

BRUNO ANDERSON COSTA

**ESTUDO DO CONTROLE DA ESTABILIZAÇÃO DE PESO E
MOMENTO ESTÁTICO EM PÁS EÓLICAS**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Certificado
de Especialista em Gestão e
Engenharia de Qualidade
MBA/USP.

Coordenador: Prof. Dr. Adherbal
Caminada Netto

São Paulo

2016

HIBALCA
C873e

Catálogo-na-publicação

3790396

Costa, Bruno Anderson

ESTUDO DO CONTROLE DA ESTABILIZAÇÃO DE PESO E MOMENTO
ESTÁTICO EM PÁS EÓLICAS / B. A. Costa – São Paulo, 2016.

61 p.

Monografia (MBA em Gestão e Engenharia da Qualidade) - Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação
Continuada em Engenharia.

1.Engenharia 2.Estatística 3.CEP 4.Energia Eólica 5.Fibra de Vidro
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de
Educação Continuada em Engenharia II.t.



Escola Politécnica - EPMN



31600007609

RESUMO

Com o aumento da demanda por energia elétrica no Brasil, o governo nos últimos anos decidiu diversificar a matriz energética brasileira. Uma das fontes de maior destaque é a energia vinda da força dos ventos. Dentre os componentes do aerogerador, um dos papéis mais importantes é exercido pelas pás, geralmente fabricadas em compostos de plásticos reforçados de fibras de vidro, para que possam atingir comprimentos maiores que 60 metros e mesmo assim possuir baixos valores de massa. Como o processo de fabricação é manual e depende muito da habilidade e percepção dos operadores, ferramentas de controle estatístico do processo não são comumente utilizadas nos fabricantes deste componente. Tendo em vista a criticidade das características de peso e momento linear estático no funcionamento estável do aerogerador, este trabalho sugere o estudo para controle destas características utilizando ferramentas de controle estatístico e estudo de causa raiz para detecção do problema.

Palavras-chave: Pá. Eólica. Aerogerador. Peso. Momento linear. Ishikawa. Carta de controle. Cinco Porquês. Estabilização.

ABSTRACT

With the increase of demand for electricity in Brazil, the government in the last years decided to diversify Brazilian energetic matrix. One of the most featured sources today is the power coming from the winds. Among the components of an wind turbine, one of the most important roles is done by blades, usually produced in fiberglass reinforced plastics, in order to make feasible to reach more than 60 meters and even though low values of mass. Once the manufacturing process is mostly manual and highly dependent of operator's skills, statistical process control tools are not commonly used in blades main manufacturers. Having in mind how critical these characteristics of weight and static linear momentum for stable operation of the wind turbine are, this work suggests the study for these characteristics control using statistical process control tools and root cause analysis for detection and correction of the problem.

Keywords: Blade. Eolic. Wind turbine. Weight. Linear momentum. Ishikawa. Control chart. Five Whys. Stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de aerogeradores	13
Figura 2 - Evolução dos aerogeradores ao longo do tempo.....	14
Figura 3 - potencial eólico brasileiro em torres de 50m de altura	15
Figura 4 - estrutura típica de uma pá eólica.	16
Figura 5 - Típicas regiões de uma pá eólica.....	16
Figura 6 - Fluxograma de processo simplificado de uma pá eólica.....	18
Figura 7 - Processo de laminação manual de tecidos.....	19
Figura 8 - esquema do processo de infusão a vácuo.....	20
Figura 9 - Processo de infusão de pás eólicas.....	20
Figura 10 - Processo de colagem e fechamento.	21
Figura 11 - Exemplo de cartas de controle: baixo controle estatístico (a) e fora de controle estatístico (b)	24
Figura 12 - Carta de controle para médias	25
Figura 13 - Carta de controle para amplitude	25
Figura 14- Distribuição subgrupos 1-30.....	30
Figura 15 – Carta de controle de médias para o peso - subgrupos 1-30	31
Figura 16 – Carta de controle da amplitude do peso - subgrupos 1-30.....	31
Figura 17 - Distribuição dos valores para o momento linear estático (subgrupos 1-30).....	33
Figura 18 - Carta de controle das médias de momento linear estático - subgrupos 1-30	34
Figura 19 - Carta de controle das amplitudes do momento linear estático - subgrupos 1-30	35
Figura 20 - Diagrama de Ishikawa para o peso acima do especificado.....	36
Figura 21 - Distribuição dos valores de peso - subgrupos 31-60	40
Figura 22 - Carta de controle das médias de peso - subgrupos 31-60.....	40
Figura 23 - Carta de controle das amplitudes - subgrupos 31-60.....	41
Figura 24 - Distribuição dos valores de momento linear estático para os subgrupos 31-60	42
Figura 25 - Carta de controle das médias de momento linear estático - subgrupo 31-60	43
Figura 26 - Carta de amplitudes para o momento linear estático - subgrupos 31-60	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise dos cinco porquês	37
Tabela 2 - Plano de melhorias do processo	38

ABREVIATURAS

PRFV – Plástico Reforçado em Fibra de Vidro

TEEV – Turbina Eólica de Eixo Vertical

TEEH – Turbina Eólica de Eixo Horizontal

Kg – Quilograma

Kgf.m – Quilograma-força metro

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

m – Metro

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CEP – Controle Estatístico do Processo

LSC – Limite Superior de Controle

LIC – Limite Inferior de Controle

LSC_R – Limite Superior de Controle para as amplitudes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	11
1.2	Escopo do trabalho	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	Histórico e mercado de aerogeradores	13
2.2	Mercado brasileiro	14
2.3	Estrutura de uma pá eólica.....	15
2.4	Matérias-primas utilizadas.....	16
2.5	Processos de fabricação	17
2.5.1.	Corte de tecidos.....	17
2.5.2.	Laminação manual	18
2.5.3.	Infusão por bolsa de vácuo.....	19
2.5.4.	Colagem das vigas e fechamento das conchas.....	20
2.5.5.	Balanceamento do rotor	21
2.6	Ferramentas utilizadas	22
2.6.1.	CEP – Controle Estatístico do Processo	22
2.6.2.	Carta de controle por variáveis	23
2.6.3.	Diagrama de Ishikawa	26
2.6.4.	Cinco Porquês	27
3	ESTUDO DO CASO	29
3.1	Situação inicial	29
3.1.1.	Avaliação do controle estatístico do peso (subgrupos 1 - 30).....	29
3.1.2.	Avaliação do controle estatístico do momento linear estático (subgrupos 1 - 30).....	32
3.2	Estudo de causa raiz.....	35
3.3	Resultado do estudo de causa raiz (subgrupos 31-60).....	39

3.3.1. Resultado obtido para o peso (subgrupos 31-60).....	39
3.3.2. Resultado obtido para o momento linear estático (subgrupos 31-60) 42	
4 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXO A	48
ANEXO B	49
ANEXO C	50
ANEXO D	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal, apresentar o estudo de estabilização das propriedades de massa e momento linear estático de pás fabricadas em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), utilizadas na construção de turbinas geradoras de energia eólica.

Os processos de fabricação e as matérias-primas envolvidas no produto possuem grande influência nas propriedades finais do produto, e estas se acentuam em um componente de 50 metros de comprimento e massa maior de 8.000 quilogramas. Variações no peso da ordem de cinco por cento acima da tolerância máxima estabelecida em desenho são suficientes para rejeição do produto, pois o terreno onde será instalado o aerogerador não suportará tal incremento de peso na estrutura. Para o momento linear estático, variações de cerca de dois por cento acima da especificação não são aceitáveis, pois as vibrações da máquina sofrerão um aumento tal que pode causar a falha dos prisioneiros de fixação da pá no rolamento por fadiga.

