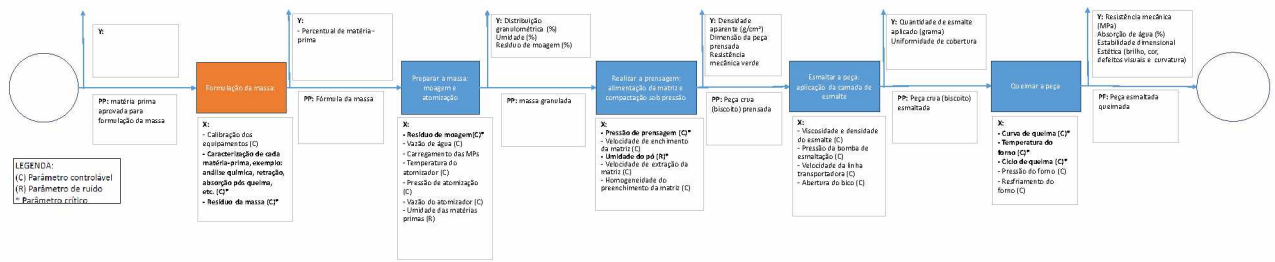
3.3. FASE ANALISAR (ANALYZE)

Com a finalização da coleta e do tratamento dos dados na fase *Measure*, realizou-se uma análise aprofundada dos resultados, visando identificar as causas dos problemas apontados na etapa anterior do estudo.

3.3.1. Descrição do processo gerador do problema

Identificou-se uma boa oportunidade para se trabalhar nas formulações. Nesse contexto, elaborou-se o detalhamento completo do processo produtivo, contemplando todas as etapas, desde a aprovação da matéria-prima até a fase de queima das peças. Para essa análise, foi utilizada a ferramenta de mapa de processo, que permitiu representar de forma clara as funções, etapas, entradas e saídas que agregam valor ao produto final e, conseqüentemente, aos clientes. A partir dessa avaliação, constatou-se que o principal ponto de melhoria está na etapa de preparação da massa destacado em laranja, conforme ilustrado na Figura 11 do diagrama do processo de obtenção de cerâmicas monoporosas.

FIGURA 11 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE CERÂMICAS MONOPOROSAS



FONTE: O AUTOR (2025)

3.3.2. Descrição das causas potenciais e sua priorização

Por meio da utilização da ferramenta brainstorming, consultorias técnicas (CRC) e do acompanhamento do processo, identificou-se diversas causas relacionadas ao problema estudado. Essas causas foram organizadas em cinco categorias principais, entre as quais se destacam: a insuficiência de matérias-primas fundentes na formulação, o excesso de matérias-primas refratárias na composição e a distribuição de tamanho de partículas provenientes do processo de moagem.

A análise indicou a falta de matérias-primas fundentes na formulação como uma das causas principais do problema identificado. Observou-se a baixa proporção de feldspato, matéria-prima reconhecida por atuar como formadora do ponto eutético e por facilitar a fusão da massa. Além disso, verificou-se a baixa presença de argilas fundentes, que são argilas que tem como característica elevada concentração de óxidos alcalinos. Outro fator identificado foi a ausência de matérias-primas com alto teor de óxido de magnésio, como o talco.

A avaliação indicou que o excesso de matérias-primas refratárias na formulação exerce influência significativa sobre o problema identificado. Constatou-se um excesso de calcita, que contribui para manter a retração da massa em níveis baixos, porém aumenta de forma considerável a absorção. Também foi constatado a utilização de argilas refratárias, caracterizadas pela baixa presença de impurezas, como óxidos. Outro fator relevante é o excesso de material rochoso, como o filito, que auxilia no controle da retração, mas eleva a absorção. Além disso, verificou-se a inclusão de caulins refratários, igualmente com baixo teor de impurezas.

Identificou-se ainda que o resíduo de moagem também é um fator importante, uma vez que, em percentual elevado influencia negativamente a massa, tornando-a mais refratária devido ao maior tamanho das partículas, o que dificulta sua fusão. Além disso, a distribuição das partículas na massa exerce papel importante, pois afeta o empacotamento e, conseqüentemente, a prensagem da massa.

Se os controles característicos das matérias-primas não estiverem adequados, pode-se ter variação nas características da massa. A falta de monitoramento dos parâmetros de atomização, também impacta diretamente na umidade e na granulometria do material. Da mesma forma, que a falta de um controle do processo de moagem, pode comprometer a qualidade final da massa.

A priorização das causas foi realizada por meio da aplicação da Matriz GUT, que avaliou cada fator considerando os critérios de Gravidade, Urgência e Tendência. As notas atribuídas a cada critério foram multiplicadas ($G \times U \times T$) para calcular o índice de prioridade, a partir do qual foi estabelecida a seguinte ordem de prioridade: em primeiro lugar, a baixa presença de feldspato; em segundo, o excesso de matérias rochosas; em terceiro, a insuficiência de argila fundente; em quarto, a quantidade elevada de calcita; em quinto, a presença de argilas refratárias; e, por fim, o uso de caulim refratário. A partir dessa abordagem, foram priorizadas as causas principais. Na Figura 12 é ilustrado a matriz GUT mencionada.

FIGURA 12 – MATRIZ GUT DAS CAUSAS PRIORIZADAS

MATRIZ GUT							
Categoria	Número da causa	Descrição da causa	Meta específica relacionada	Gravidade	Urgência	Tendência	Total
Falta de matérias-primas fundentes na formulação	1	Baixa quantidade de feldspato que é uma matéria-prima conhecida por ser formador de ponto eutético e facilitar a fusão da massa	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	4	4	1	16
	2	Baixa quantidade de argilas fundentes (alta concentração de óxidos alcalinos)	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	3	4	1	12
	3	Não utilização de matérias-primas com grande quantidade de óxido de magnésio como o Talco.	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	2	2	1	4
Excesso de matérias-primas refratárias na formulação:	4	Excesso de calcita que auxilia em manter a retração da massa baixa, porém eleva bastante a absorção	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	3	4	1	12
	5	Utilização de argilas refratárias (baixa quantidade de impurezas como óxidos)	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	3	4	1	12
	6	Excesso de material rochoso como filito, que auxiliar na retração mas eleva a absorção	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	4	4	1	16
	7	Utilização de Caulins refratários ((baixa quantidade de impurezas como óxidos)	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%; M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa	4	3	1	12
Resíduo de moagem	8	Resíduo de moagem muito alto, o que deixa a massa mais refratária, uma vez que, as partículas são maiores e é mais difícil para fundi-las	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%	2	2	1	4
	9	Distribuição de partículas da massa, uma vez que afeta o empacotamento e por consequência a prensagem da massa	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%	2	2	2	8
Controle de matéria-prima e processos	10	Falta de controle das características das matérias-primas;	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%	4	2	1	8
	11	Falta de controle nos parâmetros de atomização, o que afeta a umidade e granulometria;	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%	3	2	1	6
	12	Falta de controle de moagem.	M1: Reduzir a absorção de água da massa ≤ 20%	3	2	1	6



FONTE: O AUTOR (2025)

3.3.3. Descrição da comprovação das causas principais

A comprovação das causas principais realizou-se por meio da metodologia DOE (*Design of Experimentos*) do tipo mistura. Cerca de vinte formulações foram preparadas, variando-se de forma controlada as quantidades de feldspato, argilas fundentes, argilas refratárias, caulim refratário, calcita e material rochoso. Para cada formulação foi feita uma moagem em laboratório (0,5 kg moídos em um moinho de jarro) e confeccionados corpos de prova, nos quais mediu-se a absorção de água e a retração foi avaliada por medida após o processo de queima. Na Figura 13 é ilustrado

o quando onde estão elencadas as formulações utilizadas para o DOE e os resultados obtidos.

