

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

ANDRÉ DE ARAUJO FERREIRA

ANÁLISE DA CAPABILIDADE EM TESTES DE RESISTÊNCIA DE CORPOS DE
PROVA DE CONCRETO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO PESSOA

2019

ANDRÉ DE ARAUJO FERREIRA

**ANÁLISE DA CAPABILIDADE EM TESTES DE RESISTÊNCIA DE CORPOS DE
PROVA DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Coordenação do Curso de **Engenharia de Produção Mecânica** da Universidade Federal da Paraíba para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Produção Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Rogerio Santana Peruchi.

JOÃO PESSOA – PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F383a Ferreira, Andre de Araujo.

ANÁLISE DA CAPABILIDADE EM TESTES DE RESISTÊNCIA DE
CORPOS DE PROVA DE CONCRETO / Andre de Araujo Ferreira.

- João Pessoa, 2019.

49f. : il.

Orientação: Rogerio Santana Peruchi.

Monografia (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Controle estatístico do processo. 2. Cartas de
controle. 3. Capabilidade. 4. Variabilidade. 5.
Padronização. I. Peruchi, Rogerio Santana. II. Título.

UFPB/BC



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: André de Araujo Ferreira

Titulo do Trabalho: Análise da capacidade em testes de resistência de corpos de prova de concreto

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 07/05/2019 pela banca examinadora:

Orientador(a) - Prof. Dr. Roséris S. Peruchi

Departamento de Engenharia de Produção – CT/UFPB

Examinador(a) interno - Prof. Dr. Lígia O. F. Bessa

Departamento de Engenharia de Produção – CT/UFPB

Examinador(a) interno - Prof. Dr. Paulo Botela Junior

Departamento de Engenharia de Produção – CT/UFPB

AGRADECIMENTOS

Primeiro, quero agradecer a Deus, pois, sem ele nada sou e nada poderia fazer, inclusive este trabalho que desenvolvi. Agradeço a minha família, em especial meus pais, meu irmão e minha irmã, os quais também dedico este trabalho e tenho a certeza de que posso contar com eles para todas as adversidades da minha vida. Ainda neste parágrafo, agradeço a minha namorada, Yasmin, que sempre depositou sua confiança em mim e me ajudou nos momentos de dificuldade, quando eu pensei em desistir ou que eu não alcançaria meus resultados ela estava ao meu lado me apoiando.

Agradeço aos meus grandes amigos, Matheus Figueiredo, Matheus Scarano, Matheus Wanderley, Gustavo Deininger, Gustavo Brasileiro, Danilo Maia, Leonardo Araujo e Fabricio Onofre, são pessoas essenciais para minha vida, amigos de longas datas e me ajudam a levar a vida de uma maneira mais leve e descontraída, ademais, é essencial ao ser humano ter amigos assim, tão próximos como nossos irmãos.

Agradeço aos meus colegas de curso, Marcela, Milena, Juliana, Isabelle, João Carlos, Werner, Claudio e tantos outros que passaram a graduação ao meu lado, eles me ensinaram a persistir, a ter humildade e o espírito de companheirismo. Em especial agradeço ao meu colega de curso e padrinho, José Guilherme, passamos praticamente por todas as disciplinas da graduação estudando juntos, tenho certeza que sem ele ao meu lado, a graduação teria sido um fardo bem pesado.

Quero agradecer a Nathalia, uma grande amiga que me concedeu um estágio em sua empresa, sem ela eu não teria chegado até aqui e minha conclusão do curso seria dificultada, além de ser adiada, portanto, serei eternamente grato por isso.

Agradeço também aos professores do departamento de engenharia de produção da universidade federal da Paraíba, eles me ensinaram muito sobre a engenharia de produção, porém, mais que isso, ajudaram a formular meu caráter e a pensar como verdadeiro profissional. Dentro deste contexto, deixo um agradecimento especial ao professor Rogério, o qual sempre foi muito justo em suas avaliações, porém, sempre se dispôs a ajudar os alunos de maneira amigável, admiro muito seu caráter e o profissional que ele é, além disso, o mesmo foi responsável por despertar meu interesse na área da engenharia da qualidade, a qual tenho forte afinidade e predisposição a seguir.

“Façamos o nosso melhor. O restante Deus fará”

(Pe. Pio)

RESUMO

Não é novidade que no setor industrial o controle de processos seja prioridade em qualquer empresa, pois, processos que não possuem controle, incorrem em desperdícios e produtos com qualidade indesejada. Dessa forma, busca pela melhoria contínua deve ser incessante, pois, através dela a empresa garantirá a sobrevivência no mercado por meio da redução de desperdícios e padronização dos processos. O controle estatístico do processo é um forte aliado para elevar o nível competitivo das empresas, já que o mesmo utiliza uma metodologia embasada em ferramentas práticas e de simples implementação, buscando a melhoria contínua dos processos e otimizando tempo e custo de produção. Nessa perspectiva as cartas de controle são uma das mais importantes ferramentas do controle estatístico do processo. Elas possuem um embasamento estatístico sobre a análise dos dados e nos ajudam a visualizar comportamentos tendenciosos na variabilidade do processo. Além disso, é uma ferramenta de fácil aplicação despendendo pouco recurso para a empresa que optar em usá-las. As cartas de controle fornecem informações importantes a respeito dos limites de controle de um processo produtivo, cada variação fora do limite de controle deve ser estudada para ser sanada. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a capacidade de resistência de corpos de prova de concreto com cura de 7 dias, que foram retirados do processo produtivo de postes de concreto. A NBR5739/1993 determina que o concreto para esse tipo de produto deve ter no mínimo 25MPa de resistência à compressão. Portanto, o estudo verificou que o processo não estava adequado à norma regulamentadora e consequentemente classificou-o como fora de controle estatístico. Para dar suporte a essa classificação, foram calculados índices de capacidade do processo os quais facilitaram a interpretação dos dados. As causas de variação do processo foram analisadas e um plano de ação foi elaborado para minimizar o impacto das mesmas. As técnicas propostas pelo controle estatístico do processo foram eficazes para mostrar à empresa a importância de ter uma padronização do processo, com a menor variabilidade possível. Desse modo, eles conseguiriam planejar melhor a produção com relação ao consumo dos insumos do concreto, bem como conseguiriam diluir custos com a padronização do processo produtivo.

Palavras chave: controle estatístico do processo, cartas de controle, capacidade, variabilidade, padronização.

ABSTRACT

It is not new that in the industrial sector process control is a priority in any company, because processes that do not have control, incur waste and products with undesirable quality. The quest for continuous improvement must be unceasing because, through it, the company will ensure survival in the market by reducing waste and standardizing processes. Statistical control of the process is a strong ally to raise the competitive level of companies, since it uses a methodology based on practical tools and simple implementation, seeking the continuous improvement of processes, optimizing time and cost of production. At this way, control charts are one of the most important statistical control tools of the process. They have a statistical based on data analysis and help us to visualize biased behavior in the the variability of the process. Furthermore, it is an easy application tool with little recourse for the company that chooses to use them. Control charts provide important information regarding the control limits of a production process, each variation outside the control limit must be studied for healing. The main objective of this paper was to evaluate the strength of concrete specimens with curing of 7 days, which were removed from the productive process of concrete posts. NBR5739 / 1993 determines that concrete for this type of product must have a minimum of 25MPa compressive strength. So the study found that the process was not adequate to the regulatory standard and therefore classified it as out of statistical control. In order to support this classification, process capability indices were calculated which facilitated the interpretation of the data. The causes of process variation were analyzed and a plan of action was developed to minimize their impact. The techniques proposed by the statistical control of the process were effective in showing the company the importance of having a standardization of the process, with the lowest possible variability. At this way, they could better plan the production in relation to the consumption of the concrete inputs, as well as manage to dilute costs of standardizing the production process.

KEYWORDS: statistical process control, control charts, capability, variability, standardization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Causas aleatórias e especiais de variação-----	14
Figura 2 – Gráfico de controle -----	16
Figura 3 – Curva de distribuição normal -----	21
Figura 4 – Desvio padrão de uma distribuição normal -----	21
Figura 5 – Gráfico de probabilidade normal -----	23
Figura 6 – Método FMEA para priorização de ações de melhorias -----	29
Figura 7 – Modelo de PFMEA e suas etapas -----	30
Figura 8 - Diagrama 6M -----	33
Figura 9 – Cartas de controle \bar{x} e R do processo -----	36
Figura 10 – Cartas de controle \bar{x} e R do processo sem causas especiais-----	37
Figura 11 – Diagrama 6M da resistência do concreto -----	38
Figura 12 – Histograma de capacidade do concreto com cura de 7 dias-----	39
Figura 13 – Gráfico de probabilidade normal-----	40
Figura 14 – PFMEA do processo -----	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Cartas de Controle	15
2.1.1 Cartas de Controle para x e R	17
2.2 Distribuição de probabilidade normal	20
2.3 Gráficos de Probabilidade Normal	22
2.4 Análise de Capabilidade de Processos	24
2.5 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	27
3 MÉTODO PROPOSTO.....	30
3.1 Declaração do Problema.....	30
3.2 Planejamento da Coleta de Dados	31
3.3 Cálculo dos Limites de Controle Iniciais	31
3.4 Análise de Estabilidade do Processo	32
3.5 Análise de Capabilidade	33
3.6 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	34
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
4.1 Declaração do Problema.....	35
4.2 Planejamento da Coleta de Dados	35
4.3 Cálculo dos Limites de Controle Iniciais	35
4.4 Análise de Estabilidade do Processo	36
4.5 Análise de Capabilidade	39
4.6 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	41
5 CONCLUSÃO.....	43
Anexos.....	45
ANEXO A – Distribuição normal padrão acumulada.....	45

ANEXO B - Fatores para Construção de Gráficos de Controle para Variáveis	46
APENDICE	47
APÊNDICE A – Dados de resistência do concreto	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

Atualmente dois materiais estruturais são os mais utilizados: o concreto e o aço. Algumas vezes eles se complementam e, outras, competem entre si, de maneira que muitas estruturas de mesmo tipo e função podem ser construídas com qualquer um desses materiais. Ainda assim, as universidades e escolas de engenharia ensinam muito menos sobre concreto do que sobre o aço. Isso poderia não ser importante se, na prática, o engenheiro de campo não precisasse saber mais sobre concreto do que aço (Neville & Brooks, 2013).

A resistência à compressão tem importância tanto para si mesma bem como pela influência que ela exerce sobre outras propriedades. Ela dá uma percepção da qualidade do concreto, pois está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada. A resistência de um material pode ser definida como a capacidade de resistir a tensões sem ruptura. A ruptura pode ser identificada com aparecimento de fissuras. Nos ensaios de compressão, o corpo de prova pode ser considerado rompido mesmo sem ter fissuras aparentes externas, porém contém fissuras internas muito avançadas, sendo incapaz de suportar mais carga. (Mehta & Monteiro, 1994)

A construção civil, por muito tempo, considerou desperdícios e falhas na execução como elementos inclusos no processo, pois a obra desenvolve-se em um ambiente com muitas incertezas, variações do clima e rotatividade dos colaboradores. Porém o mercado está mudando e o consumidor exige produtos de qualidade e preço baixo. Para atender tais requisitos, o setor da construção civil (ou seja, não somente as obras de infraestrutura), teve que espelhar-se nas indústrias e buscar a melhoria contínua dos seus processos e produtos. Uma das formas é a busca de um controle mais rigoroso sobre o processo produtivo, que pode ser alcançado com a implementação de um sistema de controle da qualidade (Righi, 2009).

Qualidade é uma das palavras mais difundidas dentro do contexto da sociedade e das empresas (bem como produtividade, competitividade, integração, etc.), porém, o seu conceito ainda é um pouco confuso para alguns. A confusão na definição de qualidade existe por conta do subjetivismo que existe na palavra, além do uso da mesma para diversas situações. Para alguns, qualidade pode estar relacionada às características de um bem de consumo (um produto qualquer), quer seja o desempenho técnico desse bem, ou a durabilidade do mesmo. Nessa perspectiva, para bens de consumo semelhantes, a definição de maior qualidade para um em detrimento do outro será advinda de um desempenho técnico que se sobressaia. Para outras pessoas, qualidade se refere a capacidade que um produto tem

em atender as exigências do cliente, nesse caso, o produto de maior qualidade é aquele que se adapta a tais especificações com maior eficiência (Carpinetti, 2016).

As melhorias jamais serão mantidas e os resultados dos processos serão eternamente imprevisíveis sem um bom entendimento do que seja a padronização e de como transformá-la em realidade no dia-a-dia de uma organização. É muito comum ver nas empresas, as pessoas confundirem padrão com padronização, o que é muito ruim, uma vez que tão somente a elaboração de um padrão não caracteriza uma ação eficaz de domínio tecnológico (Arantes, 1998)

Um gráfico de controle é uma das técnicas principais dentro dos fundamentos do controle estatístico do processo (CEP). Esse gráfico nos fornece informações sobre as médias das amostras de uma característica da qualidade versus o tempo ou o número da amostra. O gráfico é composto por uma linha central (LC) que representa onde o processo deveria estar caso não houvesse fontes de variabilidade interferindo no processo, e os limites de controle, que são determinados através de cálculos estatísticos. Os gráficos de controle são aplicados, em geral, às variáveis de saída, porém, em alguns casos, podem ser aplicados às entradas (Montgomery, 2009).