Alguns conceitos de projeto, montagem e construção de aerogeradores serão ilustrados, para facilitar o entendimento e a importância destas características.

Aqui também serão apresentadas as ferramentas utilizadas para identificar as causas prováveis e com maior influência no descontrole das propriedades, as ações tomadas e os resultados obtidos.

1.2 Escopo do trabalho

O trabalho consiste em avaliar as variações da quantidade de matéria-prima dos processos de fabricação de pás eólicas fabricadas em PRFV instaladas em um rotor de 97 metros de diâmetro.

As pás objetos do estudo possuem 47,5 metros de comprimento, e possuem um peso nominal especificado de 8.472 kg e momento linear estático de 118.052 kgf.m. Devido à falta de controle dos processos de fabricação, 100% da população avaliada estavam próximas ao peso limite especificado de 8.682 kg. Os valores de 25% das 200 primeiras pás produzidas estavam inclusive superiores a esta especificação. Estas ocorrências causavam a

necessidade de solicitação de aprovação do cliente e, em caso de uma resposta negativa, retrabalhos na pá para reduzir seu peso.

Visto que a necessidade de aprovação do cliente causava um atraso no faturamento do produto devido a necessidades de cálculos de engenharia, optou-se por realizar um estudo de quais os pontos que poderiam estar causando este excesso de peso no produto. Para isto, utilizaram-se as seguintes ferramentas:

- Controle Estatístico do Processo verificando a característica “peso” e “momento linear estático”;
- Diagrama de Ishikawa para avaliar as possíveis causas envolvidas;
- 5 porquês, para avaliar as causas raízes.

Após a identificação das causas, originou-se um plano de ações onde o objetivo era corrigir e reduzir o peso da pá, e encontrar uma forma de padronizar a distribuição de seu peso, visando reduzir a variação do momento linear estático também.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico e mercado de aerogeradores

A energia eólica surgiu de forma economicamente viável e em escala comercial por volta da década de 1970, devido ao aumento do preço do petróleo no final da década de 1960 (CAIMS; RIDDLE; NELSON, 2011).

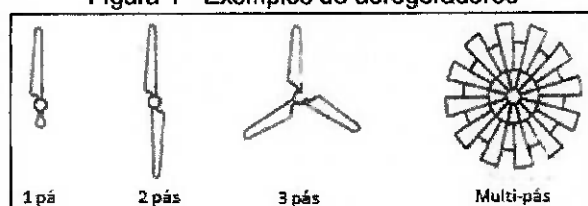
Distintos projetos de aerogeradores foram desenvolvidos ao longo dos tempos buscando a melhor relação eficiência comparados ao custo. Basicamente, eles se dividem em dois tipos (SCHUBEL, 2012):

- Turbina eólica de eixo vertical (TEEV);
- Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

Neste trabalho, tratar-se-á somente de turbinas eólicas de eixo horizontal, interesse de estudo.

Turbinas eólicas de eixo horizontal podem ter uma, duas, três ou mais pás instaladas. Devido a fatores relacionados à eficiência do equipamento, aerogeradores modernos possuem três pás instaladas.

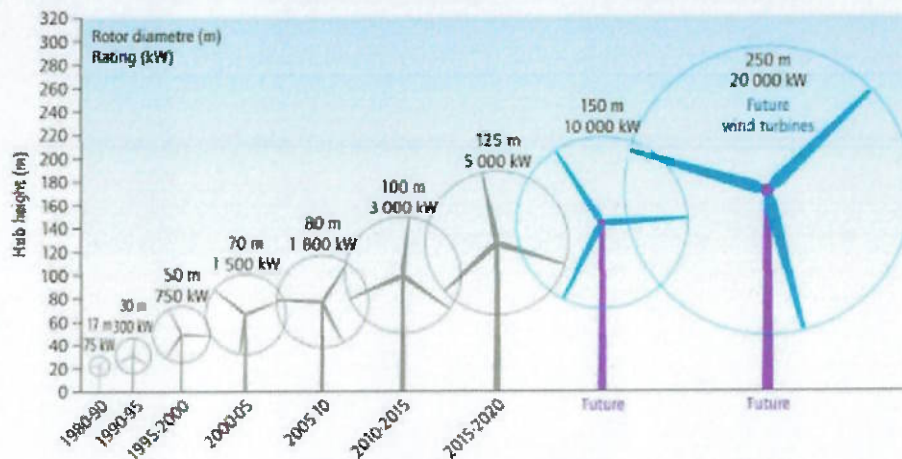
Figura 1 - Exemplos de aerogeradores



Com relação aos materiais utilizados, distintas tentativas foram realizadas em fabricar pás em metal fundido ou usinado, entretanto, as pás insistiam em falhar após algumas centenas de horas de operação (MISHNAEVSKY, 2012).

Aproveitando o embalo da corrida espacial na década de 1960, estudos feitos em materiais compósitos tomaram força, e expandiram-se para a área de fabricação de aerogeradores, uma vez que, para o equipamento gerar uma quantidade de energia de forma a se tornar viável economicamente, rotores de diâmetros de cerca de 20 metros eram necessários. Atualmente, os rotores encontram-se entre diâmetros de 90 e 130 metros. A Figura 2 ilustra esta evolução ao longo das décadas.

Figura 2 - Evolução dos aerogeradores ao longo do tempo.



Fonte: adaptado da EWEA

2.2 Mercado brasileiro

Desde 2008, o mercado brasileiro passa por uma crise energética devido à redução de chuvas nos reservatórios onde estão instaladas as usinas hidrelétricas. Logo, para não reduzir a produção industrial e manter as necessidades básicas da população, o governo vê-se obrigado a ativar usinas termelétricas, que ocorrem em um custo 100% maior por quilowatt que as usinas hidrelétricas. Além de o custo envolvido ser maior que o de outras fontes de energia renováveis, o governo passou a partir deste mesmo ano a lançar leilões de fontes alternativas de energia, sendo alguns dedicados exclusivamente à construção de usinas eólicas.

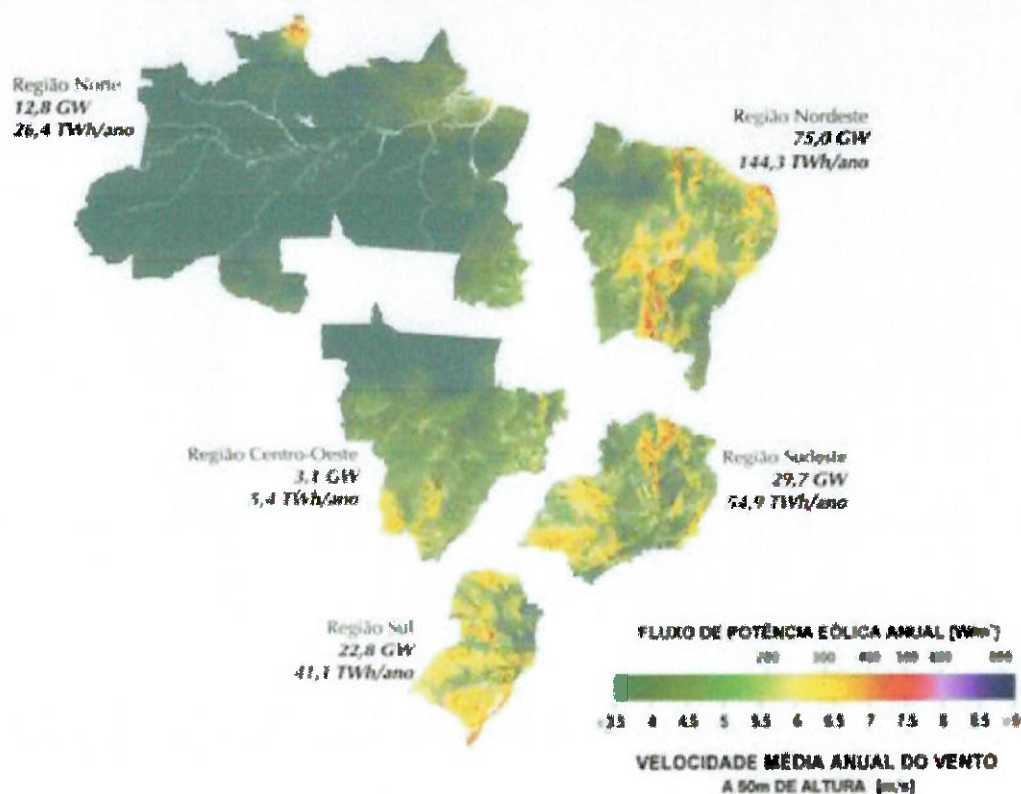
Coincidentemente, nos meses onde há maior atividade de chuvas no Brasil (Outubro a Março) há menor intensidade de ventos. Por outro lado, no período de ventos constantes (Abril a Setembro), há uma redução drástica na quantidade de chuvas no Brasil (CHAIM, 2011). Assim sendo, a matriz de energia brasileira está sendo diversificada para que se reduza a dependência das usinas termelétricas.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) a capacidade instalada no Brasil atualmente ultrapassa os oito Gigawatts, com potencial para chegar a 143 Gigawatts, considerando torres de 50 metros de altura (AMARANTE et al, 2001). Abaixo, a Figura 3 mostra o potencial dividido por regiões.