FIGURA 13 – FORMULAÇÕES BASE PARA DOE

Mistura	MP2 (%)	MP3 (%)	MP4 (%)	MP5 (%)	MP6 (%)	MP7 (%)	MP9 (%)	MP14 (%)	Retração	Absorção
Atual	6,7	30	8,3	12	5,5	4	18,9	14,6	0,40	21,00
1	7,5	28,5	9	11,5	5	3,5	20	15	0,42	21,00
2	6	32	8	12	5,5	4	17,5	15	0,38	20,46
3	7	29	8,5	11	6	3,5	21	14	0,42	21,49
4	6,5	30	9	10,5	5	4	20,5	14,5	0,41	21,17
5	7	31	8	11,5	5,5	3	19	15	0,41	20,72
6	6	28	9,5	12	5,5	4,5	18,5	15	0,38	21,41
7	7,5	29,5	8	11	6	3,5	19,5	15	0,42	20,50
8	6,5	30,5	8,5	11,5	5	3,5	19	15,5	0,40	20,93
9	7	28	9	12,5	5,5	4	18	16	0,39	21,74
10	6	31	8,5	11	5	3,5	19,5	16,5	0,39	21,25
11	7,5	30	8	12	6	3	18	16,5	0,40	20,60
12	6,5	29	9,5	10,5	5,5	4	19	15	0,40	21,03
13	7	30,5	8	11	5	3,5	18,5	16,5	0,40	20,69
14	6	28,5	9	12	6	4	18,5	16	0,38	21,87
15	7,5	29	8,5	11,5	5,5	3	19	16	0,41	21,15
16	6,5	30	9	11	5	4	18,5	16	0,39	20,95
17	7	28,5	8	12	6	3,5	19,5	16	0,41	21,83
18	6	30,5	9,5	10,5	5,5	3	19	16	0,39	21,13
19	7,5	29	8	11,5	5	4	18,5	16,5	0,41	20,50
20	6,5	30	9	12	5,5	3,5	18	16	0,39	21,16

FONTE: O AUTOR (2025)

Através destes resultados obtidos, gerou-se um código *Python* com o objetivo de minimizar a absorção de água e, tendo como restrição manter a retração linear e não aumentar o custo em mais do que 20%. Portanto, o código foi rodado no programa Colab para análise dos dados, onde este gerou uma formulação ideal para resolução do problema, conforme ilustrado na Figura 14.

FIGURA 14 – RESULTADO DO DOE

MP	Tipo de MP	Formula Atual	Formula Nova	Diferença de cada item	Observação
MP2	Feldspato	6,7%	8,4%	1,69%	Aumentar a quantidade
MP3	Argila fundente	30,0%	33,6%	3,60%	Aumentar a quantidade
MP4	Caulim	8,3%	7,5%	-0,80%	Diminuir a quantidade
MP5	Filito	12,0%	10,0%	-2,00%	Diminuir a quantidade
MP6	Quebra Queimada	5,5%	5,3%	-0,20%	Diminuir a quantidade
MP7	Quebra Crua	4,0%	4,4%	0,40%	Aumentar a quantidade
MP9	Argila refrataria	18,9%	17,0%	-1,90%	Diminuir a quantidade
MP14	Calcita	14,6%	13,8%	-0,80%	Diminuir a quantidade

FONTE: O AUTOR (2025)

Os resultados do DOE confirmam as causas previamente priorizadas. Observa-se que todas as matérias-primas identificadas como insuficientes na formulação original foram aumentadas na formulação proposta pelo DOE, enquanto todas aquelas identificadas em excesso foram reduzidas. A Figura 15 apresenta essas relações de forma detalhada

FIGURA 15 – RELAÇÃO DE CAUSAS COMPROVADAS

CAUSA PRIORIZADA	DESCRIÇÃO DA CAUSA	EVIDÊNCIA DA CAUSA (Mostrar que a causa acontece de Fato - Coloca Anexo se Necessário)	CAUSA COMPROVADA?
Quantia de Feldspato	Baixa quantia de Feldspato	Foi utilizado a metodologia estatística Design de experimento (DOE)	sim
Quantia de material rochoso	Excesso de material rochoso		sim
Quantia de calcita	Excesso de calcita		sim
Quantia de argila refratarias	Utilização de argilas refratarias		sim
Quantia de argilas fundentes	Baixa quantia de argilas fundentes		sim
Quantia de caulins refratários	Utilização de caulins refratários		sim

DESCRIÇÃO DA CAUSA
Baixa quantidade de feldspato
Excesso de material rochoso
Baixa quantidade de argilas fundentes
Excesso de calcita
Utilização de argilas refratarias
Excesso de material rochoso
Utilização de caulins refratários

FONTE: O AUTOR (2025)

3.4. FASE MELHORAR (IMPROVE)

Após definir claramente quais variáveis eram mais importantes para projeto, criou-se ações para cada uma, em busca de alcançar os objetivos do projeto. Para realizar essa etapa, foram seguidos os procedimentos metodológicos apresentados a seguir:

3.4.1. Descrição das soluções

A medida que o estudo avançou e os focos foram definidos, identificou-se que as soluções mais viáveis envolvem ajustes na composição da massa atualmente utilizada. Com base nos resultados do *Design of Experiments* (DOE) e nas análises

fornecidas pelas consultorias, constatou-se a necessidade de elevar a proporção de matérias-primas fundentes (como feldspato e argilas fundentes) e reduzir a participação de componentes refratários (argila refratária, calcita, caulins e filito). Inicialmente, a equipe pretende buscar essa adequação utilizando as oito matérias-primas já empregadas na fábrica; caso não seja possível atingir o desempenho esperado, serão avaliadas alternativas adicionais. Na Figura 16 são apresentadas as soluções propostas para as causas identificadas na fase de *improve*.

FIGURA 16 – POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Descrição da causa	Meta específica relacionada	Soluções Soluções específicas	Solução Geral
Baixa quantidade de feldspato que é uma matéria-primas conhecida por ser formador de ponto eutético e	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Aumentar a quantidade de feldspato na formula	Alterar a formulação atual da massa de monoporosa
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Baixa quantidade de argilas fundentes (alta concentração de óxidos alcalinos);	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Aumentar a quantidade de argila fundente na formula	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Baixa quantidade de argilas fundentes (alta concentração de óxidos alcalinos);	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Buscar argilas mais fundentes	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Excesso de calcita de auxilia em manter a retração da massa baixa, porém eleva bastante a absorção	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Diminuir a quantidade de calcita na formula	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Utilização de argilas refratarias (baixa quantidade de impurezas como óxidos)	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Diminuir a quantidade de argila refrataria na formula	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Excesso de material rochoso como filito, que auxiliar na retração mas eleva a absorção	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Diminuir a quantidade de filito na formula	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		
Utilização de Caulins refratarios ((baixa quantidade de impurezas como óxidos)	M1: Reduzir a absorção de água da massa \leq 20%	Diminuir a quantidade de caulins na formula	
	M2: Aumentar no máximo 20% o custo da massa		

FONTE: O AUTOR (2025)

3.4.2. Descrição das priorizações

Não se identificou a necessidade de priorização nas soluções, uma vez que, como se trata de uma formulação, é possível trabalhar todas as soluções propostas em conjunto.