De acordo com a AIAG (2005b), para prosperar no atual momento econômico, seja qual for o tipo de empresa em questão (setor automobilístico, distribuidores ou prestadores de serviço), as organizações devem estar comprometidas com a melhoria contínua dos processos. Deve-se buscar cada vez mais uma maneira de otimizar os processos e enxugar custos ao máximo. Porém, não basta focar em um processo enxuto e otimizado, pois, além disso, os produtos devem atender às especificações do cliente, seja ele interno ou externo, pois, se o produto não for aceito pelo cliente, de nada servirá um processo amplamente otimizado, ou seja, no final das contas a satisfação do cliente é a que prevalecerá.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a capacidade da resistência dos corpos de prova de concreto com cura de 7 dias, os quais são retirados do processo produtivo de postes de concreto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar se o processo está sob controle estatístico e definir uma distribuição de probabilidade que descreva o mesmo estatisticamente;

- Delimitar limites de controle para o processo produtivo, através de cálculos estatísticos;
- Identificar as potenciais causas de variação do processo e definir as causas-raiz do mesmo para serem eliminadas e recalcularmos os limites de controle;
- Análise da estabilidade e a capacidade do processo de produção do concreto com o auxílio das cartas de controle e dos índices de capacidade do processo;
- Elaborar planos de ação para sanar as causas que geram ineficiência no processo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Gonzalez & Werner (2009) no que diz respeito a variabilidade dos processos, podemos observar que existem duas classificações, são elas: estatisticamente sob controle ou fora de controle estatístico. Aquela, refere-se a o processo que possui apenas causas comuns (ou aleatórias) de variabilidade, já esta, apresenta além das causas comuns de variabilidade, causas especiais de variação.

Em outras palavras, (Montgomery, 2009) diz que, independentemente de qualquer que seja o processo produtivo, mesmo que o mesmo possua um controle rigoroso, haverá uma quantia de variabilidade inerente ou natural do processo. A variabilidade natural ou “ruído de fundo”, é causada pelo acúmulo de pequenos desvios no processo, os quais são denominados no controle estatístico da qualidade de “sistema estável de causas comuns”. Um sistema que possua apenas causas comuns de variação é classificado como sob controle estatístico, portanto, causas comuns são inerentes ao processo.

Outros tipos de variabilidade podem aparecer na saída de um processo, tal variabilidade pode ocorrer, em geral, através de três fontes: máquinas com ajustes ou controles inadequados, erros do operador ou matéria prima com defeito. Essa variabilidade é bem maior, se comparada com a de ruído de fundo, geralmente faz com que o processo obtenha níveis inaceitáveis de desempenho. Essa última variabilidade citada não faz parte do padrão de causas aleatórias e são denominadas como causas especiais de variação, no momento em que um processo possui causas especiais de variação, ele é classificado como fora de controle (Montgomery, 2009).

É comum que os processos de produção operem em estados sob controle estatístico durante um longo espaço de tempo, porém, é impossível que o processo seja estável para sempre. Por certo, causas especiais aparecerão sem que se perceba o seu surgimento, ocasionando um desvio do estado sob controle, para o estado fora de controle, fazendo com

que os produtos ou as saídas do processo não mais atendam as especificações do cliente ou do projeto (Montgomery, 2009). A figura 1 a seguir exemplifica como isso acontece no decorrer do tempo:

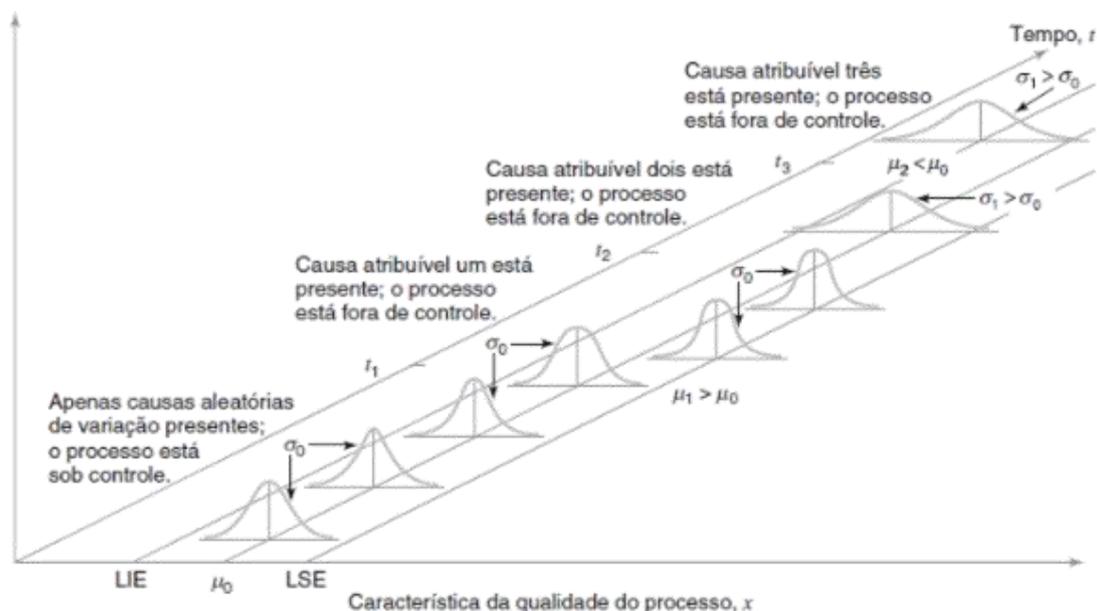


Figura 1- Causas aleatórias e especiais de variação

Fonte: adaptado de Montgomery (2011).

De modo análogo às causas aleatórias, de acordo com AIAG (2005a), essas causas são denominadas de causas comuns e são eventos que ocorrem com maior frequência dentro de um processo. Tais causas são responsáveis por caracterizar os processos com uma distribuição estável e repetitiva ao longo do tempo, ou seja, o sistema torna-se estável de causas prováveis ou previsível.

Também de modo análogo, porém, referindo-se às causas especiais, (AIAG, 2005a) denomina tais causas como causas especiais, são elas que causam variação e afetam apenas uma parte do resultado do processo. As causas especiais são caracterizadas por serem intermitentes e imprevisíveis, elas podem afetar o resultado de um processo inteiro, caso não sejam identificadas e sanadas, resultando em um processo que não será estável e provavelmente não atenderá as especificações do projeto ou do cliente.

Nem sempre as mudanças na distribuição de um processo que foram decorrentes de causas aleatórias são maléficas, elas também podem trazer benefícios para o processo, porém é necessário que as mudanças negativas sejam entendidas e eliminadas e que as positivas também sejam entendidas, mas ao invés de eliminadas, devem ser transformadas em uma parte permanente do processo (AIAG, 2005a).

2.1 Cartas de Controle

O controle estatístico do processo (CEP), busca detectar com maior agilidade as causas especiais que modificam as características do processo, fazendo com que a correção do mesmo seja acelerada e a sua investigação seja feita de uma maneira mais robusta e, tudo isso contribuirá para que o mínimo de saídas seja produzido por tal processo.

Uma das principais técnicas de monitoramento e controle do processo é a carta de controle, ela pode ser usada para estimar parâmetros de um processo produtivo e com isso determinar a capacidade do mesmo. Uma vantagem da técnica é que ela pode ser aplicada on-line, facilitando sua execução a qual será essencial para reduzir ao máximo a variabilidade dos processos (Montgomery, 2009).

Para ilustrar o que seria uma carta de controle e como ela ajuda a visualizar e controlar o processo, a figura 2 abaixo refere-se a uma característica da qualidade que foi medida *versus* o número da amostra ou o tempo. A linha central diz respeito a média da característica da qualidade e é a região que indica o estado sob controle do processo (aqui, apenas causas aleatórias atuam no processo). Além da linha central, podemos observar duas linhas horizontais, são elas o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC), caso o processo esteja sob controle, todos os pontos da amostra estarão dentro do intervalo dos mesmos, porém, caso algum ponto esteja fora dos limites de controle, é necessário que se faça uma avaliação do processo para corrigir e eliminar a causa atribuível daquele ponto que estiver em desconformidade. Uma boa prática na elaboração da carta de controle é unir os pontos das amostras para que a visualização seja facilitada (Montgomery, 2009).

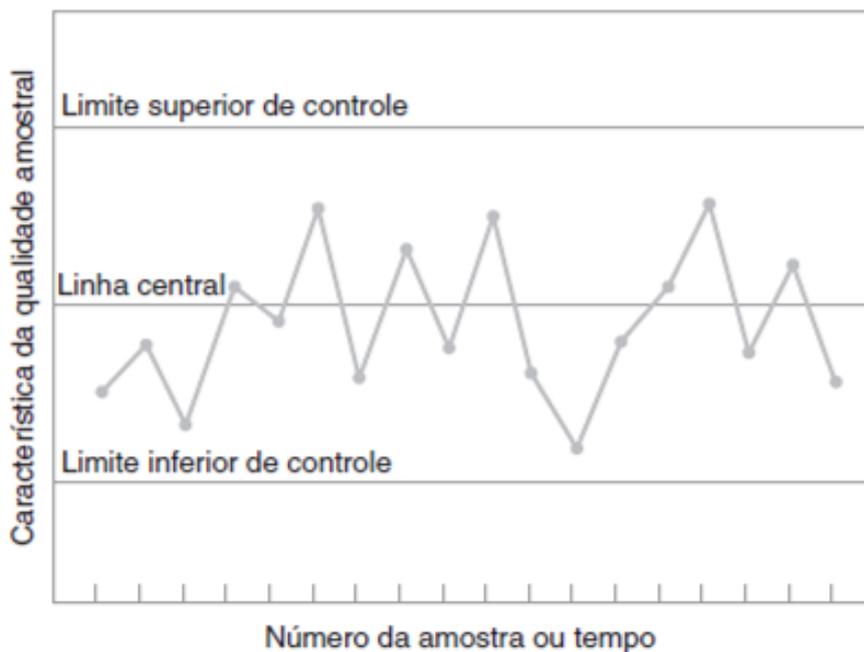


Figura 2 – Gráfico de controle

Fonte: adaptado de Montgomery (2011).

De acordo com Montgomery (2009), um modelo geral para um gráfico de controle pode ser descrito da seguinte maneira: seja “z” uma estatística amostral a qual mede uma característica da qualidade, suponhamos que sua média seja μ_z e que o desvio padrão seja σ_z , teremos a linha central, o limite superior e o limite inferior de controle, dados por:

$$LSC = \mu_z + L\sigma_z \quad (2.1.1)$$

$$LC = \mu_z \quad (2.1.2)$$

$$LIC = \mu_z - L\sigma_z \quad (2.1.3)$$

Onde “L” é a “distância” entre os limites de controle e a linha central, expressada em unidades de desvio padrão, tal teoria foi originalmente proposta por Walter S. Shewhart, portanto, os gráficos de controle que são feitos de acordo com os princípios supracitados, são comumente chamados de gráficos de controle de Shewhart.

Existem basicamente dois tipos de cartas de controle, as utilizadas em dados do tipo atributo e as utilizadas para dados do tipo variáveis. O processo produtivo é quem determina o tipo de carta que será usada. Para dados do tipo “aceitável/inaceitável”, “passa/não passa”, a carta para atributos será a usada, já se os dados forem derivados de natureza contínua (por

exemplo, peso, comprimento, temperatura) a carta que será usada vai ser a carta para variáveis. Cada tipo de carta possui combinações que podem ser usadas para melhor se adequar ao processo (AIAG, 2005a).

Os tipos mais comuns de cartas são as que incluem a análise de média (\bar{x}) e amplitude (R), as cartas para valores individuais (I), amplitude móvel (MR) e outras que pertencem à família das cartas para variáveis. As famílias de cartas do tipo atributo que são baseadas na contagem ou porcentagem, são elas: p, np, c, u (AIAG, 2005a).

Quando os dados das variáveis são disponibilizados, eles são sempre a prioridade de escolha, pois, os mesmos possuem informações mais relevantes do que os dados para atributos e exigem menor esforço, pois, uma amostra de dados do tipo atributo deve ter uma maior quantidade de dados para ter a mesma consistência e nível de confiança nos resultados que as amostras de dados do tipo variável (AIAG, 2005a).

2.1.1 Cartas de Controle para \bar{x} e R

Para todo e qualquer tipo de gráfico de controle, existem duas etapas para monitoramento da característica da qualidade analisada, as fases são conhecidas como fase I e fase II.