Observa-se claramente que o potencial eólico é maior no Nordeste do país, concentrando cerca de quase 50% da capacidade brasileira de gerar energia através da construção de usinas eólicas. Em segundo lugar, vem a região Sudeste, graças à região norte do estado de Minas Gerais. Em seguida, o extremo Sul do país apresenta um grande potencial, na região dos pampas gaúchos.

Um novo atlas nacional está em elaboração e, como a altura das torres instaladas atualmente no Brasil ultrapassa os 100 metros, a tendência que este potencial seja ainda maior. Entretanto, enquanto o novo atlas não é lançado oficialmente, os dados oficiais permanecem os das referências de 2001.

Figura 3 - potencial eólico brasileiro em torres de 50m de altura.



Fonte: CEPEL, 2001.

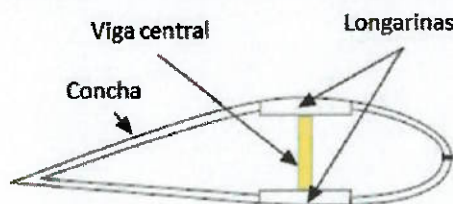
2.3 Estrutura de uma pá eólica

As pás eólicas fabricadas em PRFV comumente são projetadas para ter um peso relativamente baixo, rigidez estrutural, resistência à fadiga e operar continuamente ao longo de 20 anos. Além disso, devem possuir uma forma

aerodinâmica semelhante a uma asa de uma aeronave, de forma a direcionar o vento para uma superfície específica.

Normalmente, o formato de uma pá com tamanho maior que 40 metros é o representado na Figura 4, junto com seus componentes principais. Pode-se citar que o número de vigas de cisalhamento pode ser variável, assim como a presença ou não das longarinas.

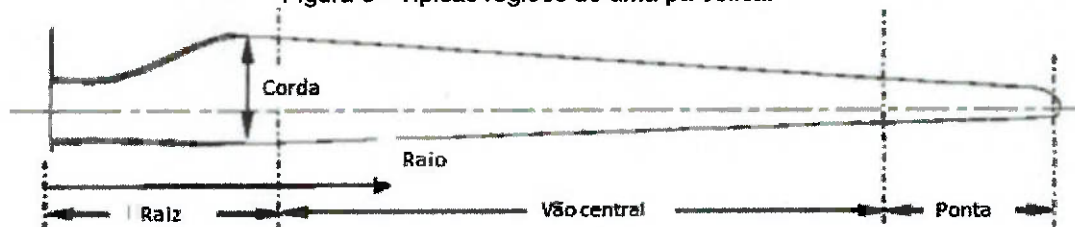
Figura 4 - estrutura típica de uma pá eólica.



Fonte: GURIT Foam Technologies

De forma a entender melhor as referências utilizadas neste trabalho, abaixo se encontra a Figura 5, representando uma pá e suas principais zonas de referência. Basicamente, o ponto de origem de uma pá é denominado raiz, ou seja, o ponto onde é feita a união com o rotor. A Figura 5 ilustra as principais regiões de uma pá eólica.

Figura 5 - Típicas regiões de uma pá eólica.



Fonte: adaptado de Windpower Engineering.

2.4 Matérias-primas utilizadas

Hoje em dia, existem distintos conceitos de projeto de pás eólicas e variados materiais para sua fabricação. Um dos materiais mais comumente utilizados é a fibra de vidro disposta em tecidos uni ou multidirecionais, disposta dentro de uma matriz de resina epóxi ou poliéster. Normalmente, a distribuição de peso por matéria prima utilizada é:

- Fibra de vidro: 55%

- Resina: 25%
- Madeira ou espuma: 10%
- Adesivo, aços, entre outros: 10%

Como é possível observar acima, devido ao percentual de fibra de vidro presente na pá, qualquer alteração de processo que influencie sua quantidade pode causar uma grande variação no peso do produto final.