3.4.3. Descrição dos riscos

Quando se realiza alterações nos componentes de uma formulação de massa, acaba-se alterando as propriedades físicas e químicas do produto, o que gera alguns riscos, como a mudança de curvatura ou tamanho das peças e aumento de defeitos de produção (furos e deformações). Nessa etapa foram mapeadas as causas e soluções, identificando-se o risco de implementação por meio da realização da análise de risco, considerando a probabilidade e impacto que multiplicados resultou no valor do risco. Nessa etapa, também foi elaborado um plano de contingência com o objetivo de

garantir que tais problemas não ocorram no produto. As informações correspondentes estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – ANÁLISE DE RISCOS

CAUSA FUNDAMENTAL	SOLUÇÃO SELECIONADA	RISCO DA IMPLEMENTAÇÃO (Imaginar que a solução foi implantada - Quais efeitos colaterais podem ser gerados ?)	ANÁLISE DE RISCO			PLANO DE CONTINGÊNCIA (Que fazer para minimizar o Risco)
			PROBABILIDADE	IMPACTO	RISCO	
Baixa quantidade de feldspato que é uma matéria-prima conhecida por ser formador de ponto eutético e facilitar a fusão da massa	Aumentar a quantidade de feldspato na fórmula	Aumentar a deformação piropelástica da massa	1	2	2	Acompanhar o índice da piropelásticidade das fórmulas
Baixa quantidade de argilas fundentes (alta concentração de óxidos alcalinos)	Aumentar a quantidade de argila fundente na fórmula/buscar argilas mais fundentes	Aumento de determinadas argilas pode aumentar a quantidade de material orgânico o que gera furos, deformações etc.	2	3	6	Realizar o ensaio de coração negro para garantir que o não ocorra um aumento considerável de matéria orgânica
Excesso de calcita de auxilia em manter a retração da massa baixa, porém eleva bastante a absorção	Diminuir a quantidade de calcita na fórmula	Pode aumentar muito a retração da massa	2	3	6	Buscar uma compensação com outras MPs
Utilização de argilas refratárias (baixa quantidade de impurezas como óxidos)	Diminuir a quantidade de argila refratária na fórmula/substituir por argila mais fundente	Pode gerar diferenças na retração da massa	1	2	2	Buscar uma compensação com outras MPs
Excesso de material rochoso como filito, que auxiliar na retração, mas eleva a absorção	Diminuir a quantidade de filito na fórmula	Dificuldade de compactação	1	1	1	Verificar a DAP das formulações
Utilização de Caulins refratários ((baixa quantidade de impurezas como óxidos)	Diminuir a quantidade de caulins na fórmula	Pode gerar diferenças na retração da massa	1	2	2	Buscar uma compensação com outras MPs

FONTE: O AUTOR (2025)

Conforme apresentado na tabela acima, duas causas apresentaram um nível de risco acima.

3.4.4. Descrição dos testes

Para testar as formulações de massa, serão realizadas quatro etapas de testes, iniciando-se em escala de laboratório e finalizando com um teste em produção.

3.4.4.1. Teste de laboratório

Inicialmente, serão elaboradas algumas formulações, considerando os pontos identificados nas etapas anteriores e o conhecimento técnico da equipe do laboratório da empresa. Após a elaboração, todas as matérias-primas a serem utilizadas deverão passar por um processo de secagem em estufa a 150 °C por 24 horas.

Cada uma das matérias-primas secas é pesada em balança analítica, respeitando-se as proporções da formulação, de modo a obter 500 g de mistura. Em seguida, a mistura é colocada em um moinho de jarro, adicionando-se 200 mL de água, e mantida em moagem até atingir o resíduo padrão da massa ($7 \pm 0,5\%$).

A barbotina (massa líquida) resultante do processo de moagem é descarregada do moinho em uma forma, que posteriormente é levada à estufa a 150 °C por 24 horas. Após esse período de secagem, a massa seca é retirada da forma e desaglomerada em moinho de martelo.

Na sequência, a massa é umidificada até atingir $7,4 \pm 0,2\%$ de umidade, com o auxílio de um borrifador de água. Dessa forma, a massa fica pronta para o processo de prensagem, realizado, nessa etapa, em uma prensa pequena de laboratório sob pressão de 300 bar. Por fim, o corpo de prova é encaminhado ao forno de produção, onde passa pelo processo de sinterização, realizado a uma temperatura de 1140 °C.

Os corpos de prova resultantes dessa preparação são utilizados para a realização dos ensaios de DAP, retração e absorção de água, conforme descrito na norma ABNT NBR ISO 10545.

3.4.4.2. Teste semi-industrial

A segunda etapa é realizada com as formulações aprovadas no teste de laboratório, tendo como objetivo avaliá-las em uma moagem industrial.

Inicialmente, a formulação é encaminhada ao setor de preparação de massa, que realiza o cadastro na balança industrial para a carga de um moinho de 14 t. Após o cadastro, o moinho é carregado com as matérias-primas, além de 6000 L de água e 90 L de aditivos, conforme o procedimento adotado na produção da massa padrão.

O material é moído até atingir o resíduo padrão ($7 \pm 0,5\%$). Posteriormente, são coletados 10 L da barbotina resultante, os quais passam pelos processos de secagem, umidificação, prensagem, queima e realização de ensaios, da mesma forma descrita na etapa de teste em laboratório.

3.4.4.3. Teste industrial pequeno

No teste industrial, realiza-se a moagem industrial da massa e, posteriormente, a prensagem e a queima de peças com essa massa em linha de produção.

A moagem é conduzida da mesma forma descrita na etapa semi-industrial; contudo, nessa fase, são moídos três moinhos de massa, e a barbotina resultante é destinada ao processo de atomização. A atomização ocorre em um spray dryer, no qual a barbotina é transformada em massa granulada por meio de um fluxo de ar quente do equipamento.

A massa granulada obtida é encaminhada ao processo de prensagem industrial, realizado nas prensas da linha de produção por um período de 30 minutos, resultando em peças com dimensões de 33 cm × 60 cm. Essas peças passam pelo processo de esmaltação, no qual são aplicadas uma camada de engobe (90 g) e uma camada de esmalte (100 g), por meio de duas campanas de esmaltação.

As peças esmaltadas são queimadas e, em seguida, destinadas ao setor de classificação, responsável por avaliar a qualidade e separar as peças em 1ª qualidade, 2ª qualidade e quebra.

Adicionalmente, são coletadas amostras para a realização dos ensaios de absorção de água, retração, DAP, curvatura e gretamento, conforme a norma ABNT NBR ISO 10545.

3.4.4.3. Teste industrial

O teste industrial é realizado de maneira semelhante ao teste industrial em pequena escala, diferenciando-se apenas pelo tempo de prensagem. Nesse caso, em vez de 30 minutos de produção, são realizadas 8 horas de prensagem, com o objetivo de avaliar a estabilidade da massa ao longo do tempo.

Durante esse período, as características do produto são monitoradas por meio da realização de ensaios a cada 1 hora.

3.4.5. Descrição dos resultados

Na sequência são apresentados os resultados de cada etapa:

3.4.5.1 Resultados dos testes de laboratório

As formulações foram iniciadas buscando-se manter as oito matérias-primas já utilizadas na composição atual da massa. Nesse processo, foi avaliada a formulação recomendada pelo DOE (Teste 1), bem como outras composições desenvolvidas pelo técnico da empresa. Inicialmente, foram elaboradas cinco formulações, conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 - FORMULAÇÕES LGQ

MP	Tipo de MP	Formula Atual	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
MP2	Feldspato	6,7%	8,40%	0,00%	0,00%	9,50%	9,00%
MP3	Argila fundente	30,0%	33,60%	43,90%	39,80%	35,00%	40,00%
MP4	Caulim	8,3%	7,50%	6,00%	6,00%	5,00%	5,00%
MP5	Filito	12,0%	10,00%	3,70%	7,80%	8,00%	9,00%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	5,30%	10,00%	10,00%	6,00%	6,00%
MP7	Quebra Crua	4,0%	4,40%	2,00%	2,00%	4,00%	4,00%
MP9	Argila refrataria	18,9%	17,00%	19,00%	19,00%	19,50%	15,00%
MP14	Calcita	14,6%	13,80%	15,40%	15,40%	13,00%	12,00%

FONTE: O AUTOR (2025)

Todas as formulações foram preparadas e submetidas aos testes de absorção e retração, sendo que os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – RESULTADOS FORMULAÇÃO LGQ

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m³)	Conclusão
Atual	21,02	0,40	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 1	19,95	0,43	1,89	Absorção atingiu o objetivo
Teste 2	20,34	0,48	1,91	Absorção maior que o objetivo
Teste 3	20,40	0,50	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 4	19,87	0,70	1,88	Retração muito alta
Teste 5	19,92	0,58	1,89	Retração muito alta

FONTE: O AUTOR (2025)

As formulações dos Testes 1, 4 e 5 atingiram o objetivo de absorção de água (igual ou menor que 20%), porém as formulações 4 e 5 apresentaram aumentos significativo na retração da peça (maior que 0,1%). Desta forma, apenas a formulação sugerida pelo DOE (Teste 1) teve um resultado satisfatório, que foi de 19,95% de absorção, na qual está dentro do objetivo específico, porém próximo do limite imposto pelo trabalho. A retração do teste 1 subiu um pouco, porém é uma diferença aceitável e não vai prejudicar o produto. Além disso, calculou-se o custo da massa do teste 1 e, essa obteve uma redução de 0,6%, ou seja, atende a meta específica de custo também.