Na fase I para o gráfico de controle \bar{x} e R, são utilizadas amostras preliminares para construção dos gráficos e, portanto, os limites de controle nessa fase são chamados de limites de controle tentativos. Tais limites nos permitem analisar se o processo estava sob controle estatístico de acordo com os valores apresentados pelas amostras coletadas. Caso todos os pontos estiverem dentro dos limites de controle tentativos e não for observado nenhum tipo de comportamento sistêmico, podemos concluir que, no passado, o processo estava sob controle estatístico e os referidos limites que antes eram conhecidos como tentativos, passam a ser os limites de controle reais, tanto para o período atual, quanto para um período futuro (Montgomery, 2009).

Caso um ou mais valores da carta \bar{x} ou da carta R estiverem fora dos limites de controle tentativos, será necessária a revisão dos mesmos, pois isso revela que, para o processo em questão, podem existir causas especiais de variação que tornam o comportamento do processo anômalo, caso as causas sejam detectadas, elas precisam gerar um plano de ação que faça com que a inconformidade não torne a ocorrer no processo. Após a tratativa das causas, o ponto que foi encontrado, fora dos limites tentativos, será excluído e os limites serão recalculados usando apenas os pontos que restaram. Os pontos restantes

serão examinados através dos novos limites de controle que foram calculados, o processo é repetido até que nenhuma causa especial apareça na carta, encontrando assim o limite de controle usual (Montgomery, 2009).

Alguns casos de pontos fora dos limites de controle tentativos podem não possuir uma causa especial de variação, para esses casos, teremos duas soluções, a primeira é eliminar o ponto que está fora do limite de controle de modo análogo à uma causa especial de variação. Não existem justificativas analíticas para essa tratativa, a não ser pelo fato de que os pontos extra limites serem provenientes de uma distribuição de probabilidade que descreve um processo fora de controle. Outra alternativa é reter o ponto que se apresentou fora dos limites de controle e tomar os limites tentativos como adequados para uso atual do processo. Muito provavelmente se este ponto que foi retido tiver uma causa especial atrelada a ele, fará com que os limites de controle sejam abrangentes demais para o processo, porém, caso sejam apenas um ou dois pontos desse tipo, não resultará em grandes alterações no gráfico de controle. Caso as amostras futuras indiquem que o processo está sob controle, as amostras que foram citadas anteriormente podem ser seguramente descartadas. Para casos práticos, se ambos os gráficos apresentarem pontos fora de controle, é indicado que seja retirado primeiro o ponto da carta de amplitude (R), pois o mesmo representa um processo com variabilidade instável e limites de controle do gráfico de média (\bar{x}) que não são confiáveis, já que a carta de média exige uma estimativa de variabilidade do processo (Montgomery, 2009).

O uso de gráficos de controle requer uma revisão periódica dos limites de controle e linha central, essa periodicidade é definida de acordo com o que o processo pode fornecer de quantidade de amostras, já que o indicado é que se trabalhe com pelo menos 100 amostras e pelo menos 25 subgrupos, a periodicidade será dada em função da quantidade de tempo com que se obtém as informações derivadas das amostras (Montgomery, 2009).

A fase II é implementada quando os limites de controle são definidos na fase I, e a partir deles o gráfico de controle é usado para monitoramento da produção futura. Nessa fase é possível agir com maior eficiência sobre os pontos que saem dos limites de controle, já que as análises são feitas não mais em cima de dados do passado e sim de dados atuais, ou seja, quando uma causa especial aparece, o responsável pelo processo pode analisar se foi devido à alguma alteração feita no processo anterior, ou se foi algo que ocorreu no próprio processo analisado em questão, isso garante uma resposta rápida às deficiências do processo e faz com que os erros sejam consertados quase que imediatamente (Montgomery, 2009). Vale ressaltar que este trabalho não englobará a fase II em seus estudos.

De acordo com (Montgomery, 2009) em situações práticas para controle estatístico do processo, a média μ e o desvio padrão σ não são conhecidos, portanto, eles devem ser estimados através de amostras retiradas do processo que, supostamente, estava sob controle. Essas estimativas devem basear-se em pelo menos 20 ou 25 amostras, sendo as mesmas compostas com “n” observações referentes à característica da qualidade a ser analisada. O valor de “n” será pequeno, variando entre 4 e 6, visto que os custos associados à amostragem são relativamente altos. Tomando $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ como as médias de cada uma das amostras. Temos o melhor estimador para a média μ , como sendo:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (2.1.1.1)$$

então, $\bar{\bar{x}}$ deve ser usado como a linha central no gráfico \bar{x} .

Já, para os limites de controle, precisamos estimar o desvio padrão σ . Seja x_1, x_2, \dots, x_n uma amostra de tamanho “n”, a amplitude da mesma será dada pela diferença entre a maior e a menor observação, ou seja:

$$R = x_{máx} - x_{mín} \quad (2.1.1.2)$$

em que R_1, R_2, \dots, R_m sejam as amplitudes das “m” amostras. A amplitude média é dada por:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (2.1.1.3)$$

- Equação dos limites de controle da carta Xbar:

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (2.1.1.4)$$

$$LC = \bar{\bar{x}} \quad (2.1.1.5)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (2.1.1.6)$$

A constante A_2 encontra-se tabulada para vários tamanhos de amostra no anexo B

- Equação dos limites de controle da carta R:

$$LSC = D_4 \bar{R} \quad (2.1.1.7)$$

$$LC = \bar{R} \quad (2.1.1.8)$$

$$LIC = D_3 \bar{R} \quad (2.1.1.9)$$

As constantes D_3 e D_4 encontram-se tabuladas para vários valores de “n” no anexo B

2.2 Distribuição de probabilidade normal

Segundo (Montgomery, 2009) uma distribuição de probabilidade é um modelo matemático que relaciona o valor da variável com a probabilidade de ocorrência daquele valor na população. Em outras palavras, podemos visualizar a resistência como uma variável aleatória, porque ela assume diferentes valores na população de acordo com algum mecanismo aleatório, e, assim, a distribuição de probabilidade da resistência descreve a probabilidade de ocorrência de qualquer valor da mesma na população. Existem dois tipos de probabilidade:

- Distribuições contínuas: quando a variável que está sendo medida é expressa em uma escala contínua, sua distribuição de probabilidade é chamada de distribuição contínua;
- Distribuições discretas: quando o parâmetro que está sendo medido só pode assumir certos valores, tais como os números inteiros 0, 1, 2, ..., a distribuição de probabilidade é chamada de distribuição discreta.

De acordo com (Montgomery, 2009) a distribuição normal é, provavelmente, a mais importante distribuição, tanto na teoria quanto na prática da estatística. Se x é uma variável aleatória normal, então a distribuição de probabilidade de x é definida como a equação 2.2.1:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad -\infty < x < \infty \quad (2.2.1)$$

As variáveis μ e σ representam respectivamente a média e o desvio padrão da distribuição. A aparência de uma distribuição normal é dada por uma curva simétrica em forma de sino, como mostra a figura 3 abaixo

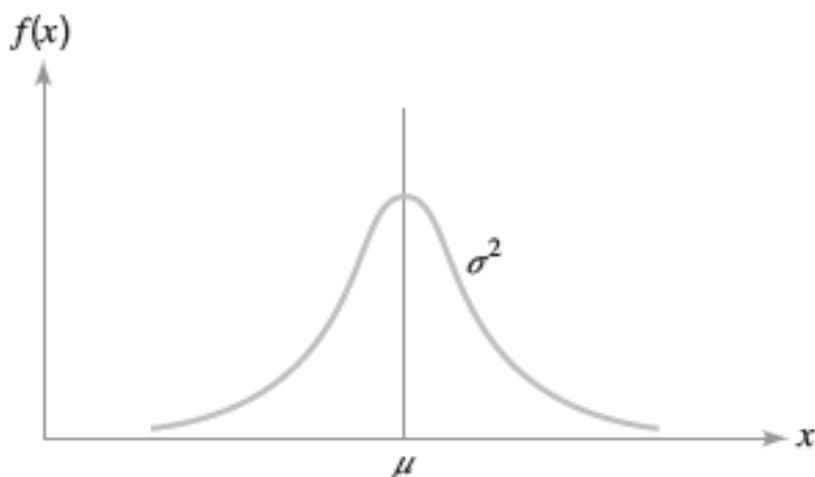


Figura 3 – Curva de distribuição normal

Fonte: adaptado de Montgomery (2011)

De acordo com (Montgomery, 2009), há uma interpretação simples do desvio-padrão σ de uma distribuição normal, em que 68,26% dos valores populacionais caem entre os limites definidos pela média mais ou menos um desvio-padrão ($\mu \pm 1\sigma$); 95,46% dos valores caem entre os limites definidos pela média mais ou menos dois desvios-padrão ($\mu \pm 2\sigma$); e 99,73% dos valores populacionais caem dentro dos limites definidos pela média mais ou menos três desvios-padrão ($\mu \pm 3\sigma$). Então, o desvio-padrão mede a distância na escala horizontal associada aos limites de abrangência de 68,26%, 95,46% e 99,73%. A figura 4 ilustra o comportamento do desvio padrão na curva de distribuição normal

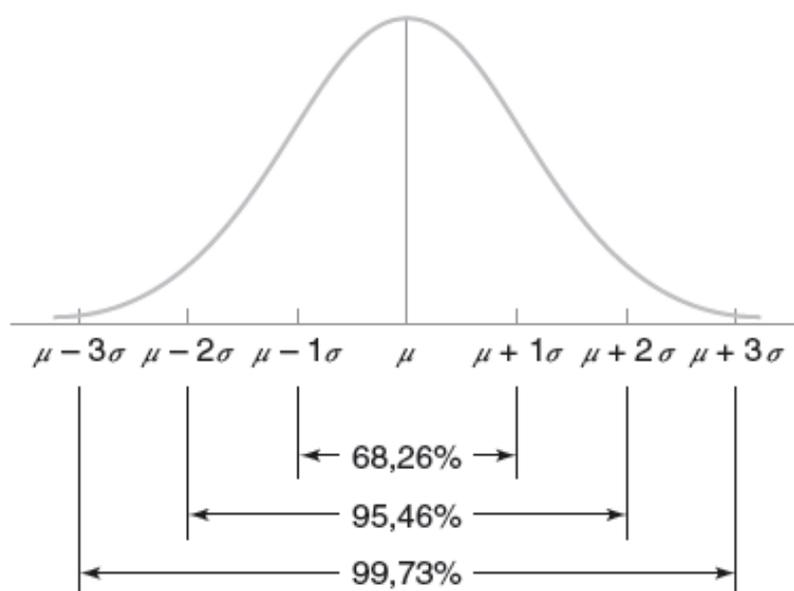


Figura 4 – Desvio padrão de uma distribuição normal

Fonte: adaptado de Montgomery (2011)

A distribuição normal acumulada é definida como a probabilidade de uma variável aleatória normal x ser menor que ou igual a algum valor a , ou

$$P\{x \leq a\} = F(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.2.2)$$

Esta integral não pode ser calculada em forma fechada. Entretanto, usando a mudança de variável

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.2.3)$$

O cálculo pode ser feito independentemente de μ e σ^2 . Isto é,

$$P\{X \leq a\} = P\left\{z \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right\} \equiv \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.2.4)$$

em que $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão (média = 0, desvio-padrão = 1). Uma tabela da distribuição acumulada da normal-padrão é dada na Tabela I do Apêndice. A transformação (2.2.3) é usualmente chamada de padronização, porque ela converte uma variável aleatória $N(\mu; \sigma^2)$ em uma variável aleatória $N(0; 1)$.

A Tabela I do Apêndice dá apenas as probabilidades à esquerda de valores positivos de z . Teremos que usar a propriedade da simetria da distribuição normal para calcular probabilidades

$$P\{x \geq a\} = 1 - P\{x \leq a\} \quad (2.2.5)$$

$$P\{x \leq -a\} = P\{x \leq a\} \quad (2.2.6)$$

$$P\{x \geq -a\} = P\{x \leq a\} \quad (2.2.7)$$

2.3 Gráficos de Probabilidade Normal

O gráfico de probabilidades é um método gráfico para determinar se os dados amostrais se ajustam a uma distribuição hipotética baseada em um exame visual dos dados.

O procedimento geral é muito simples e pode ser realizado rapidamente. O gráfico de probabilidade, tipicamente, usa papel especial para gráficos, conhecido como papel de probabilidade, que foi planejado para a distribuição hipotética (Montgomery, 2009).

Para a construção de um gráfico de probabilidade, as observações na amostra são ordenadas da menor para a maior. Isto é, a amostra x_1, x_2, \dots, x_n é arranjada como $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ em que $x_{(1)}$ é a menor observação, $x_{(2)}$ é a segunda menor observação, e assim por diante, com $x_{(n)}$ a maior. As observações ordenadas $x_{(j)}$ são marcadas contra sua frequência acumulada observada $(j - 0,5)/n$ [ou $100(j - 0,5)/n$] no papel de probabilidade apropriado. Se a distribuição hipotética descreve os dados adequadamente, os pontos marcados se localizarão, aproximadamente, ao longo de uma reta, porém, se os pontos marcados se desviarem significante e sistematicamente de uma reta, o modelo hipotético não é apropriado (Montgomery, 2009).