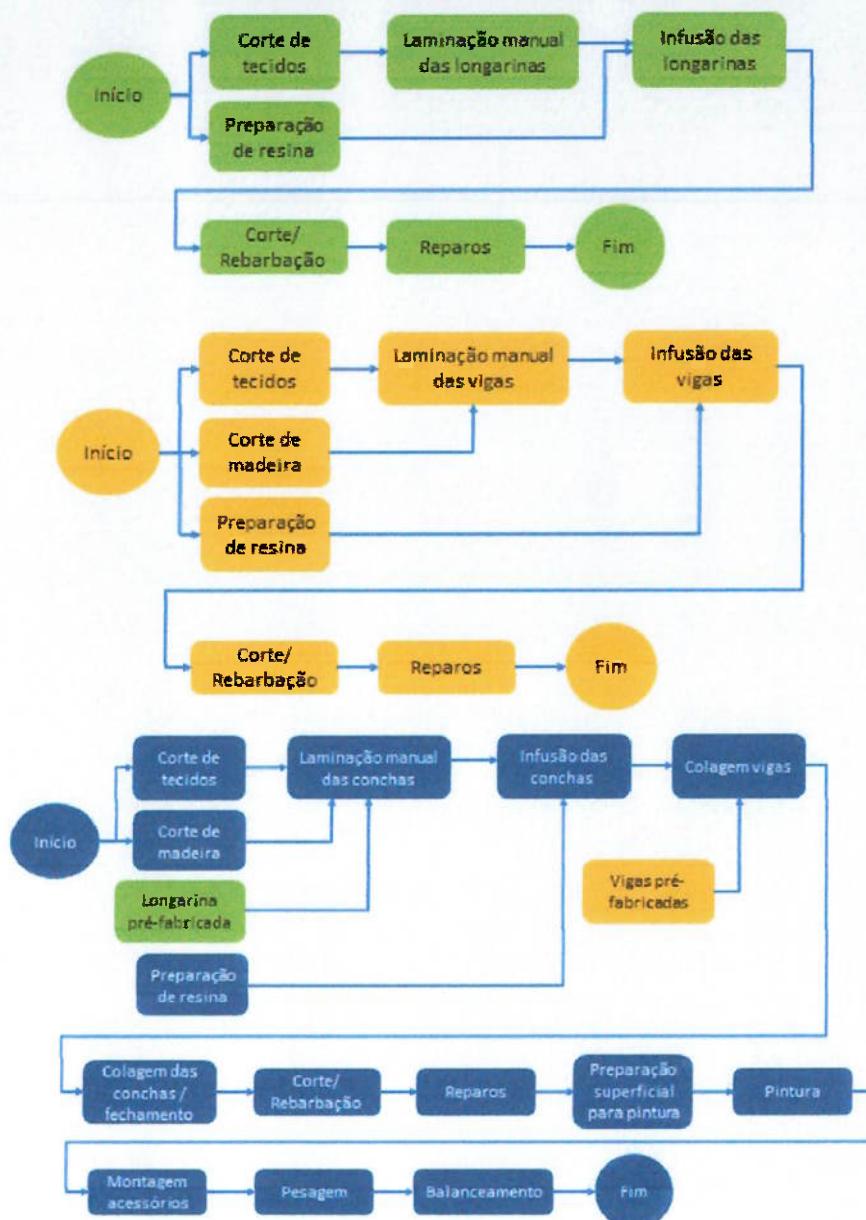
2.5 Processos de fabricação

Para fabricar pás eólicas, comumente o fluxo de processo consiste em cortar o tecido em tamanhos pré-determinados, respeitando os tamanhos definidos no projeto do produto; laminação manual das camadas no molde, com direito a sobreposições, se necessário; infusão de resina por meio da utilização de vácuo; colagem das vigas pré-fabricadas e posterior fechamento da pá; rebarbação; inspeção da superfície exterior e eventuais reparos, se necessário; lixamento da superfície para pintura; pintura; montagem final de acessórios; pesagem e balanceamento da pá. O fluxo esquemático está representado na Figura 6:

2.5.1. Corte de tecidos

O processo de corte de tecidos normalmente é feito de forma manual e com o auxílio de tesouras. Algumas companhias empregam o uso de máquinas de corte com cabeçotes controlados por Comando Numérico Computadorizado (CNC). As especificações nesta etapa contemplam o corte de tecido com uma tolerância que cubra a necessidade de realizar uma emenda de tecidos durante a laminação manual através de sobreposição de camadas, algo que normalmente não é contemplado no projeto do produto.

Figura 6 - Fluxograma de processo simplificado de uma pá eólica



Fonte: autor

2.5.2. Laminação manual

O processo de laminação manual consiste na montagem das camadas de fibra de vidro de acordo com o projeto de engenharia. Normalmente, onde há emendas de tecido, é necessária uma sobreposição entre 50 e 100 mm para garantir a integridade estrutural do laminado. A Figura 7 ilustra o processo em um fabricante de pás no Brasil.

Em certas zonas também se utiliza madeira ou espuma, de forma a propiciar um laminado mais rígido e com baixa densidade, que se curve menos durante a operação.

Figura 7 - Processo de laminação manual de tecidos



Fonte: Google Imagens

2.5.3. Infusão por bolsa de vácuo

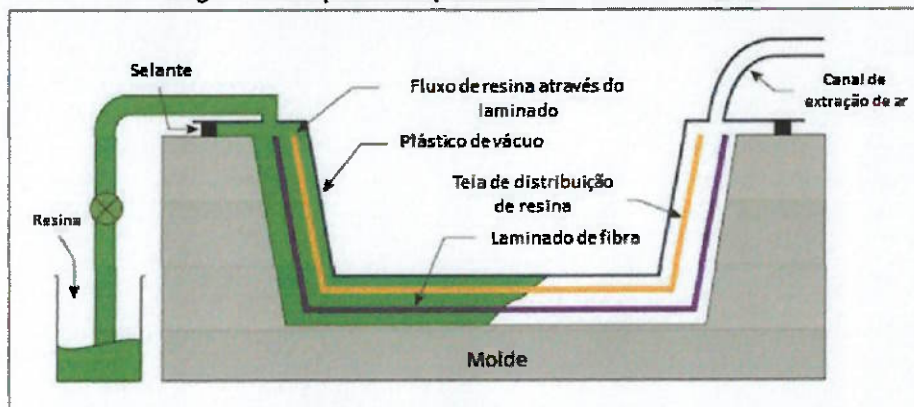
O processo de infusão por bolsa de vácuo consiste em realizar a umectação do laminado já montado com resina, de forma a montar o combinado matriz-fibra de vidro característico do material composto.

Usualmente, fabricantes de pás eólicas utilizam o processo de infusão por bolsa de vácuo por ter um custo menor que outros processos de fabricação de laminados de material composto, tais como fibras pré-impregnadas. Entretanto, o processo de infusão requer maior experiência para evitar regiões de fibra seca ou até mesmo umidade no laminado, que podem causar microbolhas e diminuir a resistência à fadiga do produto acabado (CAIMS; RIDDLE; NELSON, 2011).

Normalmente, com o laminado montado sobre o molde, se colocam telas para facilitar o fluxo de resina, respiradores por onde o ar presente no laminado irá fluir, linhas de fluxo de resina, e, por fim, uma bolsa de plástico resistente a perfurações. Em seguida, em um lado da linha conectam-se bombas de vácuo e do outro lado os baldes de resina. Enquanto o ar está sendo removido, de forma a manter a pressão interna da bolsa de vácuo equalizada com a pressão atmosférica externa, a resina é sugada para dentro do laminado, molhando as

fibras e a madeira, até que se substitua todo o ar presente no laminado por resina. A Figura 8 representa o processo de forma esquemática, e em seguida, um exemplo real de como se apresenta um processo de infusão de pás.

Figura 8 - esquema do processo de infusão a vácuo.



Fonte: adaptado de GURIT WE Handbook

Figura 9 - Processo de infusão de pás eólicas.



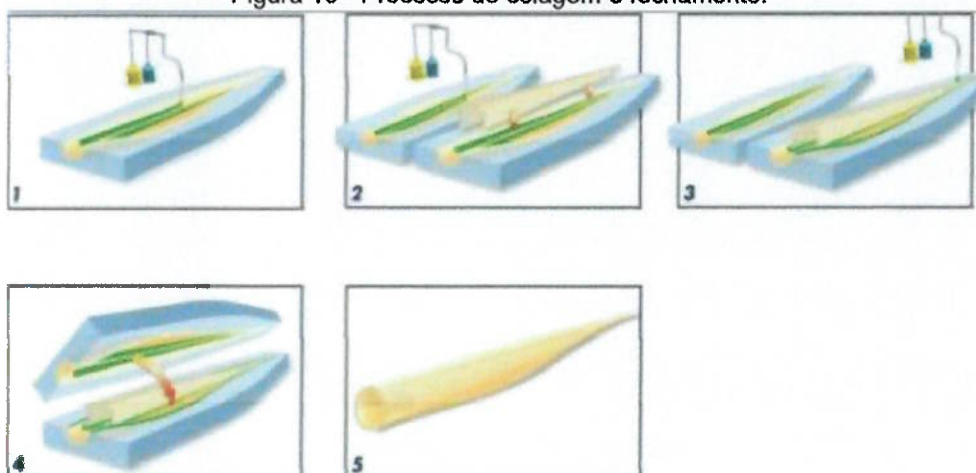
Fonte: Seaway Technologies

2.5.4. Colagem das vigas e fechamento das conchas

A fixação das vigas de cisalhamento é feita a partir da aplicação de adesivo de caráter estrutural, com o auxílio de aplicadores e uma máquina misturadora ou de forma manual, com o auxílio de uma espátula. Para fins estruturais, a espessura do adesivo não é importante, desde que se tenha um mínimo de contato contínuo entre as faces que se deseja unir. É essencial

garantir em todas as áreas de união que haja contato entre as superfícies de colagem. Logo, esta boa adesão se verifica a partir da extrusão do excesso de adesivo nas extremidades da junta colada. Normalmente, o excesso de adesivo é removido nos 10 a 15 metros mais próximos da raiz da pá, por conta da facilidade de acesso de uma pessoa comum. Abaixo, a Figura 10 representa esquematicamente o passo a passo de um processo de colagem de pás: a imagem número 1 representa a aplicação de adesivo estrutural na concha inferior. Na sequência, está representada a aplicação de adesivo na concha superior e o posicionamento das vigas sobre o adesivo aplicado na concha inferior. Logo, aplica-se (imagem 3) adesivo no flange das vigas já posicionadas na concha inferior, para então prosseguir-se com o fechamento da concha superior sobre a concha inferior (4) e por fim a desmoldagem da pá após a cura do adesivo (5).