Como a formulação do Teste 1 atendeu a todos os objetivos estabelecidos, decidiu-se avançar com essa formulação para a etapa de teste semi-industrial. Observou-se uma grande dificuldade em alcançar resultados satisfatórios utilizando apenas as matérias-primas da formulação original, pois somente uma das composições atingiu o objetivo, e mesmo assim com valores muito próximos do limite.

O CRC, laboratório responsável pela consultoria técnica da empresa, também desenvolveu algumas formulações seguindo uma abordagem distinta. A proposta consistiu em aumentar a quantidade de argilas na massa, visando melhorar a compactação e, conseqüentemente, elevar a DAP, o que reduziria a quantidade de poros iniciais e, assim, diminuiria a absorção de água. Para aprimorar ainda mais a compactação, foi incluída uma matéria-prima adicional a bentonita, conhecida por sua elevada plasticidade. As formulações elaboradas pelo CRC estão apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 – FÓRMULAS CRC

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 6	Teste 7	Teste 8
MP2	Feldspato	6,7%	0,00%	0,00%	4,10%
MP3	Argila fundente	30,0%	42,40%	35,30%	30,00%
MP4	Caulim	8,3%	0,00%	0,00%	0,00%
MP5	Filito	12,0%	6,70%	11,10%	11,60%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	11,50%	11,50%	11,50%
MP7	Quebra Crua	4,0%	4,00%	4,00%	4,00%
MP9	Argila refrataria	18,9%	18,10%	21,00%	21,00%
MP14	Calcita	14,6%	15,30%	15,30%	16,00%
MP13	Bentonita	0,0%	2,00%	1,80%	1,80%

FONTE: O AUTOR (2025)

Todas as formulações foram preparadas e submetidas aos testes de absorção e retração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – RESULTADOS FORMULAÇÃO CRC

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m ³)	Conclusão
Atual	21,22	0,42	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 6	20,15	0,42	1,95	Absorção maior que o objetivo
Teste 7	20,43	0,47	1,92	Absorção maior que o objetivo
Teste 8	20,51	0,44	1,93	Absorção maior que o objetivo

FONTE: O AUTOR (2025)

Nenhum dos resultados obtidos apresentou desempenho satisfatório para que essas formulações pudessem avançar para as etapas seguintes. Além disso, constatou-se que, mesmo com a melhora na compactação (aumento da DAP), não houve o ganho necessário na redução da absorção de água.

Diante disso, o CRC desenvolveu uma nova série de formulações para avaliação. Nesta etapa, o foco passou a ser o aumento da fundência, mantendo simultaneamente a melhoria na compactação, com o objetivo de controlar a retração. As novas formulações estão apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6 – FÓRMULAS CRC 2

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 9	Teste 10	Teste 11
MP2	Feldspato	6,7%	15,00%	15,00%	15,00%
MP3	Argila fundente	30,0%	23,70%	21,70%	19,70%
MP4	Caulim	8,3%	0,00%	0,00%	0,00%
MP5	Filito	12,0%	18,00%	18,00%	18,00%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	9,30%	9,30%	9,30%
MP7	Quebra Crua	4,0%	3,50%	3,50%	3,50%
MP9	Argila refrataria	18,9%	14,50%	16,00%	17,50%
MP14	Calcita	14,6%	13,00%	13,50%	14,00%
MP13	Bentonita	0,0%	3,00%	3,00%	3,00%

FONTE: O AUTOR (2025)

Todas as formulações foram preparadas e submetidas aos testes de absorção e retração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 – RESULTADOS FORMULAÇÃO CRC 2

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m ³)	Conclusão
Atual	20,75	0,43	1,89	Absorção maior que o objetivo
Teste 9	19,77	0,45	1,94	Absorção atingiu o objetivo
Teste 10	20,15	0,41	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 11	20,43	0,37	1,91	Absorção maior que o objetivo

FONTE: O AUTOR (2025)

A formulação do Teste 9 conseguiu combinar uma boa compactação (elevada DAP) com adequada fundência das matérias-primas, resultando em um desempenho satisfatório de absorção de água (19,77%) e em uma variação mínima de retração (0,02%). Além disso, o custo dessa formulação apresentou um acréscimo de apenas 3,6% em relação à composição atual, permanecendo dentro do objetivo estabelecido (até 20% de aumento). Dessa forma, decidiu-se avançar com a formulação do Teste 9 para a etapa de testes semi-industrial.

A empresa Safira também desenvolveu algumas formulações. Por se tratar de um laboratório que representa também empresas mineradoras, foram incluídas matérias-primas com as quais possuem vínculos comerciais. A Tabela 8 apresenta as formulações elaboradas pela Safira.

TABELA 8 – FÓRMULAS SAFIRA

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 12	Teste 13	Teste 14
MP2	Feldspato	6,7%	16,70%	14,70%	12,70%
MP3	Argila fundente	30,0%	0,00%	0,00%	0,00%
MP4	Caulim	8,3%	0,00%	0,00%	0,00%
MP5	Filito	12,0%	0,00%	0,00%	0,00%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	10,00%	10,00%	10,00%
MP7	Quebra Crua	4,0%	4,30%	6,30%	8,30%
MP9	Argila refrataria	18,9%	13,00%	13,00%	13,00%
MP14	Calcita	14,6%	11,00%	13,00%	15,00%
MP8	Argila fundente	0,0%	22,0%	20,00%	18,00%
MP15	Argila fundente	0,0%	13,0%	13,00%	13,00%
MP16	Anortozito	0,0%	10,0%	10,00%	10,00%

FONTE: O AUTOR (2025)

Todas as formulações foram preparadas e submetidas aos testes de absorção e retração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 - RESULTADO FÓRMULA DA SAFIRA

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m ³)	Conclusão
Atual	20,83	0,41	1,89	Absorção maior que o objetivo
Teste 12	19,23	0,58	1,91	Retração elevada
Teste 13	19,35	0,43	1,90	Absorção atingiu o objetivo
Teste 14	20,45	0,36	1,91	Absorção maior que o objetivo

FONTE: O AUTOR (2025)

Duas formulações apresentaram bons resultados de absorção de água (Testes 12 e 13); entretanto, ao analisar a retração, apenas o Teste 13 atingiu o objetivo de manter a absorção de água baixa sem aumentar a retração.

A formulação do Teste 13 apresentou o melhor desempenho de todas as composições testadas até o momento no estudo. No entanto, ao avaliar o custo dessa formulação, verificou-se que ele ultrapassa significativamente o limite estabelecido para o projeto, apresentando um acréscimo de 76%. Esse aumento expressivo deve-se às matérias-primas MP15 e MP16, cujo custo elevado é consequência da localização no Rio Grande do Sul, o que encarece consideravelmente o frete.

Considerando que o Teste 13 apresentou o melhor resultado encontrado, foram extraídos alguns conceitos dessa formulação, retirando-se as matérias-primas MP15 e

MP16. Dessa abordagem surgiram os Testes 15 e 16, cujas formulações estão apresentadas na Tabela 10.

TABELA 10 – FÓRMULAS COM BASE NA FÓRMULA SAFIRA

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 13	Teste 15	Teste 16
MP2	Feldspato	6,7%	14,70%	17,60%	14,70%
MP3	Argila fundente	30,0%	0,00%	10,00%	5,00%
MP4	Caulim	8,3%	0,00%	0,00%	0,00%
MP5	Filito	12,0%	0,00%	0,00%	5,00%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	10,00%	6,00%	10,00%
MP7	Quebra Crua	4,0%	6,30%	10,20%	6,30%
MP9	Argila refrataria	18,9%	13,00%	21,00%	13,00%
MP14	Calcita	14,6%	13,00%	13,20%	13,00%
MP8	Argila fundente	0,0%	20,00%	22,00%	33,00%
MP15	Argila fundente	0,0%	13,00%	0,00%	0,00%
MP16	Anortozito	0,0%	10,00%	0,00%	0,00%

FONTE: O AUTOR (2025)

Todas as formulações foram preparadas e submetidas aos testes de absorção e retração, cujos resultados estão apresentados na Tabela 11.