A figura 5 a seguir ilustra um gráfico de probabilidade normal

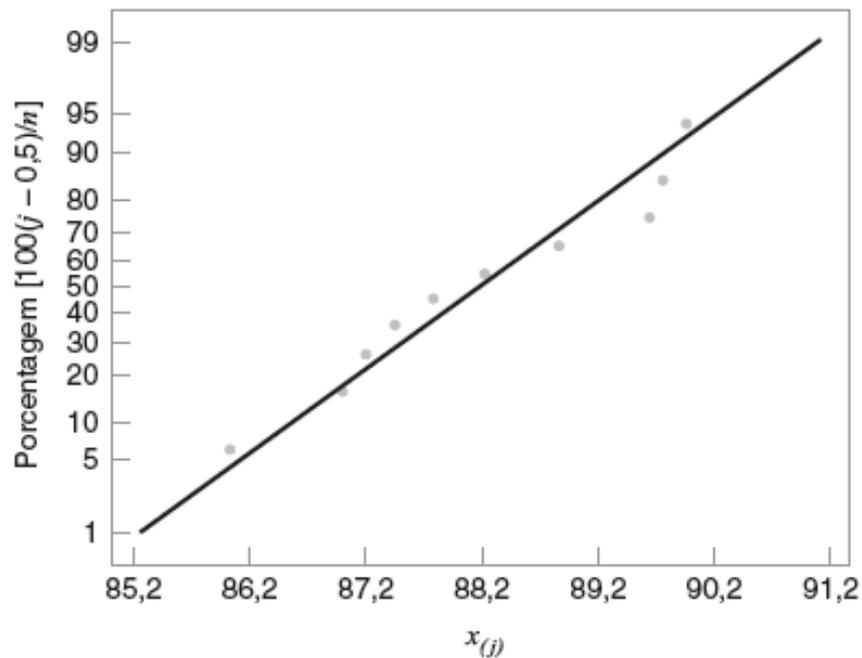


Figura 5 – Gráfico de probabilidade normal

Fonte: adaptado de Montgomery (2011)

Uma medida refinada e acurada para detectar desvios da distribuição normal é a estatística Anderson Darling. (W. Snedecor & G. Cochran, 1989) define-a como:

$$AD^2 = -n - n^{-1} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln(P_i) + \ln(1 - P_{n+1-i})] \quad (2.2.8)$$

Temos que: P é a probabilidade que uma variável normal padronizada seja menor do que $(X_i - \mu)/\sigma$; n é o número de amostras, μ é a média da amostra e σ é o desvio padrão da amostra.

Grandes valores de AD^2 indicam que a distribuição da amostra é diferente de uma população normal. O valor p , probabilidade de se aceitar uma hipótese nula, da estatística AD é dado por (W. Snedecor & G. Cochran, 1989) pela seguinte equação 2.2.9 a seguir

$$p = 1 - (1 - a)^n \quad (2.2.9)$$

Onde: a é o nível de significância (5%) e n é o número de amostras. Se o P-valor para o teste Anderson-Darling for menor do que o nível de significância podemos afirmar que os dados não seguem uma distribuição normal.

2.4 Análise de Capabilidade de Processos

Segundo AIAG (2005b), o resultado de um processo pode ser descrito por sua distribuição estatística, porém, para que essa descrição seja precisa para prever valores futuros, o processo deve estar sob controle estatístico, visto que, uma distribuição é descrita através das características (estatísticas) que são calculadas a partir das amostras tiradas do processo.

De acordo com Montgomery (2009), as técnicas estatísticas podem ser úteis em todo o ciclo do produto, até mesmo em atividades anteriores à fabricação do mesmo, que servirão para quantificar a variabilidade do processo, para posteriormente servir de base aos ajustes futuros em prol da redução da variabilidade. Toda essa atividade é conhecida como análise da capacidade do processo.

Nesta análise, os objetos de maior interesse são as estimativas de centralização do processo e a dispersão com relação aos limites de controle (que podem ser especificados por normas ou pelos clientes). A rigor, a centralização é estimada pelo média ou mediana das amostras e a dispersão é estimada através da amplitude ou desvio padrão da referida amostra (AIAG, 2005b).

A análise da capacidade de um processo para Montgomery (2009), diz respeito ao estudo formal para se estimar a capacidade do mesmo. Um estudo sobre a capacidade de um processo avalia as funcionalidades ou características críticas para a qualidade do produto, ao invés de analisar o processo em si. Nas situações em que o analista tem a oportunidade de acompanhar e controlar todo o processo produtivo, bem como a coleta de dados, podemos dizer que esse estudo seria sobre a capacidade do processo, contudo, quando temos apenas amostras do produto, que são fornecidas eventualmente, não se pode dizer que o estudo será sobre a capacidade do processo, já que não há um acompanhamento constante sob o mesmo, nesses casos o estudo é definido como caracterização do produto. Em uma caracterização do produto podemos apenas estimar a distribuição das características da qualidade do produto ou a produção do processo (uma pequena parte que esteja em conformidade com as especificações) e nada poderemos dizer sobre o comportamento do processo e seu estado de controle estatístico.

Para fazer uma estimativa confiável sob um processo, o mesmo deve estar sob controle estatístico, caso contrário, tais estimativas sobre o desempenho do processo podem estar completamente equivocadas e não preverem corretamente o que acontecerá em processos futuros, um exemplo para isso são dados coletados em intervalos de tempo distintos, podendo nos levar a conclusões não assertivas (Montgomery, 2009).

A análise da capacidade é vital para um programa de melhoria da qualidade, as principais utilizações de dados de acordo com Montgomery (2009), a respeito da análise da capacidade de um processo são:

1. Predizer até que ponto o processo manterá as tolerâncias;
2. Auxiliar os elaboradores/planejadores do produto na seleção ou modificação de um processo;
3. Auxiliar a estabelecer um intervalo entre amostras para monitoramento de um processo;
4. Especificar exigências de desempenho para um equipamento de um processo;
5. Selecionar entre vendedores concorrentes e outros aspectos do gerenciamento da cadeia de suprimentos;
6. Planejar a sequência de processos de produção quando há um efeito interativo de processos sobre as tolerâncias;
7. Reduzir a variabilidade em um processo.

Podemos concluir que a análise da capacidade de um processo é uma técnica que tem aplicações em quase todos os setores do ciclo do produto, que engloba desde o seu planejamento até a fabricação do produto em si.

De acordo com AIAG (2005b), após a conclusão de que o processo segue uma distribuição normal e não apresenta variações que ultrapassam o limite de controle, é possível fazer análises precisas a respeito do mesmo, e alguns índices e taxas nos auxiliam na avaliação da capacidade do processo, são eles:

- Índices de variação e centralização do processo, relativos à especificação: C_p ;
- Índices combinados de variação e centralização do processo, relativos às especificações: C_{pk} ;

Índice C_p : é o índice da capacidade, o mesmo compara a capacidade do processo com a amplitude máxima permitida, definida pelos limites de controle ou tolerâncias do processo.

Índice C_{pk} : este índice também se refere à capacidade, no entanto, o mesmo diz respeito à centralização do processo, seu cálculo é feito de acordo com as equações (2.4.1) e (2.4.2)

$$C_{pk} = \min(C_{ps}, C_{pi}) \quad (2.4.1)$$

$$C_{pk} = \min\left(C_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, C_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma}\right) \quad (2.4.2)$$

Ambos os índices citados anteriormente devem ser analisados em conjunto sempre que possível, pois a análise conjunta facilita na identificação de problemas de centralização (índice C_{pk}) ou de variabilidade (índice C_p) com maior agilidade. O índice C_p não foi usado neste trabalho, pois o limite de especificação é unilateral, o mesmo foi citado apenas por questões de esclarecimento do assunto, o referido índice (C_p) é utilizado em casos de bilateralidade de limites de especificação.

Índice PPM (partes por milhão): este índice é usado como medida suplementar da capacidade do processo e representa a quantidade de defeitos que provavelmente aparecerão nos produtos após a execução do processo em um milhão de vezes, seu cálculo é feito de acordo com a medida de probabilidade expressa nas equações (2.2.4) e (2.2.5) para uma distribuição que seja adequada à distribuição de probabilidade normal (AIAG, 2005b).

Outro índice que nos auxilia na análise da capacidade do processo é o nível sigma Z_{bench} , que se refere a quantidade de níveis sigma que cabem dentro do processo analisado em questão, ou seja, ele representa quão encaixado o processo estará dentro do intervalo de três níveis sigmas abaixo da média e 3 níveis sigma acima da média do processo (AIAG, 2005b). O nível sigma é calculado de acordo com a equação (2.4.3) demonstrada abaixo

$$Z_{bench} = 3C_{pk} \quad (2.4.3)$$

2.5 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

De acordo com Carpinetti (2016) o FMEA, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, é um método usado no desenvolvimento de produto e processo para o desenvolvimento de ações de melhoria para a minimização ou eliminação de falhas consideradas mais críticas segundo alguns critérios. Pode ser aplicado tanto na melhoria de produto quanto na melhoria de processo de fabricação.

De acordo com Carpinetti (2016) a ferramenta FMEA pode ser dividida em três etapas:

- I. Identificar as falhas, as possíveis causas e os meios existentes de detecção da falha, em função dessa análise, são definidas as notas para severidade, ocorrência e detecção para em seguida definir as falhas de solução prioritária, com base no indicador NPR (Número de Prioridade de Risco);
- II. Após a análise de causas das falhas e meios de detecção existentes e tendo em vista a ordem de prioridade de resolução das falhas, devem-se definir planos de ação para a eliminação ou minimização das falhas prioritárias;
- III. Após a implementação das ações propostas, a equipe de FMEA deve reanalisar as falhas, ocorrências e detecção, para avaliar se as ações propostas eliminaram ou minimizaram a ocorrência das causas das falhas.

A ferramenta FMEA faz o cálculo de um indicador quantitativo mais conhecido como NPR ou número de prioridade de risco, o qual leva em consideração outros três indicadores que servem de base para o cálculo do NPR, são eles: severidade, ocorrência e detecção. O NPR varia de 1 a 1000, e serve para nos indicar a prioridade que devemos dar às deficiências analisadas em questão, portanto, quanto maior o valor do NPR, maior será a necessidade de ser feito um acompanhamento e/ou uma mudança naquela característica do

processo, com a finalidade de reduzir os riscos inerentes ao processo (Moura, 2000). O NPR é calculado da seguinte maneira:

$$NPR = S * O * D \quad (2.5.1)$$

Onde, S é a severidade, O a ocorrência e D a detecção.

O campo “função/requisitos do processo” para um FMEA de processos, indica como seria a etapa do processo de fabricação, o objetivo é especificar o processo da forma mais completa possível (Carpinetti, 2016).

No campo “modo de falha” estão indicados os eventos que causam uma diminuição parcial ou total da função do processo e de suas metas de desempenho, como por exemplo, apresentar as não conformidades que o processo gera (Carpinetti, 2016).

Para o campo, “efeito potencial da falha” descrevem-se os efeitos dos modos de falha no desempenho do produto ou resultado do processo. É o que o cliente, consumidor final ou cliente intermediário, observa. Pergunta-se: o que acontecerá se ocorrer o tipo de falha descrito? Quais consequências poderá sofrer o cliente? No caso de processo, o cliente pode ser o próximo processo ou o cliente final e a descrição deve incluir o efeito nos próximos processos e/ou no consumidor final (Carpinetti, 2016).

A severidade (S), segundo Moura (2000), avalia a gravidade, ou o nível de risco que a falha potencial em análise pode trazer para o cliente, ela pode variar de 1 a 10, sendo 1, uma falha que não trará risco algum ao cliente e que é praticamente imperceptível, e 10, uma falha que trará risco à segurança do cliente pois envolve alguma não conformidade com as normas regulamentadoras.

O campo “causa potencial da falha” enumera todas as possíveis causas para ocorrência da falha. Essas causas podem ser definidas com o auxílio de diagramas de causa e efeito. Parte das causas de falha de produto pode ser decorrente de falhas no processo, ou seja, existe uma correlação entre produto e processo para o campo de causa potencial de falha (Carpinetti, 2016).

O indicador ocorrência (O), diz respeito a probabilidade com que a falha potencial pode acontecer. Esse indicador varia de 1 a 10, porém, o ideal para que o mesmo seja classificado seria através de uma análise de dados históricos do processo (como a taxa de falha ou índice C_{pk}), para que sua avaliação fosse feita com maior precisão, porém, caso não existam dados históricos, pode ser feita uma análise qualitativa para estimar o seu valor. Seu valor será 1 para falhas que sejam improváveis de ocorrer, nesses casos os processos são praticamente idênticos e estão sob controle estatístico. O valor da ocorrência será 10 para

processos em que a falha é praticamente inevitável, ou seja, ela aparece na maioria dos processos executados (Moura, 2000).

Para “controles atuais”, são listados os mecanismos de controle atuais que têm potencial para detectar as falhas decorrentes das causas ou possíveis causas identificadas. São os controles que podem evitar ou diminuir a chance de a falha ocorrer ou ser detectada caso ela venha a ocorrer (Carpinetti, 2016).