Figura 10 - Processo de colagem e fechamento.



Fonte: Google Imagens

2.5.5. Balanceamento do rotor

Devido às tolerâncias envolvidas desde a matéria-prima, ao processo manual empregado e ao consumo de matéria-prima nunca ser exatamente o mesmo em cada pá eólica, cada número de série do produto fabricado é único. Independentemente de quantos controles se apliquem para uniformizar o processo, garantir que todas as pás obtenham o mesmo momento linear estático é inviável, senão impossível.

O balanceamento do rotor, ou seja, das três pás instaladas em um mesmo aerogerador é primordial e mandatório para que, devido às cargas centrífugas envolvidas na operação do aerogerador o mesmo não sofra com vibrações que podem reduzir a vida útil de alguns componentes estruturais ou até mesmo cause a falha catastrófica do equipamento.

O momento linear estático está diretamente relacionado à distribuição de peso ao longo do comprimento da pá. Isto é, conforme a distribuição de peso se concentra na ponta da pá, o valor do momento linear estático aumenta de forma análoga a:

$$M = m.g.D, \text{ onde:}$$

M: Momento linear estático;

m: massa do objeto;

g: aceleração da gravidade;

D: Distância desde o ponto de fixação.

Em uma pá eólica, pode-se considerar D a distância desde o centro do rotor do aerogerador, distante aproximadamente um metro do ponto de fixação da raiz da pá. Logo, para efetuar a operação de balanceamento do rotor formado, escolhe-se a pá com maior momento linear estático e define-se que as outras duas pás devem atingir o mesmo valor de momento, através da adição de peso em pontos pré-determinados da pá (caixas de balanceamento, previstas em projeto).

A adição de peso dá-se por meio de utilização de areia de sílica misturada com resina utilizada em laminações manuais, de cura rápida. Obviamente, para fins de acrescentar o mínimo possível de peso na pá, o processo inicia-se a partir das caixas localizadas na ponta da pá.

2.6 Ferramentas utilizadas

2.6.1. CEP – Controle Estatístico do Processo

Resumidamente, o CEP prega que o controle da qualidade deve ser conduzido simultaneamente com a manufatura do produto, através do controle do processo, ao invés da inspeção do produto após a produção (controle do produto). Consequentemente, deve-se atacar o problema dentro do processo (o causante) que gerou o defeito que reparar somente o produto não conforme (efeito do problema) (RAMOS, 2010).

Dentre as diversas vantagens de utilização do CEP, podem-se listar duas que estão diretamente relacionadas com este trabalho:

- i) Reduzir a variabilidade das características dos produtos, de forma a obter uma maior uniformidade dos itens produzidos;
- ii) Permitir a determinação da real viabilidade de atender às especificações do produto em condições normais de operação.

Dentre as ferramentas utilizadas no controle estatístico do processo, podemos citar como a mais importante, a carta de controle. A carta de controle possui os seguintes objetivos:

- i) Verificar se o processo estudado é estatisticamente estável;
- ii) Verificar se o processo estudado permanece estável;
- iii) Permitir o aprimoramento contínuo do processo.

A partir da construção da carta de controle, é possível observar a amplitude do processo e calcular a capacidade do processo de fabricar produtos dentro das especificações e limites de engenharia. No entanto, para identificar as causas do processo que geram os problemas no produto fabricado, outra ferramenta de qualidade é necessária.

2.6.2. Carta de controle por variáveis

Cartas de controle são ferramentas estatísticas utilizadas para medir o desempenho de um processo de fabricação ou de medição de um produto. Os resultados obtidos a partir desta ferramenta possibilita avaliar se um processo está estatisticamente estável.

Na ocasião de não estar baixo controle estatístico, pode-se utilizar seus dados como ponto de partida para melhorias de processo e redução das variabilidades do mesmo, de forma a obter um produto mais confiável e com menores riscos de estar fora dos limites determinados pelo cliente.

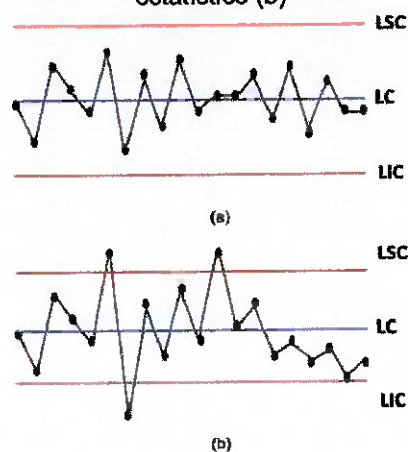
Segundo OLIVEIRA, et. al (2013), quando todos os pontos amostrais estão dentro dos limites de controle, o processo está sob controle estatístico. Entretanto, se houver um ou mais pontos fora dos limites calculados de controle, o processo encontra-se fora de controle estatístico. Dessa forma, deve-se iniciar um estudo de causa raiz para entender e eliminar as causas especiais do processo de fabricação.

Cartas de controle também são conhecidas por cartas de Shewhart. A teoria de gráficos de controle foi inicialmente proposta por Walter Shewhart na década de 1920 e segundo o autor, tem por objetivo:

- i) Mostrar evidências de que um processo está operando sob controle estatístico;
- ii) Detectar a presença de causas especiais de variação;
- iii) Monitorar e aprimorar o desempenho do processo.

Cartas de controle podem ser divididas em dois subtipos distintos: Carta de Controle por Variáveis e Carta de Controle por Atributos. O segundo tipo não será abordado neste trabalho por não se tratar do escopo do mesmo.

Figura 11 - Exemplo de cartas de controle: baixo controle estatístico (a) e fora de controle estatístico (b)



Fonte: Google Images

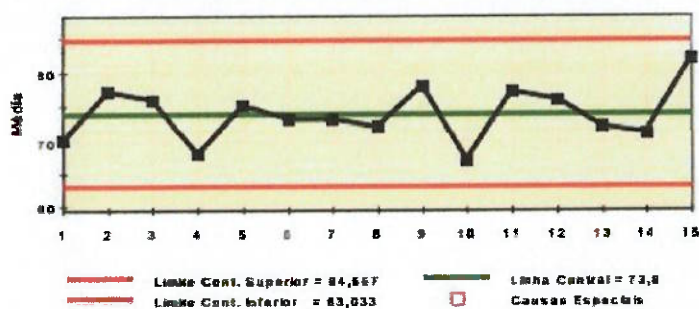
No caso de Cartas de Controle por Variáveis, as características a serem medidas devem ser numericamente mensuráveis, sendo dessa forma aplicável a grandezas como massa, comprimento, diâmetro, pH, entre outros.