TABELA 11 - RESULTADO COM BASE NA FÓRMULA SAFIRA

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m ³)	Conclusão
Atual	20,83	0,42	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 15	19,41	0,41	1,91	Absorção atingiu o objetivo
Teste 16	20,05	0,43	1,90	Absorção maior que o objetivo

FONTE: O AUTOR (2025)

A formulação 15 apresentou resultados satisfatórios em termos de absorção de água e retração. O custo dessa composição ficou 5% acima da formulação atual, permanecendo dentro dos objetivos específicos estabelecidos. Dessa forma, decidiu-se avançar com a formulação 15 para a etapa de teste semi-industrial.

3.4.5.2. Resultados dos testes semi-industrial

Para os testes semi-industriais, foram utilizadas as três formulações aprovadas na etapa anterior (laboratório), sendo cada uma preparada em um moinho industrial para simular de forma mais precisa as condições de moagem do processo de fabricação, superando a representatividade da moagem em escala laboratorial. Todas as formulações utilizadas estão apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12 – FORMULAÇÕES PARA TESTE SEMI-INDUSTRIAL

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 1	Teste 9	Teste 15
MP2	Feldspato	6,7%	8,4%	15,0%	17,6%
MP3	Argila fundente	30,0%	33,6%	23,7%	10,0%
MP4	Caulim	8,3%	7,5%	0,0%	0,0%
MP5	Filito	12,0%	10,0%	18,0%	0,0%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	5,3%	9,3%	6,0%
MP7	Quebra Crua	4,0%	4,4%	3,5%	10,2%
MP9	Argila refrataria	18,9%	17,0%	14,5%	21,0%
MP14	Calcita	14,6%	13,8%	13,0%	13,2%
MP13	Bentonita	0,0%	0,0%	3,0%	0,0%
MP8	Argila fundente	0,0%	0,0%	0,0%	22,0%

FONTE: O AUTOR (2025)

Após o preparo da massa de todas as formulações, procedeu-se à confecção dos corpos de prova e à execução dos ensaios correspondentes, cujos resultados estão apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 – RESULTADOS FORMULAÇÕES SEMI-INDUSTRIAL

Fórmula	Absorção de água (%)	Retração (%)	DAP (kg/m ³)	Conclusão
Atual	21,00	0,42	1,90	Absorção maior que o objetivo
Teste 1	20,25	0,40	1,91	Absorção maior que o objetivo
Teste 9	19,87	0,41	1,95	Absorção atingiu o objetivo
Teste 15	19,40	0,42	1,91	Absorção atingiu o objetivo

FONTE: O AUTOR (2025)

A fórmula 1 não apresentou o mesmo desempenho observado na etapa de laboratório, registrando uma absorção de água de 20,25%, acima do valor objetivo. O

Teste 1 foi repetido para assegurar que não houve erro no processo, e o resultado se manteve; dessa forma, essa formulação foi eliminada. As fórmulas 9 e 15 apresentaram resultados satisfatórios tanto em relação à absorção quanto à retração.

3.4.5.3. Resultados dos testes industriais pequena

As duas fórmulas que avançaram para a etapa semi-industrial foram preparadas e processadas no ambiente industrial, a fim de verificar como ficaria o produto final confeccionado com essas massas. As duas formulações utilizadas estão apresentadas na Tabela 14.

TABELA 14 – FORMULAÇÕES

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 9	Teste 15
MP2	Feldspato	6,7%	15,0%	17,6%
MP3	Argila fundente	30,0%	23,7%	10,0%
MP4	Caulim	8,3%	0,0%	0,0%
MP5	Filito	12,0%	18,0%	0,0%
MP6	Quebra Queimada	5,5%	9,3%	6,0%
MP7	Quebra Crua	4,0%	3,5%	10,2%
MP9	Argila refrataria	18,9%	14,5%	21,0%
MP14	Calcita	14,6%	13,0%	13,2%
MP13	Bentonita	0,0%	3,0%	0,0%
MP8	Argila fundente	0,0%	0,0%	22,0%

FONTE: O AUTOR (2025)

As formulações foram preparadas e prensadas no formato 33x60, etapa em que as peças também foram esmaltadas para avaliar a interação da massa com os esmaltes e verificar se essas massas poderiam gerar algum defeito (efeito colateral) no produto acabado.

Assim, além da avaliação da DAP, absorção de água e retração, foram analisadas a dilatação das massas, a curvatura do produto final, o gretamento e a qualidade classificada do produto, cujos resultados estão apresentados na Tabela 15.

TABELA 15 – RESULTADOS PROVA INDUSTRIAL

Ensaio	Padrão	Teste 9	Teste 15
Absorção de água (%)	20,50	20,07	18,90
Retração (%)	0,41	0,40	0,43
DAP (kg/m ³)	1,99	2,01	1,99
Gretamento	Não gretou	Não gretou	Gretou 1 peça de 5
Dilatação da massa (x10 ⁻⁷ °C ⁻¹)	65,00	64,50	60,50
Curvatura lado maior (mm)	1,54	1,63	1,84
Curvatura lado menor (mm)	0,09	0,08	0,11
Qualidade (%)	95,7%	95,4%	95,6%

FONTE: O AUTOR (2025)

A massa do teste 9, que já vinha apresentando resultados próximos ao limite (20%), acabou apresentando um resultado insatisfatório. Esse não atingimento da meta foi associado ao ganho de DAP, que não foi tão expressivo nessa etapa quanto nas anteriores.

A massa teste 15 apresentou um excelente resultado em relação à absorção de água (1,1% abaixo da meta) e conseguiu manter a retração muito próxima ao padrão. Entretanto, identificou-se um problema que não havia sido percebido nas etapas anteriores: a interação entre a massa e os esmaltes. Essas interações geraram uma peça reprovada no ensaio de gretamento, que simula o “envelhecimento” das peças. Dessa forma, a massa não pôde ser aprovada, pois esse é um ensaio normativo que desclassifica o produto.

A ocorrência de gretamento foi associada à diferença de dilatação da massa teste em comparação com a massa padrão. Contudo, como o resultado em absorção foi muito bom, decidiu-se tentar um ajuste na dilatação dessa massa, dando origem à formulação 15/2.

Para chegar à formulação teste 15/2, foi realizada inicialmente uma reunião com os setores da fábrica, na qual a formulação 15 e seus resultados foram apresentados. Nessa reunião, alguns pontos foram levantados para ajuste da formulação, tais como:

1. Quantidade de quebra cru: o setor de controle de produção avaliou os últimos meses do processo e tivemos uma grande redução na quebra crua gerada pela fábrica, onde o setor indicou que um limite de usa para essa quebra crua de 5%;
2. Caulim: na formulação 15 não utilizamos o caulim, porém a gerencia técnica achou necessário utilizar uma quantidade mínima (3%) dessa matéria-prima, uma

vez que, essa é um resíduo do processo de retirada do feldspato e não teria outro destino.

Então, foi buscado um ajuste na formulação 15, levando em consideração os dois pontos levantados e a necessidade de corrigir a dilatação.

O primeiro ajuste consistiu na redução de 5,2% da quebra crua, uma alteração de fácil execução, já que a quebra crua possui as mesmas características da massa final. Assim, retiraram-se 5,2% da quebra crua e esse percentual foi redistribuído proporcionalmente entre as demais matérias-primas.

Posteriormente, foram adicionados 3% de caulim à formulação. Para isso, reduziu-se o percentual da argila refratária, que voltou ao mesmo nível presente na formulação 15. Além disso, retiraram-se 1,9% proporcionalmente das demais matérias-primas, completando os 3% destinados ao caulim.