Segundo Moura (2000), o indicador detecção (D), mede a probabilidade do processo em detectar as deficiências do processo, antes que o mesmo chegue ao fim (no produto acabado). Neste indicador, também é utilizada uma escala de 1 a 10, onde o valor 1 para esse indicador revela que os controles atuais do processo são ótimos e conseguem detectar praticamente todos os modos de falha, evitando o despacho de produtos com defeitos, em contrapartida, a detecção com valor 10 indica que o processo não possui controles para detectar as falhas ou deficiências apresentadas e conseqüentemente produtos fora da especificação serão despachados ou fornecidos aos clientes. A figura 6 a seguir ilustra como são priorizadas as ações de melhorias através da aplicação do FMEA.

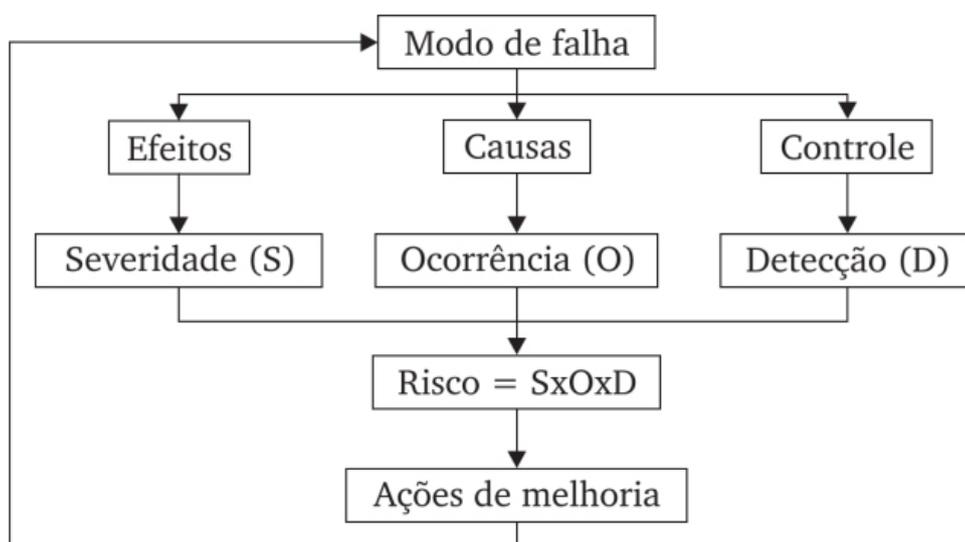


Figura 6 – Método FMEA para priorização de ações de melhorias

Fonte: adaptado de CESAR RIBEIRO CARPINETTI (2016)

A última etapa do FMEA tem por objetivo reavaliar se houve uma diminuição da ocorrência da causa da falha, ou se houve um aumento da detecção da falha, ou ambos. Essas notas de ocorrência e detecção são novamente atribuídas e uma nova avaliação do número de prioridade de risco é feita, dando início a um novo ciclo de ações de melhoria em função das novas prioridades (Carpinetti, 2016).

O formulário FMEA é um documento “vivo”, ou seja, uma vez realizada uma análise para um produto/processo qualquer, ela deve ser revisada sempre que ocorrerem alterações no produto/processo específico. Além disso, mesmo que não haja alterações, deve-se regularmente revisar a análise, confrontando as falhas potenciais imaginadas pelo grupo com as que realmente vêm ocorrendo no dia a dia do processo e uso do produto, de forma a permitir a incorporação de falhas não previstas, bem como a reavaliação, com base em dados objetivos, das falhas já previstas (Lobo, 2010). A seguir, a figura 7 ilustra um FMEA com as suas respectivas etapas de aplicação.

Função do produto ou requisitos do processo	Modo de falha potencial	Efeito potencial de falha	S/G	Causa/mecanismo potencial da falha	O	Controles atuais do processo	D	R / NPR	Ações recomendadas	Responsável e prazo	Resultado das ações							
											Ações tomadas	Índices revisitos						
												S/G	O	D	NPR			
			Etapa I		→				Etapa II		→				Etapa III			

Figura 7 – Modelo de PFMEA e suas etapas

Fonte: adaptado de CESAR RIBEIRO CARPINETTI (2016)

3 MÉTODO PROPOSTO

Esta proposta é uma adaptação das recomendações de desenvolvimento de operação de cartas de controle para dados do tipo contínuo em (Montgomery, 2009) e no manual da Automotive Industry Action Group – (AIAG, 2005).

O objeto de estudo desse trabalho trata-se de uma indústria produtora de pré-moldados a base de concreto, situada na cidade de João Pessoa, Paraíba. A indústria possui cerca de 60 funcionários e produz uma média de 30 mil postes ao ano, os dados coletados foram fornecidos pela empresa, datados de janeiro/2018 a janeiro/2019, com período de coleta dos dados feito quinzenalmente.

3.1 Declaração do Problema

Segundo Montgomery (2009), para que um produto alcance ou ultrapasse as exigências do seu cliente, o mesmo, em situações gerais, foi produzido por um processo estável ou replicável. Além disso, tal processo deve operar com uma variabilidade pequena,

em torno das características descritas no projeto do produto, sejam elas características físicas ou nominais.

Entender a estrutura de um processo e quantificá-lo é, sem dúvida, essencial para iniciativas bem-sucedidas de melhoria da qualidade. A análise da capacidade dos processos tornou-se uma ferramenta importante e bem definida nas aplicações do controle estatístico de processos (CEP) para uma melhoria contínua da qualidade e da produtividade. A relação entre o desempenho real do processo e os limites de especificação (ou tolerância) pode ser calculada usando índices de capacidade de processo adequados, os quais podem fornecer medidas numéricas sobre se um processo de fabricação é ou não capaz de atender a um nível predeterminado de tolerância de produção (Wu, Pearn, & Kotz, 2009).

3.2 Planejamento da Coleta de Dados

De acordo com o manual da AIAG (2005b), para se construir uma carta de controle, deve-se coletar amostra de dados que representem bem o processo estudado, assim sendo, quanto maior for a amostra, maior será a chance de detectar pequenas mudanças no processo.

- I. Pelo menos 20 subgrupos (amostras);
- II. Pelo menos 100 medições no total;
- III. n (tamanho amostral do subgrupo) = entre 4 e 6, como é recomendado pela literatura;
- IV. h (intervalo de amostragem) = frequência com que as amostras fornecidas foram coletadas;
- V. k (fator de abertura da carta de controle) = 3.

3.3 Cálculo dos Limites de Controle Iniciais

Para saber se o processo está estável, usa-se como parâmetros os limites de controle (LC). Esses limites de controle são o que determinam, segundo a AIAG (2005), uma faixa de intervalo de valores em que a estatística de controle está presente.

- Para cartas de controle do tipo \bar{x} -R:

Uma infinidade de características da qualidade pode ser expressa em termos de média numérica, tais características são denominadas de variáveis de um processo, em que o gráfico de controle é uma ferramenta amplamente utilizada para o controle do valor médio e da variabilidade das mesmas. O controle da média de um processo é feito através de um gráfico de controle de médias, comumente denominado de gráfico de controle \bar{x} , já a variabilidade

do processo pode ser acompanhada tanto através do gráfico de controle para desvio padrão, chamado de gráfico de controle s , quanto para o gráfico de controle para amplitude, chamado de gráfico de controle R , sendo o R mais utilizado. Na maioria das vezes os gráficos \bar{x} e R são mantidos separados para cada característica da qualidade a ser observada, tais gráficos estão listados como uma das técnicas mais importantes no controle e monitoramento estatístico do processo (Montgomery, 2009). A tabela 1 a seguir resume como são calculados os limites de controle iniciais.

Tabela 1 – cálculo dos limites de controle para carta $\bar{x} - R$

Tipo	\bar{x} (média)	R (amplitude)
Limite Superior de Controle (LSC)	$\bar{\bar{x}} + A_2\bar{R}$	$D_4\bar{R}$
Linha Central (LC)	$\bar{\bar{x}}$	\bar{R}
Limite Inferior de Controle (LIC)	$\bar{\bar{x}} - A_2\bar{R}$	$D_3\bar{R}$

Fonte: elaborado pelo autor

Todos os outros cálculos estão descritos na seção 2.1.1 deste trabalho.

3.4 Análise de Estabilidade do Processo

Como dito anteriormente, se o processo for estável, existe uma grande probabilidade de que para qualquer amostra do subgrupo, a estatística de controle irá cair dentro da faixa de valores estabelecida pelos limites de controle. De acordo com a AIAG (2005), caso isso não ocorra, isso é um indicativo de que podem existir causas de variações especiais. Caso exista causa especial, é recomendado seguir alguns passos.

- I. Se houver Causa Especial (CE), investigar o motivo (6M – matéria prima, mão de obra, máquina, medição, método e meio ambiente);

De acordo com Leider & Riberio (2005) podemos analisar as causas que geram problemas de não conformidade dos produtos que saem dos processos (os efeitos), existem ferramentas no CEP que servem de suporte para fazermos essas análises, como por exemplo, o diagrama de Ishikawa ou diagrama 6M. O diagrama nos dará suporte para que possamos identificar as causas comuns do processo que são mais relevantes para que o mesmo não atinja a especificação desejada, bem como servirá de auxílio para a implementação da melhoria contínua dos processos. O diagrama de causa e efeito também é conhecido como diagrama 6M, pois, sua estrutura e metodologia indica que os problemas podem ser enquadrados em seis tipos diferentes:

- Método: refere-se à forma como o processo é feito;
- Matéria prima: quais os insumos que são utilizados para compor o processo;
- Mão de obra: quais colaboradores estão envolvidos e as atividades que os mesmos desenvolvem para o processo;
- Máquina: quais são as máquinas utilizadas no processo;
- Meio ambiente: como é o ambiente físico onde ocorre o desenvolvimento do processo;
- Medição: está relacionado à maneira como é medida o desempenho ou controle do processo.

Portanto, para iniciar o processo de melhoria contínua e identificação das principais causas que impactam no desempenho do processo, a ferramenta do diagrama 6M é fundamental, a figura 8 a seguir ilustra como é o diagrama.

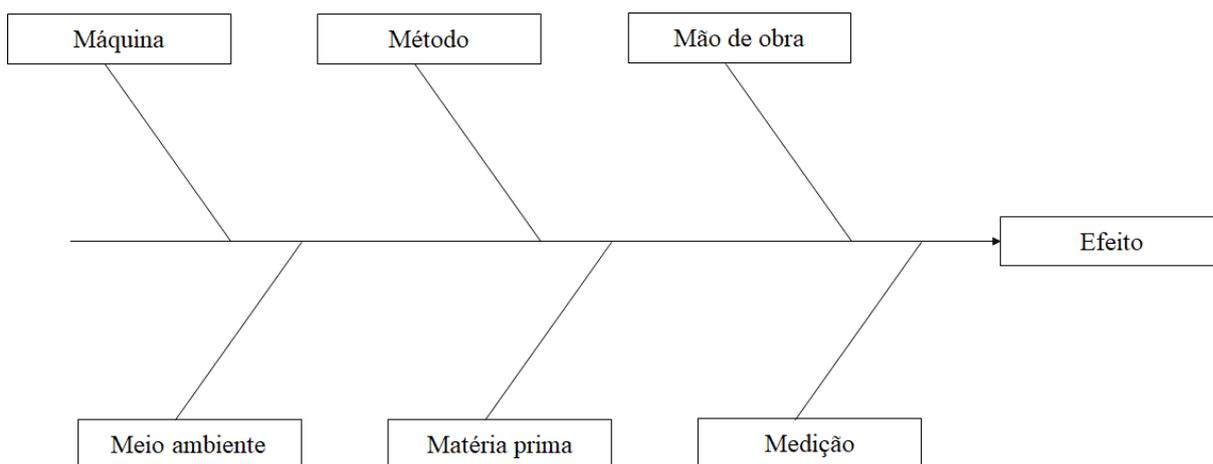


Figura 8 - Diagrama 6M

Fonte: elaborado pelo autor

- II. Corrigir CE e prevenir contra recorrência;
- III. Recalcular Limites de Controle, excluindo da análise os subgrupos com causa especial de variação;
- IV. Repetir passos (I) - (III) até que a carta não tenha CE no cálculo dos LC.

3.5 Análise de Capabilidade

Um processo estável pode ser descrito através da sua distribuição estatística, para isso, o mesmo deve ser estável (sob controle estatístico) para que a distribuição possa ser

usada na previsão de resultados futuros. Parâmetros da distribuição são calculados através das medições das amostras retiradas do processo (AIAG, 2005a).

As características de maior interesse são estimativas da centralização e da dispersão do processo em relação às necessidades do cliente ou do projeto. A centralização é estimada através da média amostral ou de sua mediana e a dispersão é estimada através da amplitude ou do desvio padrão da amostra. As medições de centralização e dispersão são extremamente importantes, pois, elas interagem com relação à produção de um produto que se enquadra nos padrões de conformidade, de modo que, uma modificação na centralização do processo, um aumento na dispersão do mesmo ou a combinação desses fatores, pode causar um ruído no processo, resultando na produção de peças fora dos limites de especificação (AIAG, 2005a)

Segundo (AIAG, 2005a), o índice da capacidade é o C_{pk} , o mesmo avalia a centralização e a capacidade do processo.