Quando se trabalha com variáveis quantitativas no controle estatístico do processo, é necessário monitorar o valor médio e a amplitude do processo. Estes controles podem ser realizados a partir da utilização de duas cartas que trabalham em conjunto. A carta de controle para médias de uma amostra, definida como $\bar{X}$, e a carta de amplitude R . Importante ressaltar que as seguintes condições devem ser obedecidas para realizar uma análise com a utilização destas cartas:

- A distribuição dos valores dentro do intervalo deve obedecer a uma distribuição normal;
- As duas cartas devem ser utilizadas em conjunto. Individualmente as cartas não possuem serventia alguma;
- A interpretação da carta deve ser realizada e caso julgue necessário, o analista deve estudar as causas envolvidas para reduzir as variabilidades e aumentar a capacidade do processo;
- As cartas devem ser refeitas e os limites de controle reavaliados sempre que um estudo para melhorar a capacidade do processo seja concluído.

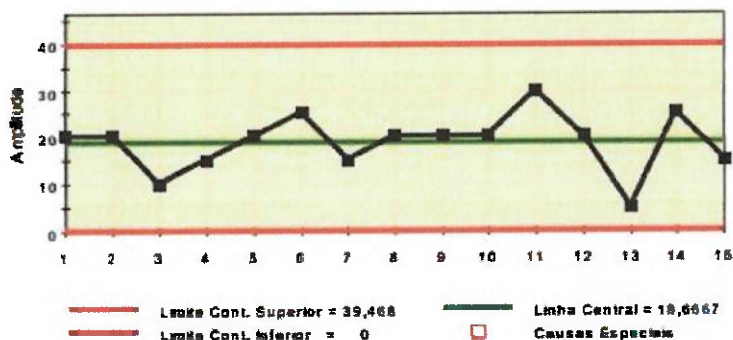
Exemplos de cartas de controle para médias e amplitudes são ilustrados abaixo:

Figura 12 - Carta de controle para médias



Fonte: Controle Estatístico do Processo, Ribeiro e Caten, 2012

Figura 13 - Carta de controle para amplitude



Fonte: Controle Estatístico do Processo, Ribeiro e Caten, 2012

Para efetuar o cálculo dos limites de controle, devem-se seguir os seguintes passos:

- Definir quais processos e parâmetros serão avaliados;

- Estabelecer meios de medição e recursos necessários;
- Escolher o tipo de carta de controle.

Feito isto, deve-se estabelecer a quantidade de subgrupos que será objeto de análise e o tamanho da amostra (n). Normalmente, para uma análise satisfatória, utilizam-se para análise entre 20 a 30 subgrupos com até 10 amostras presentes em cada subgrupo.

Em seguida, calculam-se os limites superior e inferior de controle e para isto utilizam-se valores tabelados de acordo com o tamanho da amostragem do subgrupo. Tais valores foram retirados de CONTADOR (2010) e são descritos no ANEXO B.

Por último, com os dados em mãos, constrói-se a carta de controle e interpreta-se a carta de controle.

2.6.3. Diagrama de Ishikawa

De acordo com Miguel (2006) o Diagrama de Ishikawa é uma das "Sete Ferramentas Tradicionais da Qualidade". Criado em 1943 por Kaoru Ishikawa, também é conhecido como diagrama de causa e efeito, ou "espinha de peixe", esta ferramenta tem como princípio dispor fatores de influência (causas) sobre um determinado problema (efeito) em uma forma simples e fácil de visualizar. Entretanto, cada uma das etapas abaixo deve ser seguida para realizar um diagrama de causa e efeito adequado (MIGUEL, 2006):

- 1) Identificação do problema onde se deseja atuar;
- 2) *Brainstorming* ou Tempestade de ideias;
- 3) Disposição das ideias no diagrama, distribuindo-as entre as seis possíveis categorias onde pode estar localizada a causa;
- 4) Testar cada uma das possíveis causas para verificar sua real capacidade de ter causado o problema.

Kaoru Ishikawa define que as possíveis causas de um problema estão sempre relacionadas a uma das 6 categorias seguintes:

- Mão-de-obra: qualquer possível causa relacionada a falha humana ou às pessoas, incluindo seu grau de instrução e capacitação para a tarefa;

- **Matéria-prima:** causas relacionadas a componentes, insumos e matéria-prima utilizada na confecção do produto. Pode conter causas relacionadas à má especificação dos componentes;
- **Máquina:** fatores relacionados mau funcionamento dos equipamentos, meios de produção ou ferramentas;
- **Método:** especificação de processo incorreta, sequência de operação de tarefas, forma de utilização dos equipamentos e ferramentas incluem possíveis falhas nesta categoria;
- **Meio-ambiente:** condições de fabricação inadequadas, falhas de sistemas de condicionamento da matéria-prima ou do ambiente de produção;
- **Medição:** causas devido a meios de medição, testes e provas no processo ou produto inadequadas podem ser encaixadas nesta categoria.

O Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta largamente utilizada na indústria por ser de fácil construção e interpretação visualmente simples. O trabalho em grupo, principalmente se realizado por equipes multifuncionais com diferentes visões do processo e do produto são essenciais para encontrar as potenciais causas do problema e conseqüentemente sua erradicação.

Importante observar que não necessariamente uma das causas principais estará diretamente associada ao problema. Causas secundárias podem ser encontradas e deverão também ser testadas (RAMOS, 2010).

2.6.4. Cinco Porquês

A ferramenta dos Cinco Porquês foi desenvolvida por Taichii Ono, o mesmo criador do Sistema Toyota de Produção. A técnica possui a premissa de que a primeira causa identificada não é a causa raiz para a solução do problema. Logo, deve-se perguntar por que a causa anterior ocorreu, e repetir o processo até que o analista se encontre sem resposta.

O número de 5 porquês não necessariamente deverá ser seguido sempre, pois existem causas que estão ocultas após 6, 8 ou até mesmo 10 porquês, assim como existem outras que são definidas após realizar a pergunta por 2 ou três vezes. Entretanto, o número cinco vem da experiência

de Ono, que afirma ser um número suficiente para chegar à causa raiz do problema.

A ferramenta também possibilita identificar o que, como, por que aconteceu o problema e quem o causou, uma vez que o ser humano, ao ser indagado por um problema, tende a arrumar desculpas e culpados ao invés de raciocinar sobre as causas do problema. Inclusive, se diz geralmente que com os cinco porquês encontram-se em cada uma das perguntas:

- 1º porquê: encontra-se um sintoma;
- 2º porquê: recebe-se uma desculpa;
- 3º porquê: tem-se um culpado;
- 4º porquê: define-se uma causa;
- 5º porquê: acha-se a causa raiz.

A ferramenta dos cinco porquês é extremamente útil para detectar causas ocultas que não estão diretamente ligadas ao efeito em si. Consiste em uma ferramenta simples de fácil aplicação em problemas cotidianos de processo ou de produto, podendo ser utilizada por todos os níveis da organização.

3 ESTUDO DO CASO

3.1 Situação inicial

3.1.1. Avaliação do controle estatístico do peso (subgrupos 1 - 30)

Durante a fabricação inicial de um novo projeto de pás eólicas, utiliza-se o primeiro artigo fabricado para realizar ensaios mecânicos de fadiga, conhecer os limites máximos de deflexão e resistência do produto. Este produto segue o fluxo normal de produção, suas características de peso e momento linear estático são medidas e calculadas. No ANEXO C são apresentados todos os valores de peso e momento linear estático estudado neste trabalho.

A partir da validação da primeira pá fabricada, inicia-se a fabricação da pré-série com controles rígidos de processo e inspeção do produto em todas as etapas de fabricação. Visto que, a partir do momento que o processo se robustece e há menos acompanhamento de engenheiros e técnicos ligados ao produto na fabricação em série das pás, geralmente são criadas práticas de produção distintas das pás previamente fabricadas. Como consequência, surgem alguns problemas não identificados previamente durante a fase de projeto.