A última etapa foi o ajuste da dilatação. A adição de caulim contribuiu parcialmente para esse ajuste; entretanto, também foi necessária uma redução na argila fundente MP8, compensada com ajustes na argila fundente MP3, no feldspato e na quebra queimada.

Dessa forma, a formulação 15/2 ficou conforme apresentada na Tabela 16

TABELA 16 – FORMULAÇÕES

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 15	Teste 15/2
MP2	Feldspato	6,70%	17,60%	18,50%
MP3	Argila fundente	30,00%	10,00%	11,00%
MP4	Caulim	8,30%	0,00%	3,00%
MP5	Filito	12,00%	0,00%	0,00%
MP6	Quebra Queimada	5,50%	6,00%	8,00%
MP7	Quebra Crua	4,00%	10,20%	5,00%
MP9	Argila refrataria	18,90%	21,00%	21,00%
MP14	Calcita	14,60%	13,20%	13,50%
MP8	Argila fundente	0,00%	22,00%	20,00%

FONTES: O AUTOR (2025)

Como os ajustes não foram tão significativos, decidiu-se testar essa formulação em uma pequena escala industrial, sem a necessidade de realizar previamente um teste de laboratório ou semi-industrial. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

TABELA 17 – RESULTADOS TESTE EM ESCALA INDUSTRIAL

Ensaio	Padrão	Teste 15/2
Absorção de água (%)	20,62	19,15
Retração (%)	0,40	0,42
DAP (kg/m³)	1,99	1,99
Gretamento	Não gretou	Não gretou
Dilatação da massa (x10⁻⁷ °C⁻¹)	65,00	65,30
Curvatura lado maior (mm)	1,47	1,42
Curvatura lado menor (mm)	0,08	0,10
Qualidade (%)	94,3%	94,5%

FONTE: O AUTOR (2025)

A absorção do teste 15/2 aumentou ligeiramente em relação ao teste 15 (um aumento de 0,25%); entretanto, continua sendo um ótimo resultado diante da meta, que é igual ou inferior a 20%. Além disso, a retração se manteve, as DAP de ambas as massas ficaram iguais e as curvaturas apresentaram valores muito próximos. O gretamento, que havia sido um problema na formulação 15, não voltou a ocorrer na formulação 15/2, em razão da dilatação da massa ter ficado mais próxima da desejada. A qualidade também não apresentou mudanças significativas, indicando que a massa não gerou defeitos decorrentes de algum efeito colateral.

Como foram realizados alguns ajustes nessa massa, o cálculo de custo foi refeito, resultando em um valor 13% superior ao padrão, ainda dentro da meta específica de até 20%. O custo ficou mais elevado do que o da formulação 15, pois a retirada da quebra crua — matéria-prima de reaproveitamento, com custo zero — impactou diretamente no custo final.

3.4.5.4. Resultados dos testes industriais

A fórmula 15/2, que apresentou um bom resultado no teste industrial em pequena escala, foi ampliada, realizando-se 8 horas de produção com essa massa, o que permitiu testar a estabilidade da formulação durante o processo produtivo. A fórmula do teste 15/2 está apresentada na Tabela 18.

TABELA 18 – FORMULAÇÕES

MP	Tipo de MP	Fórmula Atual	Teste 15/2
MP2	Feldspato	6,70%	18,50%
MP3	Argila fundente	30,00%	11,00%
MP4	Caulim	8,30%	3,00%
MP5	Filito	12,00%	0,00%
MP6	Quebra Queimada	5,50%	8,00%
MP7	Quebra Crua	4,00%	5,00%
MP9	Argila refrataria	18,90%	21,00%
MP14	Calcita	14,60%	13,50%
MP8	Argila fundente	0,00%	20,00%

FONTA: O AUTOR (2025)

Para esse teste, foi realizada a avaliação da dilatação e do gretamento de algumas peças selecionadas no meio da produção, cujos resultados estão apresentados na Tabela19.

TABELA 19 – DILATAÇÃO E GRETAMENTO

Ensaio	Padrão	Teste 15
Gretamento	Não gretou	Não gretou
Dilatação da massa ($\times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	65,1	65,3

FONTA: O AUTOR (2025)

Além disso, foram avaliadas a absorção de água, retração, DAP e curvatura a cada hora de produção, conforme os resultados apresentados na Tabela 20.

TABELA 20 – CONTROLE DOS PARÂMETROS

Ensaio	Padrão	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h
Absorção de água (%)	20,47	19,07	19,13	19,17	19,11	19,2	19,06	19,17	19,14
Retração (%)	0,41	0,42	0,43	0,43	0,42	0,43	0,42	0,43	0,41
DAP (kg/m^3)	1,99	1,99	1,98	1,99	1,99	1,99	1,98	1,99	1,99
Curvatura lado maior (mm)	1,51	1,47	1,44	1,42	1,45	1,4	1,39	1,53	1,57
Curvatura lado menor (mm)	0,08	0,11	0,13	0,09	0,15	0,12	0,07	0,12	0,1
Qualidade (%)	94,90%	95,33%	95,00%	94,43%	95,20%	94,80%	95,22%	94,67%	95,50%

FONTA: O AUTOR (2025)

A absorção, que é o foco principal deste trabalho, permaneceu 0,8% abaixo do limite durante as 8 horas de produção com a massa teste, demonstrando boa estabilidade. Além disso, a retração, DAP e curvatura mantiveram-se próximas ao padrão atual da massa. A qualidade não apresentou variações, indicando que nenhum defeito proveniente da massa surgiu durante a prova.

3.4.6. Descrição do plano de ação

Após a obtenção de uma formulação aprovada, existem algumas ações necessárias para iniciar a produção com essa nova formulação. A primeira ação consiste em cadastrar a nova formulação no sistema, permitindo que o setor de preparação de massa a utilize para elaborar as cargas e que os setores de controle de processo possam utilizá-la para precificar os produtos.

Das oito matérias-primas atualmente utilizadas, a nova formulação emprega sete delas e uma nova argila, que até então não era utilizada nesta fábrica. Portanto, é necessário consumir o estoque da matéria-prima que deixou de ser utilizada (filito) e trazer cargas da nova argila para preencher um box de matéria-prima. Abaixo segue tabela com as ações:

TABELA 21 - PLANO DE AÇÃO – 5W 2H

Causa Fundamental	Solução selecionada a ser implantada	5W 2H							
		Atividade	Who	When	Why	Where	How	How Much	Status
Causa Geral	Alteração na formulação	Cadastrar nova formulação na balança de carga	Eduardo	18/11/2025	Para poder produzir com nova formula	Incepa	Computador da balança	sem custo	Concluída
		Consumir todo o estoque de filito que não será utilizado na nova formulação	Preparação de massa	15/03/2026	Para consumir estoque	Incepa	Produzindo	sem custo	Em andamento
		Trazer carga para encher um box com a argila fundente MP8 que não era utilizada na formulação	Preparação de massa	15/03/2026	Para poder produzir com nova formula	Incepa	Logística de insumos	sem custo	Em andamento

FONTE: O AUTOR (2025)

3.4.7. Descrição do Atingimento

Conforme apresentado anteriormente, procedeu-se à implementação da nova formulação de massa por um período de uma semana, com o objetivo de avaliar o desempenho do produto e verificar a estabilidade do processo produtivo após a modificação proposta.

Para a verificação do atingimento da meta relacionada à absorção de água, foram realizados ensaios de absorção de água com frequência de seis horas de produção, ao longo do período de acompanhamento. Os resultados obtidos encontram-se consolidados na tabela abaixo:

TABELA 22 – RESULTADO DE ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Horário	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
AA% 6h	19,23	18,99	19,20	18,98	19,19	19,11	19,08
AA% 12h	19,16	19,04	19,06	19	19,17	19,03	19,15
AA% 18h	19,14	19,06	19,05	18,99	19,22	19,08	19,08
AA% 24h	19,15	19,03	19,05	19,03	19,18	19,05	19,13
Média do dia	19,17	19,03	19,09	19	19,19	19,07	19,11

FONTE: O AUTOR (2026)

A análise dos resultados obtidos durante a semana de produção evidencia que a primeira meta específica, referente ao atendimento ao requisito de absorção de água inferior a 20%, foi atingida, demonstrando a eficácia da nova formulação no atendimento aos critérios de desempenho estabelecidos.