Todos os cálculos referentes ao índice C_{pk} e outros que foram usados, estão descritos na seção 2.4 deste trabalho.

3.6 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

O FMEA pode ser utilizado tanto para projetos (DFMEA) quanto para processos produtivos (PFMEA), no trabalho em questão, utilizamos o PFMEA, já que o estudo é embasado em testes de resistência de corpos de prova de concreto, o qual é produzido por um processo.

Segundo (Moura, 2000) o FMEA de processo é uma ferramenta analítica que serve de suporte para garantir que os modos de falha potenciais e suas causas realmente foram analisadas. De modo mais claro, o FMEA resume o que a equipe ou o responsável pelo processo pensou a respeito do processo produtivo, incluindo a análise dos itens que apresentariam falha, de acordo com experiências passadas. Para a elaboração de um FMEA, deve-se levar em conta ou as especificações do cliente ou as especificações de alguma norma, para posteriormente ser feita a avaliação do efeito potencial de que uma falha pode causar.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Declaração do Problema

O problema avaliado em questão, refere-se à análise da capacidade do corpo de prova de concreto em atender às especificações da NBR 5739/1993, que determina o mínimo de resistência à compressão que o corpo de prova de concreto deve ter.

A norma determina uma resistência mínima de 25MPa, porém, para redução de custos e maior controle do processo produtivo do concreto, é preciso controlar as variáveis do processo produtivo, não só para que ele atenda às especificações da norma, mas também, para que o mesmo esteja sob controle, garantindo baixa variabilidade nas características da qualidade, maior previsibilidade para aquisição e consumo dos insumos e, com isso, um aumento na confiabilidade do produto (concreto) além de uma consequente redução de custos produtivos e operacionais.

4.2 Planejamento da Coleta de Dados

Os dados foram coletados através do histórico que fora disponibilizado pela empresa, seguindo as recomendações da (AIAG, 2005b), sendo descritos os pontos de recomendação abaixo:

- I. Temos 25 subgrupos (amostras) sendo analisados com suporte de software estatístico;
- II. Foram coletadas 100 medições no total;
- III. n (tamanho amostral do subgrupo) = 4 para concreto com 7 dias de cura;
- IV. h (intervalo de amostragem) = 15 dias;
- V. k (fator de abertura da carta de controle) = 3.

Os dados das amostras de resistência dos corpos de prova estão tabulados no apêndice A do trabalho.

4.3 Cálculo dos Limites de Controle Iniciais

De acordo com a tabela 1, do item 3.3, o cálculo dos limites de controle iniciais para 7 dias de cura do concreto foi realizado resultando nos dados da tabela 2 a seguir:

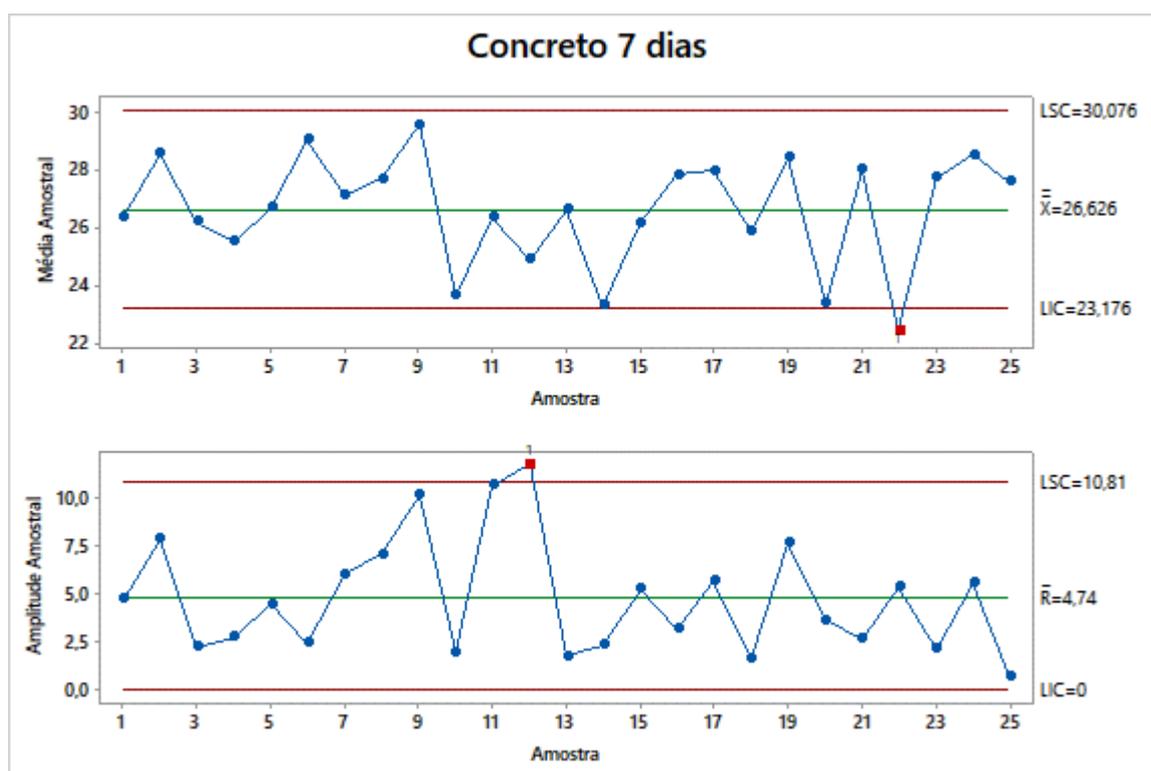
Tabela 2 – Limites de controle para concreto com 7 dias de cura

Tipo	\bar{x} (média)	R (amplitude)
Limite Superior de Controle (LSC)	30,09	10,81
Linha Central (LC)	26,63	4,74
Limite Inferior de Controle (LIC)	23,17	0,0

Fonte: elaborado pelo autor

4.4 Análise de Estabilidade do Processo

Neste ponto, precisamos seguir as recomendações da (AIAG, 2005b) para analisar se existem causas especiais de variação atuando no processo. Através das cartas de controle plotadas e embasadas nos cálculos descritos na seção 2.4, conseguimos observar quais os pontos que apresentaram causas especiais de variação. A figura 9 a seguir apresenta os gráficos com as causas especiais de variação em ênfase.

Figura 9 – Cartas de controle \bar{x} e R do processo

Fonte: elaborado pelo autor

Podemos observar que, para o concreto com cura de 7 dias, o processo não é estável, visto que, as cartas de controle apresentaram causas especiais de variação, com falhas no teste de média amostral (\bar{x}) referente à: um ponto com mais de 3,00 desvios padrão da linha central no ponto 22 e 2 de 3 pontos com mais de 2 desvios padrão da linha central (em um

lado da LC), também no ponto 22. Para a amplitude (R), temos falha referente à: um ponto com mais de 3,00 desvios padrão da linha central que ocorreu no ponto 12.

Após a análise das cartas de controle e seguindo as recomendações, devemos excluir as causas especiais de variação, entendendo o motivo da ocorrência e prevenindo possíveis recorrências.

Excluídas as causas especiais das cartas de controle e novamente tomando as equações descritas na seção 2.1.1 como suporte, obtivemos novos limites de controle, apresentados na figura 10 abaixo.

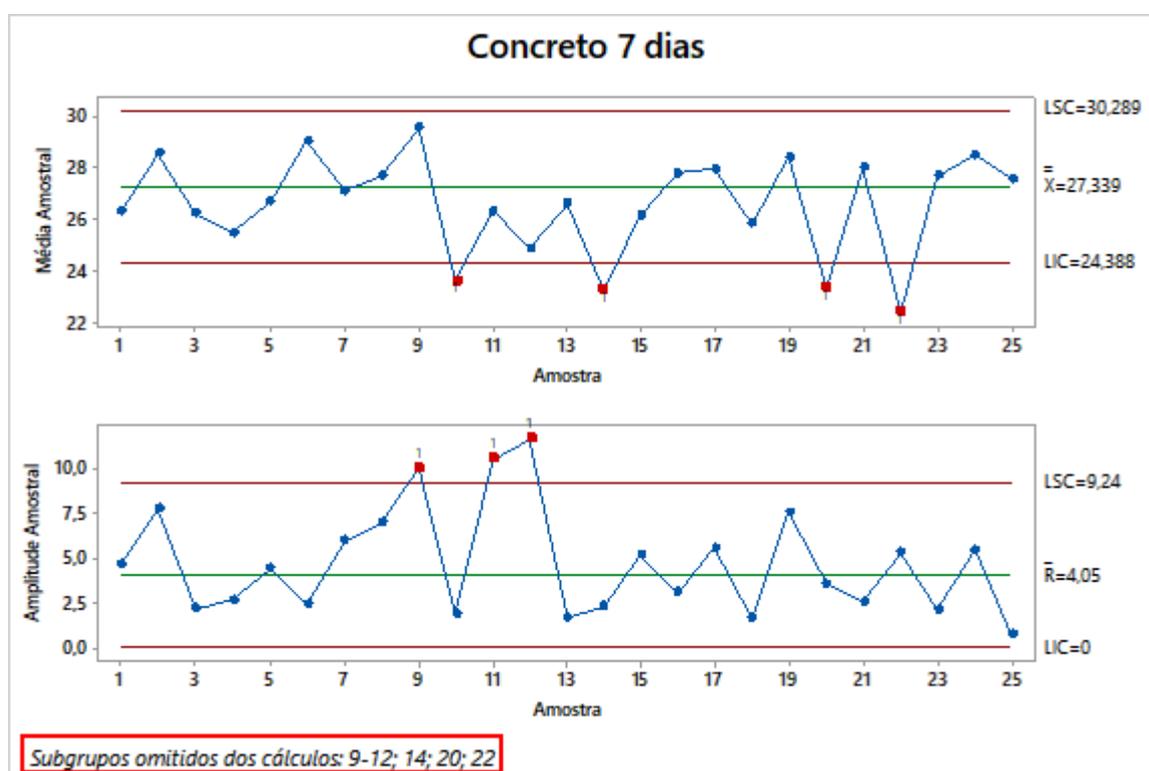


Figura 10 – Cartas de controle \bar{x} e R do processo sem causas especiais

Fonte: elaborado pelo autor

Como podemos analisar na figura 10, os subgrupos excluídos foram 9-12 (do nove ao doze), 14, 20 e 22. A literatura pede para que sejam descritos os motivos referentes às causas especiais de variação e o que foi feito para sanar a ocorrência das mesmas, porém, como o objeto de estudo em questão trata-se de uma indústria de pequeno porte, a mesma não possui um controle robusto de tal processo.

Algumas possíveis causas para que tenham ocorrido as falhas são:

- Utilização de areia com umidade elevada, fazendo com que a resistência do concreto diminua, uma vez que a água é o insumo do processo que deixa o concreto mais maleável;
- Outra possível causa é a quantidade equivocada de insumos para formulação da composição do concreto, visto que as ferramentas utilizadas para a alimentação da betoneira não possuem uma precisão elevada ou tão pouca uma escala para medição das quantidades de insumo;
- Uma terceira causa seria a falta de conhecimento da mão de obra a respeito da preocupação com a composição do concreto, visto que a mesma influencia diretamente a variável resistência, que influenciará tanto no quesito de atendimento do produto à norma, quanto ao quesito segurança para os clientes.

Podem existir outras causas para a ocorrência das falhas, as causas citadas anteriormente foram as observadas pelo autor do estudo, em conjunto com o responsável pelo processo produtivo no intervalo de tempo em que o autor do estudo estava em processo de estágio na empresa. Para a referida análise, utilizamos como suporte o diagrama 6M preenchido conforme a figura 11 a seguir:

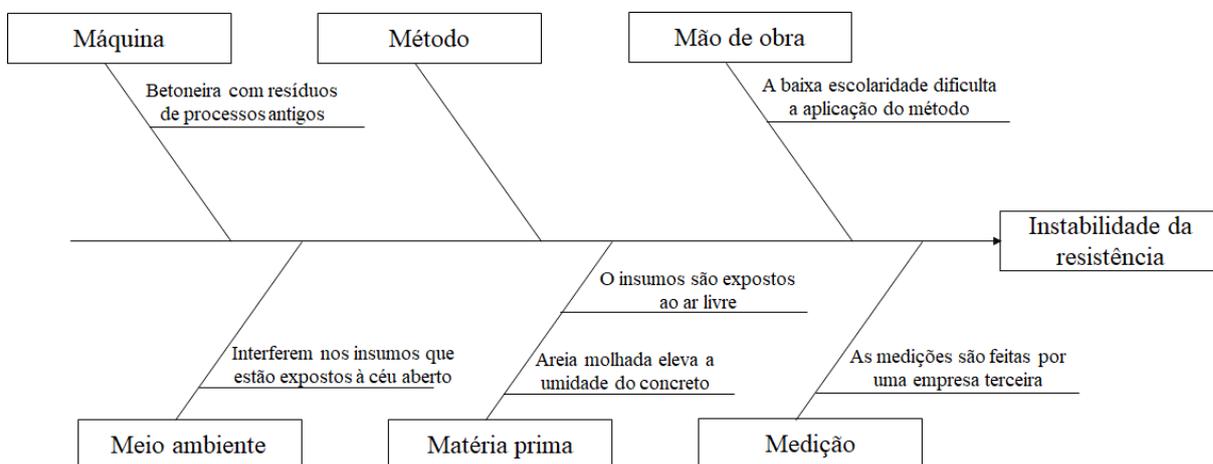


Figura 11 – Diagrama 6M da resistência do concreto

Fonte: elaborado pelo autor

Finalmente, chegamos aos limites de controle sem a influência de causas especiais que estão demonstrados na tabela 3, cujos cálculos foram embasados no tópico 2.1.1 deste trabalho.