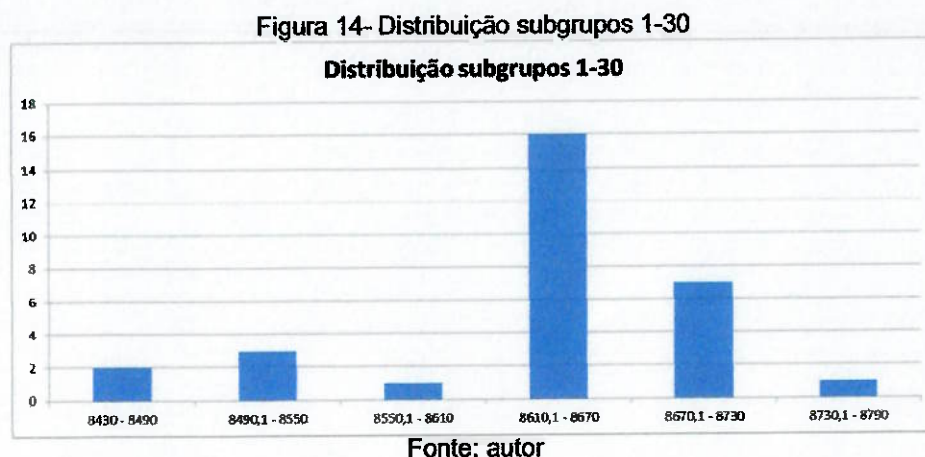
Para facilitar a análise e devido à grande quantidade de números de série envolvidos, adotou-se o agrupamento dos mesmos em subgrupos, onde cada subgrupo representa a quantidade de dez pás fabricadas sequencialmente. Desta forma, neste trabalho, a abordagem não será feita por números de série, mas sim por subgrupos.

Dado que os limites de engenharia especificados pelo cliente são 8177 kg como limite inferior e 8682 kg como limite superior, observa-se que desde o início da produção as pás estavam sendo produzidas muito próximas ao limite superior de engenharia, entretanto, com um controle rígido. Este fato é explícito quando se calcula o desvio padrão dos primeiros sete subgrupos, definido por:

$$s = \sqrt{(1/(n - 1) \sum_{(i = 1)}^n (x_i - \bar{x})^2)}$$

Observa-se que o valor obtido é de apenas 10,5 kg, o que resulta em um componente de 8400 kg uma variação de 0,1% na média do peso entre os subgrupos.

Para realizar a análise, o primeiro passo foi verificar se a distribuição seguia uma distribuição normal. Os intervalos para o peso da pá dentro dos primeiros 30 subgrupos está representado na Figura 14.



Avaliando a Figura 14, é possível observar que a curva possui uma distribuição normal, com valores concentrados no centro do intervalo avaliado.

Efetuando-se os cálculos de $\bar{X}$ e R , cujos gráficos estão ilustrados nas Figura 15 e Figura 16, observa-se que a partir do subgrupo 8 altos valores de R . Apesar do valor da média do subgrupo encontrar-se dentro dos limites de engenharia, os valores observados de amplitude R superam os 140 kg, indicando que o processo pode estar fabricando pás fora dos controles especificados pelo cliente. Tabelas onde se apresentam os valores calculados de $\bar{X}$ e R são apresentadas no ANEXO D.

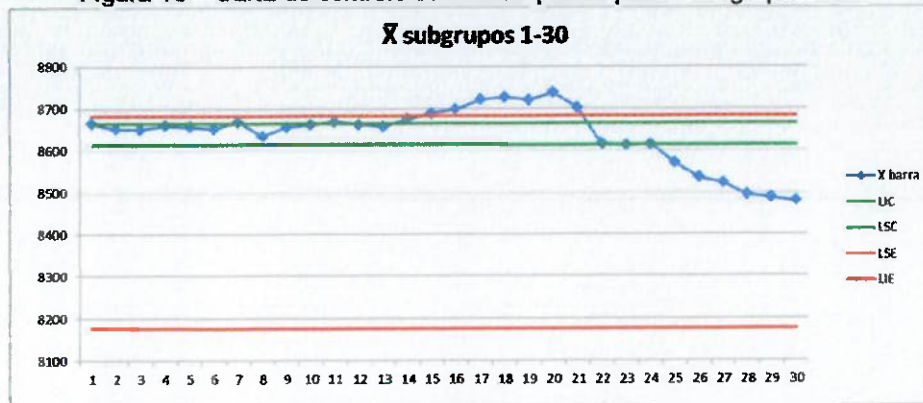
Ainda na Figura 15, calcularam-se, baseado nos valores dos subgrupos 1-30, os limites superior e inferior de controle tanto para, a partir das equações abaixo:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}$$

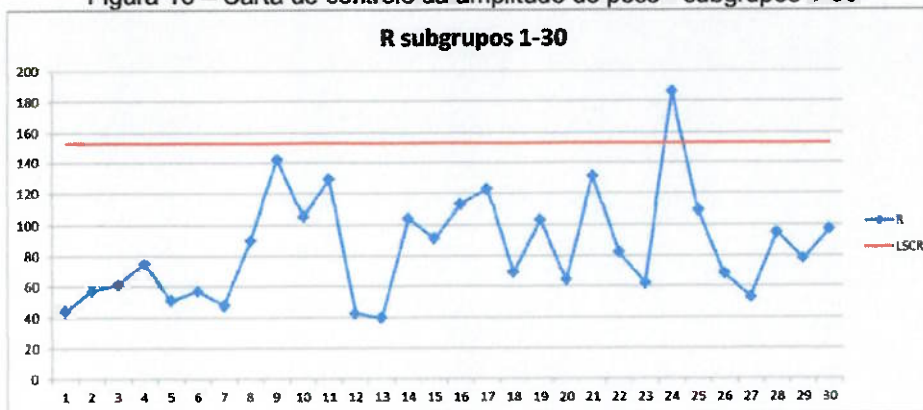
A média das médias ($\bar{\bar{X}}$) calculada para os subgrupos 1 a 30 foi 8638 kg e a média das amplitudes ($\bar{R}$) obtida foram 85,66 kg.

Figura 15 – Carta de controle de médias para o peso - subgrupos 1-30



Fonte: autor

Figura 16 – Carta de controle da amplitude do peso - subgrupos 1-30



Fonte: autor

Considerando a utilização de 10 amostras dentro do subgrupo, temos $A_2 = 0,308$. Dessa forma, os Limites Superior e Inferior de Controle calculado são:

$$LSC = 8664 \text{ kg}$$

$$LIC = 8611 \text{ kg}$$

Com os dados presentes na Figura 16, calculou-se o limite superior de controle para R, de acordo com:

$$LSC_R = D_4 \cdot R$$

Do ANEXO B temos $D_4=1,777$. Dessa forma, o valor obtido para o Limite Superior de Controle para a amplitude R:

$$LSC_R = 152 \text{ kg.}$$

Observando-se a situação que temos nas Figura 15 e Figura 16, vemos que o processo está totalmente fora de controle estatístico, inclusive fora dos Limites de Engenharia especificados pelo cliente, o que gera uma necessidade de solicitar aprovações de um produto que não cumpre as especificações

acordadas. Dessa forma a partir do subgrupo 10 iniciou-se um estudo de causa raiz para identificar as causas especiais, descrito aqui no item 3.2.

Os primeiros resultados dos testes para buscar o controle do processo iniciaram-se dentro do subgrupo 12. Observa-se uma redução na amplitude, retornando aos níveis observados nas primeiras pás fabricadas. Entretanto, a partir do subgrupo 14 a amplitude dentro do subgrupo volta a subir e segue oscilando dentro de 60 a 120 kg até o subgrupo 22, onde as ações conjuntas para redução do peso das pás começam a ser eficazes até que se obtém uma situação estável de peso, onde os valores das médias dos subgrupos ficam abaixo do limite inferior de controle da carta ilustrada na Figura 15. Dessa forma, ao alcançar um novo patamar de estabilidade, torna-se necessário realizar o cálculo de novos limites de controle e construir novas cartas de médias e amplitudes.