No que se refere à segunda meta específica, que estabelecia como restrição o aumento máximo de 20% no custo da formulação da massa, foi realizado o cálculo do custo final da nova formulação. Verificou-se que o custo da nova massa foi de R\$ 94,90/t, enquanto a formulação padrão apresentava custo de R\$ 84,08/t. Dessa forma, constatou-se um acréscimo aproximado de 13% no custo, permanecendo dentro do limite definido, o que caracteriza o atingimento da meta econômica estabelecida. Os cálculos detalhados dos custos associados às formulações estão apresentados na tabela abaixo.

TABELA 23 – CÁLCULO DOS CUSTOS

MP	Tipo de MP	Custo (R\$/t)	Massa padrão	Custo massa padrão	Massa nova	Custo massa nova
MP1	Argila	76,08	0,0%	0,00	0,0%	0
MP2	Feldspato	95,20	6,70%	6,38	18,50%	17,61
MP3	Argila	76,08	30,00%	22,83	11,00%	8,37
MP4	Caulim	54,20	8,30%	4,50	3,00%	1,63
MP5	Filito	80,82	12,0%	9,70	0,0%	0,00
MP6	Quebra Queimada	0,00	5,50%	0,00	8,00%	0,00
MP7	Quebra Crua	0,00	4,00%	0,00	5,00%	0,00
MP8	Argila	135,00	0,00%	0,00	20,00%	27,00
MP9	Argila	76,17	18,90%	14,40	21,00%	16,00
MP10	Talco	119,62	0,0%	0,00	0,0%	0,00
MP11	Feldspato	129,90	0,0%	0,00	0,0%	0,00
MP12	Argila	136,45	0,0%	0,00	0,0%	0,00
MP13	Argila	192,30	0,0%	0,00	0,0%	0,00
MP14	Calcita	180	14,60%	26,28	13,50%	24,30
		Valor da massa padrão (R\$/t)		84,08	Valor massa nova (R\$/t)	94,90

FONTE: O AUTOR (2026)

3.5. FASE CONTROLAR (CONTROL)

3.5.1 Descrição do Alcance

A meta global foi atingida, uma vez que foi obtida uma massa com absorção inferior a 20%. Durante uma semana de produção com essa nova formulação, os valores registrados variaram entre 19% e 19,2%. A seguir, apresenta-se o resultado médio de cada dia acompanhado:

TABELA 24 – TABELA DE TESTE – RESULTADO MÉDIO DO PERÍODO AVALIADO

Ensaio	Padrão	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
Absorção de água (%)	20,43	19,17	19,03	19,09	19	19,19	19,07	19,11

FONTE: O AUTOR (2026)

Conforme comprovado no improve, a massa ficou 13% mais cara que a massa padrão e, como a massa representa 5% do custo final do produto, tem-se um aumento de 0,65% no custo do produto, o que é abaixo da meta global imposta pela empresa (1%).

3.5.2 Descrição do Retorno

O ganho financeiro obtido no primeiro momento é a manutenção dos clientes do mercado americano, uma vez que, nosso produto com a massa nova passa a atender todos os requisitos da norma americana. No ano de 2025 alguns clientes do mercado americano sinalizaram que encerrariam as compras com a empresa devido ao produto não estar atingindo os requisitos normativos do país (EUA) e com essa mudança não correremos mais esse risco.

O setor de PCP fez uma análise do que temos planejado para produzir no primeiro trimestre de 2026 e o mercado americano representa 33% da produção atual dessa fábrica, esse valor caiu em relação ao ano passado que começamos o projeto (65%) devido a taxação dos EUA, porém ainda segue representando uma porcentagem importante da produção dessa fábrica. Além desse ganho imediato, como passamos a ter um produto que atende a todos os requisitos do mercado americano, temos uma potencial abertura de novos clientes, principalmente de outsourcing.

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh (2001), projetos Seis Sigma não se limitam exclusivamente à redução de custos, podendo também estar direcionados à proteção de receita, retenção de clientes e fortalecimento estratégico do negócio.

Dessa forma, o projeto apresenta caráter preventivo e estratégico, uma vez que atua na mitigação do risco de perda de um cliente internacional relevante. Conforme destacado por George (2003), ganhos financeiros em projetos Lean Six Sigma podem ser classificados como ganhos tangíveis e intangíveis, sendo estes últimos associados à fidelização de clientes, aumento de competitividade e acesso a novos mercados.

Os benefícios financeiros decorrentes deste projeto são considerados intangíveis e de longo prazo, pois:

- Contribuem para a manutenção da carteira atual de clientes americanos;
- Reduzem o risco de perda de receita futura por não atendimento regulatório;
- Possibilitam a expansão para novos clientes no mercado americano, a partir da conformidade normativa;
- Agregam valor estratégico ao posicionamento da empresa no mercado internacional.

De acordo com Werkema (2012), projetos com foco em revenue protection e cost avoidance geram impacto financeiro indireto relevante, ainda que não mensurável imediatamente. Assim, mesmo sem evidência de ganho financeiro direto no curto prazo, o projeto demonstra valor econômico sustentável, alinhado à estratégia de crescimento e permanência no mercado internacional.

3.5.3 Descrição do Padrão e Pessoas envolvidas

No que se refere ao padrão operacional e as pessoas envolvidas no processo, não houve alteração nos procedimentos de controle da empresa em decorrência da implementação do projeto.

A mudança realizada limitou-se exclusivamente à formulação da massa, com o estabelecimento de uma nova formulação, mantendo-se inalteradas as etapas do processo, os métodos de controle, os critérios de aceitação e os procedimentos operacionais existentes.

A alteração da formulação foi devidamente comunicada à equipe operacional, sendo realizada a atualização do parâmetro de formulação diretamente na balança de dosagem. Considerando que não houve modificação nos procedimentos operacionais, instruções de trabalho ou métodos de controle, não se fez necessária a realização de treinamento formal, uma vez que as atividades executadas pelos colaboradores permaneceram as mesmas.

Dessa forma, o controle do processo foi mantido, assegurando a padronização operacional e a continuidade do atendimento aos requisitos internos e normativos, conforme preconizado na fase Control do método DMAIC.

3.5.4 Descrição de Monitoramento

No que se refere ao monitoramento do processo, não houve a definição de novas variáveis de processo a serem acompanhadas, uma vez que o projeto não promoveu alterações no fluxo produtivo, nas etapas operacionais ou nos métodos de controle existentes, limitando-se à alteração da formulação da massa.

Dessa forma, foram mantidos os controles já estabelecidos na fábrica, considerados adequados e eficazes para assegurar a estabilidade do processo produtivo. Para o produto final, permanece o monitoramento da absorção de água,

conforme os critérios e métodos definidos na norma aplicável a indústria cerâmica, garantindo a conformidade do produto após a implementação da nova formulação.

Essa abordagem assegura a sustentabilidade dos resultados obtidos, em conformidade com os princípios da fase Control do método DMAIC.

3.5.5 Descrição de Aprendizado

Durante a condução do projeto, foi possível obter aprendizado técnico relevante, especialmente no que se refere a formulação de massas para a indústria cerâmica. Embora as formulações tenham sido inicialmente propostas pelo corpo técnico da empresa, a equipe do projeto adquiriu uma compreensão básica do papel de cada matéria-prima e de sua influência nas propriedades do produto final.

Além do aprendizado técnico, o projeto proporcionou o aprofundamento prático em ferramentas da metodologia Lean Six Sigma abordadas ao longo do curso. Essa ferramenta foi fundamental para o sucesso do projeto, uma vez que possibilitou o direcionamento assertivo das variáveis, indicando quais matérias-primas deveriam ter seus percentuais aumentados ou reduzidos na formulação.