Tabela 3 – Limites de controle sem causas especiais de variação

Tipo	\bar{x} (média)	R (amplitude)
Limite Superior de Controle (LSC)	30,29	9,24
Linha Central	27,34	4,05
Limite Inferior de Controle (LIC)	24,39	0,0

Fonte: elaborado pelo autor

4.5 Análise de Capabilidade

Com ajuda dos cálculos descritos no tópico 2.4 e após ter excluído as causas especiais de variação, podemos calcular os índices de capacidade para interpretar estatisticamente os resultados das amostras coletadas.

A figura 12 representa o histograma do processo que estamos estudando, ele nos revela que o processo é incapaz, pois alguns valores estão abaixo do limite inferior de especificação, o que é ruim para o processo, pois a norma NBR 5739/1993 especifica que o concreto deve ter no mínimo 25MPa de resistência à compressão, entretanto, como a cura do concreto está com apenas 7 dias, algumas amostras não conseguiram atingir a especificação mínima exigida pela norma, a qual é válida tanto para 7 quanto para 28 dias de cura do concreto, porém, esse cenário é melhorado após o passar do tempo (com o concreto curado após 28 dias, por exemplo), atingindo a especificação da norma.

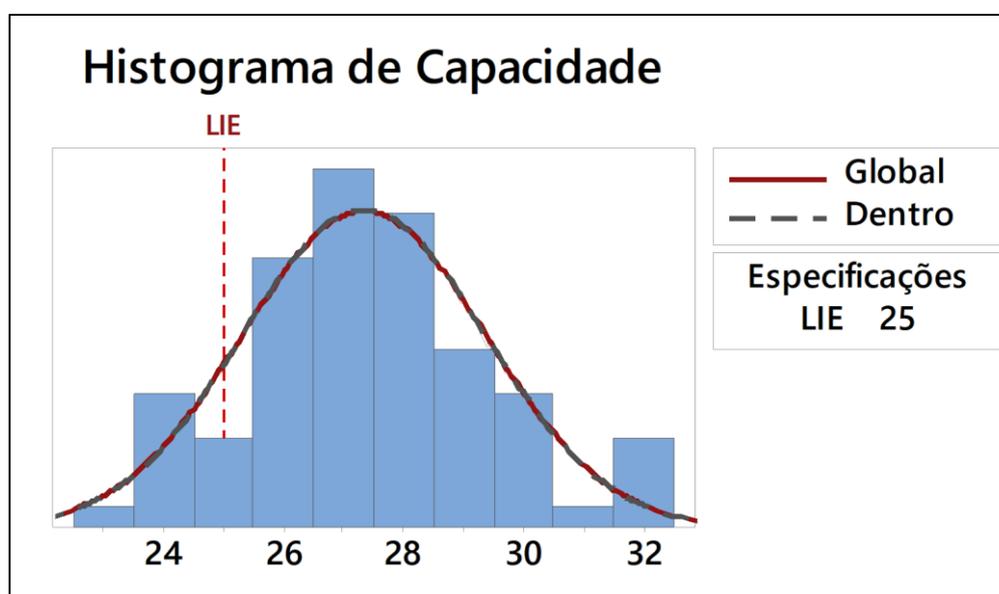


Figura 12 – Histograma de capacidade do concreto com cura de 7 dias

Fonte: elaborado pelo autor

O gráfico de normalidade representado na figura 13 informa que o processo segue um padrão de distribuição normal e, portanto, a resistência do concreto pode ser descrita estatisticamente pela distribuição de probabilidade normal. A distribuição do processo em

questão apresentou um P-valor de 0,895, confirmando que a distribuição normal é adequada para a descrição dos dados. Mais informações a respeito do cálculo do P-valor, estão descritas na seção 2.3 deste trabalho.

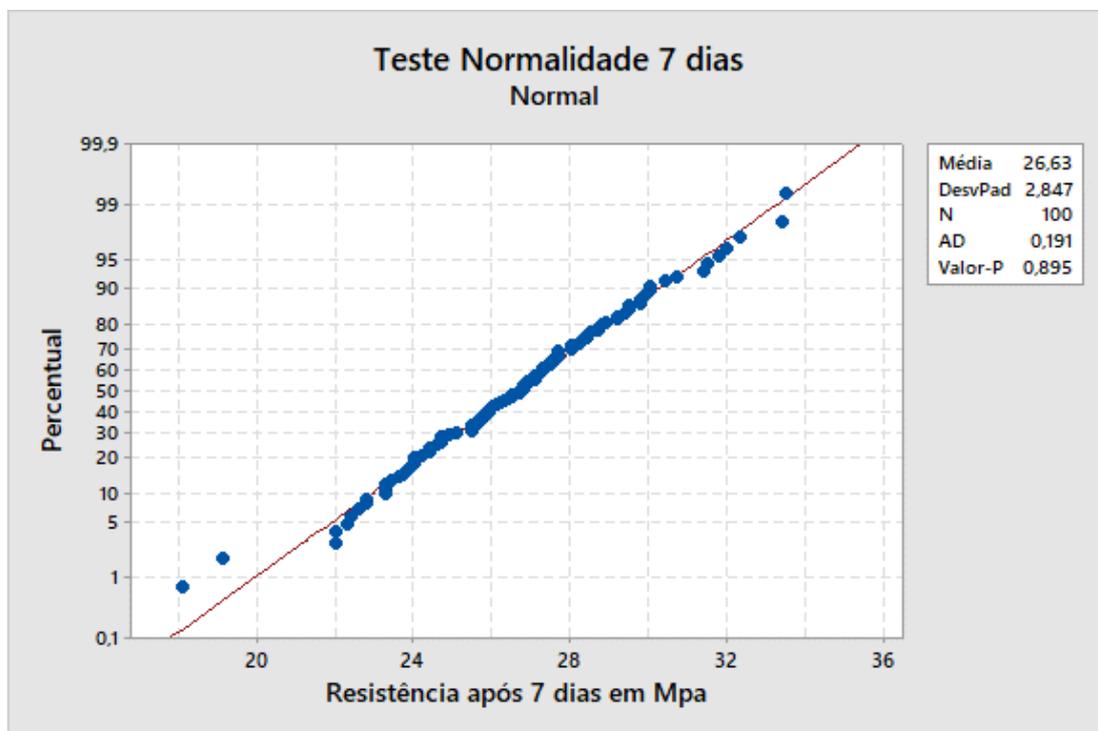


Figura 13 – Gráfico de probabilidade normal

Fonte: elaborado pelo autor

Os valores mais significativos para a análise de capacidade, são o nível sigma do processo (Z_{bench}), o C_{pk} e o PPM (partes por milhão). Através do C_{pk} , temos a confirmação de que o processo é incapaz, a literatura considera que um C_{pk} abaixo de 1,33 informa que o processo não é capaz de atender às especificações, que nesse caso em particular é algo preocupante, já que a especificação é determinada por uma norma regulamentadora (caso a empresa realmente queira escoar os produtos com 7 dias de cura).

Com relação ao PPM e o nível sigma, observamos apenas o reflexo do que o C_{pk} nos mostrou, que é um processo com uma taxa de aproximadamente 12% de produtos fora do limite de especificação, ou seja, a cada cem produtos vendidos, aproximadamente 12 estarão fora da especificação. Os valores foram demonstrados na tabela 4 abaixo, seus cálculos foram embasados no tópico 2.4 deste trabalho.

Caso a empresa realmente queira vender seus produtos com uma cura de 7 dias do concreto, é necessário que se faça um plano de ação para controle e melhoria do processo, para garantir que problemas futuros com clientes não ocorram.

Tabela 4 – Índices de capacidade do processo

Índice	Valor
Z_{bench}	1,15
C_{pk}	0,38
PPM	124.332

Fonte: elaborado pelo autor

4.6 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

Para analisar as causas de falha que podem estar interferindo no processo utilizamos a ferramenta PFMEA, ela nos ajuda a priorizar as atividades referentes à cada causa que interfere no resultado do processo através da atribuição de “pesos” para os índices de severidade, ocorrência e detecção.

A ferramenta foi utilizada de maneira integral, mas o plano de ação para as causas não será exposto completamente, pois o autor não conseguiu acompanhar a aplicação do plano de ação devido ao intervalo de tempo que esteve no estágio não ser compatível com o tempo em que o plano de ação seria executado. A seguir, na figura 14, está exposta a análise dos modos de falha e seus efeitos.

Operação / Função / Requisito	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) da Falha(s)	SEVER	Causa(s) Potencial(is) da Falha(s)	OCCOR	Controles Atuais do Processo Prevenção	Controles Atuais do Processo Detecção	DETEC	NPR	Ações recomendadas
Atender a norma NBR 5739	Baixa resistência do concreto	Estruturas maleáveis que podem cair	10	Insumos expostos a céu aberto	10	NA	NA	10	1.000	Colocar instrumentos que medem umidade nos insumos e estocá-los com maior cautela
				Utilização de ferramentas sem precisão de medidas	10	NA	Inspeção visual	8	800	Adquirir instrumentos de precisão de médias e treinar operários
				Medições de resistência feitas apenas por empresa terceira	7	NA	Conferência dos relatórios da empresa terceira	8	560	Aquisição de uma prensa para fazer testes in loco
		Estruturas com bolhas na superfície	8	Vibração inadequada do concreto	8	NA	Inspeção visual	8	512	Treinamento da mão de obra no processo de vibração
		Estruturas com brita e/ou ferragens descobertas	8	Formas muito antigas deixando vazar concreto	7	Manutenção corretiva das formas	Inspeção visual	7	392	Aquisição de novas formas/formular planos de manutenção preventiva
			8	Erros na formulação do traço do concreto, deixando-o maleável demais	7	NA	Inspeção visual	8	448	Colocar receita do concreto no setor da betoneira e garantir que a mesma será executada sempre

Figura 14 – PFMEA do processo

Fonte: elaborado pelo autor

Encontramos 3 potenciais causas de falha, com índice NPR (número de prioridade de risco) alto:

A primeira refere-se aos insumos do processo que são expostos a céu aberto, dificultando o controle do processo devido à livre ação do meio ambiente sob os mesmos, além da falta de mecanismos para detecção das alterações causadas pelo ambiente, portanto, esse foi o ponto mais preocupante apontado pelo FMEA, com um NPR de 1000 (número máximo).

O plano de ação pensado para diminuir os riscos dessa causa foram: adquirir instrumentos que possam medir a umidade dos insumos, além de estocar os insumos com maior cautela, protegendo-os da ação do ambiente externo.

A segunda causa diz respeito à não utilização de ferramentas que não possuam precisão para medir as quantidades de insumos que são colocadas nas betoneiras, dificultando a padronização do “traço” do concreto, fazendo com que o processo possa mudar quase que livremente, esta causa atingiu um NPR de 800, abaixo da primeira apenas pelo fato de que essa pode ser detectada visualmente (apesar da imprecisão desse método).

O plano de ação pensado para essa causa foi adquirir instrumentos que possuam uma escala de precisão para que a composição do traço do concreto seja respeitada e após a aquisição, treinar os operários a usar as ferramentas da maneira correta.

A terceira causa analisada foi a total confiança em uma empresa terceira, nos resultados dos testes de resistência, visto que a empresa estudada não possui uma prensa para fazer os testes (que é justificável, já que a máquina é cara e serviria apenas para inspeção da resistência dos corpos de prova). Por conta do exposto, o NPR dessa causa foi de 560, que não é tão alto quanto os supracitados, mas representa risco para empresa.

O plano de ação pensado para essa causa foi a aquisição de uma prensa para que sejam feitos os testes de resistência *in loco* para conferir se a terceira está prestando um serviço de qualidade e repassando uma informação verídica, porém, para esse plano de ação, a empresa necessitaria de uma análise de custo (através do *brake even point*) para aquisição da prensa.

Outras 3 causas com menor índice NPR foram analisadas, apesar de não serem as mais relevantes, elas são importantes para a análise do processo como um todo, garantindo que, no futuro, todas as causas estejam controladas, independente do seu número de prioridade de risco, foram elas:

Formação de bolhas nas estruturas de concreto, elas são oriundas da má execução no processo de vibração do concreto nas formas, seu NPR atingiu o valor de 512.

O plano de ação montado para essa causa foi pensado de modo que sua execução fosse rápida e barata, concluímos que através do treinamento fornecido pelo próprio responsável do processo produtivo garantiria aos colaboradores o aprendizado do método correto para assentar o concreto através da vibração.

Outra causa analisada foi o fato da empresa possuir formas muito antigas, que deixam o concreto vazar, ocasionando o problema de estruturas com brita ou ferragem aparente. O NPR para essa causa atingiu o valor de 392, pois, a empresa faz manutenções corretivas que, que apesar de serem ineficientes na previsão de ocorrência de falhas, elas indicam um “primeiro passo” referente às ações que irão prevenir a aparição de novas falhas no processo.

O plano de ação indicado para o modo de falha acima foi montar um plano de manutenção preventiva das formas, ajudando na prevenção de falhas e garantindo maior confiabilidade às formas. Analisar a viabilidade da aquisição de formas mais modernas, com mecanismos que garantam uma melhor vedação das mesmas, porém, seria necessário fazer um estudo a respeito do retorno em receita, qualidade e tempo, que a aquisição das formas traria, em detrimento dos custos e depreciação das mesmas.

A última causa analisada foi a não padronização na formulação do traço do concreto, pois, não há um controle rigoroso sobre a execução da receita, e assim como qualquer outro tipo de receita, deve ser seguida com rigor, para que o produto final do processo saia de acordo com o que foi calculado e planejado, por isso, essa causa obteve um NPR de 448.

O plano de ação executado para essa causa foi elaborar instruções de trabalho para o setor da betoneira e expô-los juntamente com a receita do concreto no local de trabalho, além disso, fazer com que o encarregado do setor garanta a execução da receita do concreto, para que o produto final (concreto) seja padronizado.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desse estudo foi: analisar a capacidade da resistência do concreto com cura de 7 dias. Para alcançá-lo, utilizamos as ferramentas e métodos do controle estatístico da qualidade. O processo foi destrinchado desde a adequação dos dados amostrais à uma distribuição de probabilidade, até a análise das suas causas potenciais de variação, para que pudesse ser aplicado um plano de ação relacionado ao resultado das análises dessas causas.

Para analisar a estabilidade do processo, primeiro definimos uma distribuição de probabilidade que descrevesse estatisticamente o processo. Foi feito um teste de normalidade (Anderson Darling), onde obtivemos um P-valor de 0,895 que nos revela uma ótima

adequação ao modelo, em seguida, plotamos as cartas de controle e analisamos que o processo não era estável, em virtude das causas especiais (variações além dos limites de controle) presentes nas cartas.

O limites de controle para os dados do tipo contínuo são calculados através das fórmulas para cartas de controle do tipo \bar{x} e R, obtivemos no primeiro momento para a carta \bar{x} , valores para os limites de controle superior, central e inferior, 30,07, 26,62 e 23,17, respectivamente. Para a carta R obtivemos para os limites de controle superior, central e inferior, 10,81, 4,74 e 0 respectivamente.

Com o auxílio da ferramenta 6M pudemos encontrar diversas causas para explicar a variabilidade e ineficiência do processo, após identificar as causas, excluimos os dados amostrais referentes a elas e recalculamos os limites de controle para que o processo não apresentasse nenhuma causa especial de variação. Os novos limites de controle superior, central e inferior para a carta \bar{x} foram: 30,28, 27,36 e 24,38, respectivamente. Para a carta R, de modo análogo, tivemos os valores de 9,24, 4,05 e 0, respectivamente.

Para analisar a capacidade do processo, calculamos os índices C_{pk} , PPM e nível sigma (Z_{bench}), que resultaram em 0,38, 124.322 e 1,15, respectivamente, os quais revelaram um resultado preocupante, com um processo produtivo que tem uma eficiência aproximada no valor de 88% (ou seja, 12% dos produtos não atingem a especificação mínima), reflexo de um processo que não possui o devido controle.

Por fim, elaboramos um plano de ação com auxílio da ferramenta FMEA, que através do seu indicador analítico NPR (número de prioridade de risco), nos auxilia na priorização das causas que apresentam maior impacto no processo produtivo. Encontramos 6 potenciais causas de falha com NPR no valor de 1000, 800, 560, 512, 448 e 392, para cada causa foi elaborado um plano de ação individual, visando eliminar ou reduzir os efeitos das mesmas.

Outros estudos podem ser aplicados para dar continuidade ao trabalho, são eles:

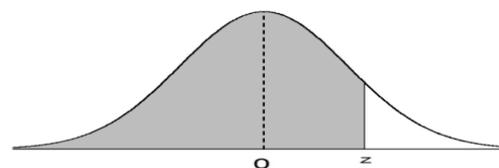
- O acompanhamento da eficiência dos planos de ação através da ferramenta FMEA (embora a ferramenta apresente o suporte para esse estudo, o autor do trabalho não pode analisa-lo);
- Dar continuidade à coleta de dados, mas desta vez, o acompanhamento dos resultados seria *online* o que possibilitaria uma melhor compreensão e definição das causas que geram variabilidade no processo, agilizando e facilitando a atuação sobre as mesmas.

ANEXOS

ANEXO A – Distribuição normal padrão acumulada

Distribuição Normal Padrão Acumulada

$$\Phi(z) = P(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du$$



z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
-3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
-3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
-2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
-0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
-0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995

ANEXO B - Fatores para Construção de Gráficos de Controle para Variáveis

APÊNDICE VI Fatores para Construção de Gráficos de Controle para Variáveis

Observações na Amostra, <i>n</i>	Gráfico para Médias			Gráficos para Desvios Padrão						Gráficos para Amplitudes						
	Fatores para Limites de Controle			Fatores para Linha Central		Fatores para Limites de Controle				Fatores para Linha Central		Fatores para Limites de Controle				
	<i>A</i>	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>c</i> ₄	1/ <i>c</i> ₄	<i>B</i> ₃	<i>B</i> ₄	<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₆	<i>d</i> ₂	1/ <i>d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>D</i> ₃	<i>D</i> ₄
2	2,121	1,880	2,659	0,7979	1,2533	0	3,267	0	2,606	1,128	0,8865	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	0,8862	1,1284	0	2,568	0	2,276	1,693	0,5907	0,888	0	4,358	0	2,575
4	1,500	0,729	1,628	0,9213	1,0854	0	2,266	0	2,088	2,059	0,4857	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	0,9400	1,0638	0	2,089	0	1,964	2,326	0,4299	0,864	0	4,918	0	2,115
6	1,225	0,483	1,287	0,9515	1,0510	0,030	1,970	0,029	1,874	2,534	0,3946	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	0,9594	1,0423	0,118	1,882	0,113	1,806	2,704	0,3698	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	0,9650	1,0363	0,185	1,815	0,179	1,751	2,847	0,3512	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	0,9693	1,0317	0,239	1,761	0,232	1,707	2,970	0,3367	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	0,9727	1,0281	0,284	1,716	0,276	1,669	3,078	0,3249	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	0,9754	1,0252	0,321	1,679	0,313	1,637	3,173	0,3152	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	0,9776	1,0229	0,354	1,646	0,346	1,610	3,258	0,3069	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	0,9794	1,0210	0,382	1,618	0,374	1,585	3,336	0,2998	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	0,9810	1,0194	0,406	1,594	0,399	1,563	3,407	0,2935	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	0,9823	1,0180	0,428	1,572	0,421	1,544	3,472	0,2880	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	0,9835	1,0168	0,448	1,552	0,440	1,526	3,532	0,2831	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	0,9845	1,0157	0,466	1,534	0,458	1,511	3,588	0,2787	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	0,9854	1,0148	0,482	1,518	0,475	1,496	3,640	0,2747	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	0,9862	1,0140	0,497	1,503	0,490	1,483	3,689	0,2711	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	0,9869	1,0133	0,510	1,490	0,504	1,470	3,735	0,2677	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	0,9876	1,0126	0,523	1,477	0,516	1,459	3,778	0,2647	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	0,9882	1,0119	0,534	1,466	0,528	1,448	3,819	0,2618	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	0,9887	1,0114	0,545	1,455	0,539	1,438	3,858	0,2592	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	0,9892	1,0109	0,555	1,445	0,549	1,429	3,895	0,2567	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	0,9896	1,0105	0,565	1,435	0,559	1,420	3,931	0,2544	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541

Para *n* > 25.

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad A_3 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}} \quad c_4 \approx \frac{4(n-1)}{4n-3}$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}} \quad B_4 = 1 + \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}}$$

$$B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}} \quad B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

APENDICE**APÊNDICE A – Dados de resistência do concreto**

Data da Coleta	Resistência após 7 dias (Mpa)	Data da Coleta	Resistência após 7 dias (Mpa)	Data da Coleta	Resistência após 7 dias (Mpa)
16/01/2018	28,7	15/06/2018	23,6	12/11/2018	23,3
16/01/2018	26,8	15/06/2018	33,4	12/11/2018	22,6
16/01/2018	24	15/06/2018	25,6	27/11/2018	29,4
16/01/2018	26	29/06/2018	25,5	27/11/2018	28,8
31/01/2018	29,8	29/06/2018	18,1	27/11/2018	27,1
31/01/2018	31,8	29/06/2018	29,8	27/11/2018	26,8
31/01/2018	24	29/06/2018	26,1	12/12/2018	27,5
31/01/2018	28,7	16/07/2018	25,7	12/12/2018	27,7
15/02/2018	27,7	16/07/2018	26,5	12/12/2018	26,8
15/02/2018	25,8	16/07/2018	27,4	12/12/2018	28,9
15/02/2018	25,9	16/07/2018	26,9	27/12/2018	27,3
15/02/2018	25,5	30/07/2018	23,9	27/12/2018	26,5
02/03/2018	24,4	30/07/2018	22,3	27/12/2018	28,4
02/03/2018	25,8	30/07/2018	22,4	27/12/2018	32
02/03/2018	24,7	30/07/2018	24,6	11/01/2019	27,3
02/03/2018	27,1	14/08/2018	24,9	11/01/2019	27,6
16/03/2018	27,7	14/08/2018	23,3	11/01/2019	28
16/03/2018	26,7	14/08/2018	28	11/01/2019	27,5
16/03/2018	24	14/08/2018	28,5		
16/03/2018	28,4	29/08/2018	29,5		
02/04/2018	29,5	29/08/2018	28,3		
02/04/2018	30	29/08/2018	26,4		
02/04/2018	29,2	29/08/2018	27,1		
02/04/2018	27,6	13/09/2018	26,3		
16/04/2018	30,4	13/09/2018	25,9		
16/04/2018	24,4	13/09/2018	31,5		
16/04/2018	28	13/09/2018	28,2		
16/04/2018	25,7	28/09/2018	25,1		
01/05/2018	23,7	28/09/2018	26,7		
01/05/2018	29,2	28/09/2018	26,2		
01/05/2018	30,7	28/09/2018	25,5		
01/05/2018	27,2	15/10/2018	24,7		
16/05/2018	33,5	15/10/2018	26,9		
16/05/2018	31,4	15/10/2018	32,3		
16/05/2018	30	15/10/2018	29,9		
16/05/2018	23,4	29/10/2018	13,5		
31/05/2018	22,8	29/10/2018	12,1		
31/05/2018	24,7	29/10/2018	24,2		
31/05/2018	23,8	29/10/2018	19,1		
31/05/2018	23,3	12/11/2018	25,6		
15/06/2018	22,8	12/11/2018	22		

REFERÊNCIAS

- AIAG. (2005a). *Controle Estatístico do Processo - CEP - Segunda Edição*.
- AIAG. (2005b). **Statistical Process Control SPC**. In *Journal of Visual Languages & Computing* (2nd ed., Vol. 11). Michigan.
- Cesar Ribeiro Carpinetti, L. (2016). *Gestão da qualidade - conceitos e técnicas* (3rd ed.).
- Gonçalez, P. U., & Werner, L. (2009). Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. *Gestão & Produção*.
- Leider, S., & Riberio, M. S. M. de C. (2005). **O CICLO PDCA COMO FERRAMENTA DA QUALIDADE TOTAL. 1**. Retrieved from <http://www.unisalesiano.edu.br/encontro2007/trabalho/aceitos/CC04099565629B.pdf>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (1994). **CONCRETO: MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES E MATERIAIS**.
- Montgomery, D. C. (2009). **Introduction to Statistical Quality Control**. *Development*.
- Moura, C. (2000). **ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL - Segunda Edição**.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2013). *Tecnologia do concreto* (2ª).
- Nogueirol Lobo, R. (2010). *Gestão da qualidade* (1ª).
- Righi, M. D. M. (2009). **Sistema De Controle Da Qualidade E Planejamento De Curto Prazo Na Construção Civil: Integração E Compartilhamento De Informações**. *Trabalho de Diplomação (Graduação Em Engenharia Civil) – UFRGS*, 1–75.
- Sergio De Arantes, A. (1998). *Padronizacao Participativa Nas Empresas De Qualidade*.
- W. Snedecor, G., & G. Cochran, W. (1989). *Statistical methods* (8ª).
- Wu, C. W., Pearn, W. L., & Kotz, S. (2009). An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. *International Journal of Production Economics*, 338–359.