Ao longo do trabalho, a equipe também consolidou o entendimento de que a aplicação estruturada da metodologia DMAIC, aliada ao uso adequado de ferramentas estatísticas, contribui de forma significativa para a redução do tempo de análise e solução de problemas, aumentando a eficiência e a assertividade na tomada de decisão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO MAPA DE RACIOCÍNIO

Após a aplicação da metodologia descrita, seguiu-se uma abordagem sistemática para identificar, analisar e resolver o problema de redução de absorção de água nas cerâmicas monoporosas. Portanto, neste tópico, constam todas as análises e resultados encontrados no projeto, seguindo todas as etapas da metodologia DMAIC.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo atingiu seu objetivo principal de reduzir a absorção de água em cerâmicas monoporosas para valores iguais ou inferiores a 20%, conforme exigido pela norma ANSI A137:2022. Por meio da aplicação sistemática da metodologia DMAIC, foi possível identificar que o ajuste na formulação da massa era a via mais eficaz para a melhoria do indicador sem comprometer a viabilidade financeira do negócio.

Os ensaios industriais comprovaram que a nova formulação (Teste 15/2) proporcionou uma absorção estável em torno de 19,1%, representando uma redução significativa em relação à média histórica anterior. Além disso, o impacto no custo final do produto foi de apenas 0,65%, respeitando a restrição de teto de 1% imposta pela organização. Tecnicamente, a correção da dilatação da massa foi um passo crítico para eliminar o problema de gretamento identificado durante os testes iniciais, garantindo a entrega de um produto final de alta qualidade.

As principais contribuições deste trabalho incluem a proteção de receita de um cliente estratégico responsável por 30% da produção e, o fortalecimento da imagem institucional da empresa no mercado norte-americano. O projeto demonstrou que a integração entre engenharia de materiais e ferramentas estatísticas do Seis Sigma é fundamental para a resolução de problemas complexos na indústria cerâmica. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a busca por novas matérias-primas ou otimizações de processo que permitam atingir os mesmos padrões normativos sem qualquer incremento no custo de formulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 13006: Placas cerâmicas — Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, 2020.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI A137.1: American National Standard Specifications for Ceramic Tile. Washington, D.C.: ANSI, 2017.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI A137.1:2022 – American National Standard Specifications for Ceramic Tile. Washington, D.C.: ANSI, 2022.

BRASSARD, Michael; FINN, Diane. The Memory Jogger II: A Pocket Guide of Tools for Continuous Improvement and Effective Planning. Methuen, MA: GOAL/QPC, 2002.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

CAMPOS, Vicente Falconi. TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês). 10. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014.

CARVALHO, M. M. de; PALADINI, E. P. (orgs.). Gestão da Qualidade: Teoria e Casos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

GEORGE, Michael L. Lean Six Sigma para serviços: Como utilizar a velocidade e a qualidade do Lean Six Sigma para melhorar o desempenho dos serviços e transações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

GEORGE, M. L. Lean Six Sigma for Service. New York: McGraw-Hill, 2003.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10545-3: Ceramic tiles – Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. Geneva, 1995.

JURAN, Joseph M. Juran na liderança pela qualidade: um guia para executivos. São Paulo: Pioneira, 1990.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. Introduction to Ceramics. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1976.

MIGUEL, Paulo A. Cauchick (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2021.

MONTGOMERY, D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

NORTON, F. H. Ceramics for the Artist Potter. Reading: Addison-Wesley, 1974.

OLIVEIRA, A. P. N. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. Cerâmica Industrial, v. 5, n. 6, p. 37-47, 2000.

OLIVEIRA, A. P. de N. Revestimentos cerâmicos: matérias-primas, processamento, características e propriedades. São Paulo: Editora Faenza, 2000.

PALADINI, Edson Pacheco. Gestão da Qualidade: teoria e prática. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. The Six Sigma Way. New York: McGraw-Hill, 2001.

PYZDEK, Thomas; KELLER, Paul. The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

RILEY, C. Principles of Ceramic Processing. New York: Wiley, 1997.

SILVA, J. F. et al. Aplicação de ferramentas de qualidade no controle de absorção de água em revestimentos cerâmicos. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 1-10, 2020.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. Administração da Produção. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

WERKEMA, C. Lean Seis Sigma: Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing. Belo Horizonte: Falconi, 2011.

WERKEMA, M. C. C. Criando a Cultura Seis Sigma. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

YANG, B. et al. Reducing Water Absorption and Improving Flexural Strength of Aluminosilicate Ceramics by MnO₂ Doping. Materials, v. 17, n. 11, 2024.

YANG, L.; ZHANG, X.; WANG, J.; LI, Q. Effect of MnO₂ addition on the microstructure and mechanical properties of porous ceramic tiles. Journal of Materials Research and Technology, v. 28, p. 11540–11548, 2024.

ZACCARON, A. et al. Utilização de vidro de garrafas para redução da absorção de água em produtos de cerâmica vermelha. Cerâmica Industrial, v. 21, n. 5-6, 2016.

ZACCARON, A.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M. Incorporation of recycled glass in ceramic formulations: effects on sintering and properties. Ceramics International, v. 42, n. 4, p. 5302–5308, 2016.

6 LISTA DE ANEXOS



**Projeto Lean Seis Sigma
Project charter**

Champion Responsável:	Samuel Ribeiro
Empresa:	Incepa Revestimentos Cerâmicos
Título do Projeto:	Redução de Absorção de Água em Produtos Monoporosos

Descrição do Problema/Oportunidade:
Atualmente, a produção de peças cerâmicas monoporosas apresenta uma taxa de absorção de água que varia entre 20% e 21,5%, dependendo do formato do produto. Embora a norma brasileira vigente ABNT NBR ISO 13006:2020 permita absorções acima de 20%, desde que essa informação seja declarada nos produtos, a norma americana ANSI A137:2022 estabelece limites mais restritivos, aceitando absorções de 10% até no máximo 20%.

Definição da Meta
Redução da absorção de água das peças cerâmicas para ≤ 20%, sem aumentar o custo do produto final em mais de 1%.

Avaliação do Histórico do Problema

Gráfico

Mês	Valor (%)
Jan	21.7
Fev	21.5
Mar	20.8
Abr	20.7
Mai	20.6
Jun	20.5
Jul	20.4
Ago	20.5
Sep	20.6
Out	20.7
Nov	20.8
Dez	21.0

Mês	Valor (%)
Jan	20.4
Fev	20.6
Mar	21.5
Abr	21.0
Mai	21.1
Jun	21.6

Conclusão
Em relação ao ano de 2024, apenas os meses de maio, agosto e setembro apresentaram valores de absorção abaixo de 20% para produtos monoporosos. Os demais meses ultrapassaram o limite máximo estabelecido pela norma americana ANSI A137:2022. A média anual foi de 20,35%. No ano de 2025, todos os meses analisados (janeiro a junho) registraram índices superiores a 20%, com média trimestral de 21,09%. Com base nos dados analisados, observa-se que a absorção de água em cerâmicas monoporosas tem apresentado desempenho acima do limite máximo de 20% estabelecido pela norma ANSI A137.1:2022 na maior parte dos períodos avaliados. Apesar de uma leve melhora no segundo semestre de 2024, os resultados de 2025 indicam um aumento consistente nos índices, com destaque para março e junho, que apresentaram os maiores valores registrados. Esses resultados reforçam a importância do desenvolvimento do projeto com o objetivo de reduzir a absorção de água para igual ou inferior à 20%, atender a exigência de clientes internacionais e estar em conformidade com normativas.

Restrições e Suposições
Não alterar a retração da peça;
Não alterar a qualidade dos produtos.
Não aumentar o custo do produto mais do que 1%.

Equipe de Trabalho

- 1 - Anna Regina Righi da Silva
- 2 - Camila Marcolin Marcon
- 3 - Eduardo Alexandre Ganassoli
- 4 - Luan Batista Peres de Abreu
- 5 - Luana de Souza Santos
- 6 - Solange Mielke

Cronograma Preliminar					
Define	30/06/25	Analyse	31/10/25	Control	28/11/25
Measure	10/10/25	Improve	14/11/25		

Samuel Ribeiro
Assinatura Champion

Eduardo Alexandre Ganassoli
Assinatura integrante equipe