3.1.2. Avaliação do controle estatístico do momento linear estático (subgrupos 1 - 30)

O momento linear estático refere-se ao balanceamento das três pás que formam um rotor. Como é uma característica que deve ser controlada a partir da adição de peço em duas das três pás que formam o rotor, para que as três pás possuam o mesmo valor de momento linear, esta é uma característica que normalmente sofre menos variabilidade que o peso. Além disso, é possível em projetos onde há mais de uma caixa de balanceamento adicionar mais peso próximo à raiz da pá ou menos peso mais próximo à ponta. Esta é uma característica que, como está relacionada e pode induzir certas vibrações indesejáveis no aerogerador, possui uma criticidade maior que o peso e extrapolações dos limites de engenharia não são comumente aceitos pelo cliente.

Em um processo estável onde os materiais são normalmente peso e momento linear estático estão diretamente relacionados, ou seja, se houver aumento de peso, há aumento no momento linear estático. O contrário é igualmente válido. Entretanto, variações podem ocorrer dependendo da quantidade de excesso de material presente em regiões mais distantes da raiz da pá.

De modo análogo ao realizado no item 3.1, para a análise e construção das cartas de controle do momento linear estático, iniciou-se a análise verificando se a distribuição dos dados coletados de momento linear estático é normal. O gráfico é apresentado na Figura 17.

Observa-se que, como a maioria dos dados está distribuída no centro do intervalo avaliado, toma-se a distribuição como normal.

Na sequência, construíram-se as cartas de controle das médias e da amplitude com os dados obtidos. Também foram calculados os limites superiores e inferiores de controle para as médias dos subgrupos para o momento linear estático, bem como o limite de controle superior para a amplitude dos subgrupos. Os valores obtidos foram:

$$\bar{\bar{X}} = 121326 \text{ kgf.m}$$

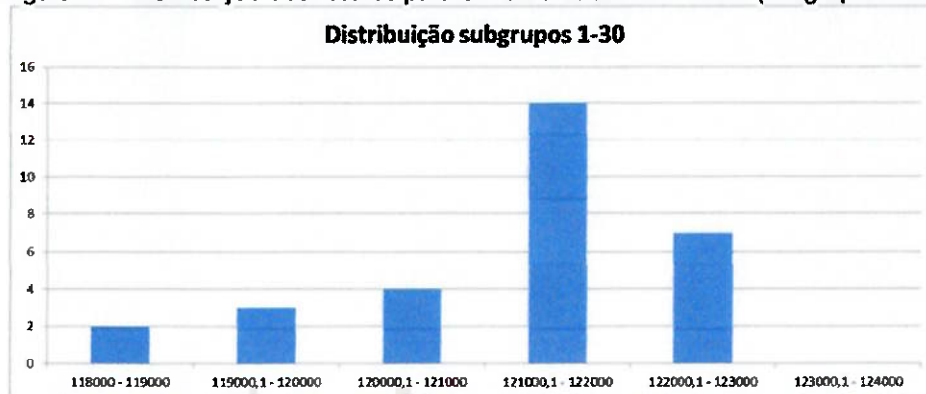
$$\bar{R} = 1645 \text{ kgf.m}$$

$$\text{LSC} = 121743 \text{ kgf.m}$$

$$\text{LIC} = 120729 \text{ kgf.m}$$

$$\text{LSC}_R = 2924 \text{ kgf.m}$$

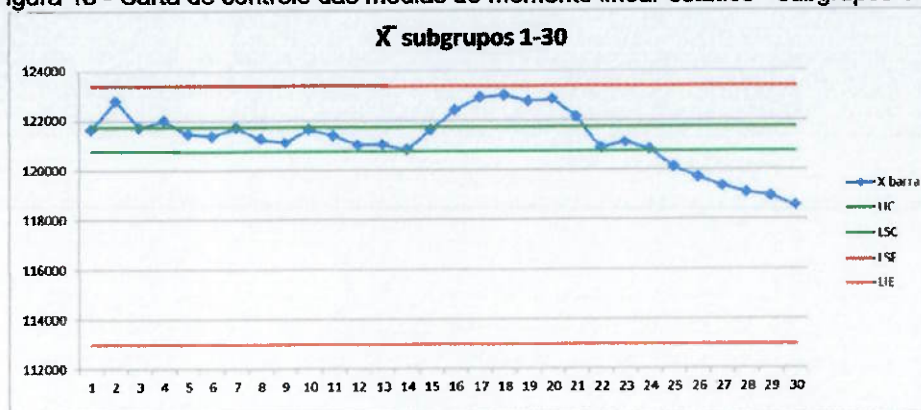
Figura 17 - Distribuição dos valores para o momento linear estático (subgrupos 1-30)



Fonte: autor

Avaliando a Figura 18, podemos observar um comportamento diferente do observado na carta de controle referente ao peso das pás. No caso do momento linear estático, observa-se que o processo inicialmente encontra-se fora dos limites de controle calculados, indicando que não há uma estabilidade na distribuição de materiais ao longo do comprimento da pá.

Figura 18 - Carta de controle das médias de momento linear estático - subgrupos 1-30



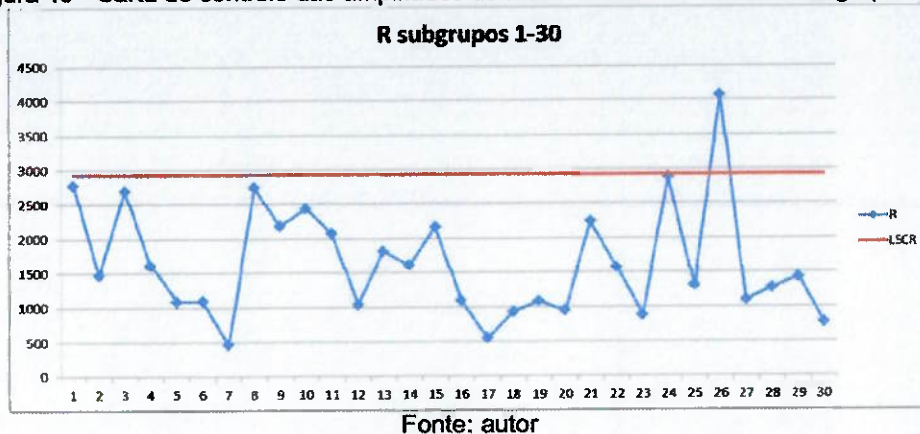
Fonte: autor

Posteriormente, a partir do subgrupo 5, o processo entra em controle estatístico, com valores de momento linear dentro dos limites de controle calculados. A média dos valores de momento linear segue sob controle estatístico até o subgrupo 16, onde, devido ao aumento de peso observado na Figura 15, o momento linear passa a um novo patamar, voltando para dentro dos limites de controle a partir do subgrupo 22, onde as ações tomadas para reduzir o peso das pás surte o efeito desejado também no momento estático. De maneira similar ao peso, o momento estático continua a reduzir a valores próximos a 118.000 kgf.m passando a um novo patamar, sendo assim necessária a definição de novos limites de controle e a construção de uma nova carta de controle.

Com relação à carta de amplitudes do momento linear estático, mostrada aqui na Figura 19, observa-se que a variação dos valores dentro dos subgrupos para o momento linear estático mostra-se com grande variação no início da produção e posteriormente a partir do subgrupo 8.

Nota-se que a primeira tentativa da equipe de melhoria foi evitar que a distribuição do excesso de peso estivesse com grandes variações, dessa forma perdendo a previsibilidade do processo de fabricação de pás. Assim como visto nos gráficos anteriores, é possível notar que a partir do subgrupo 22 tem-se uma grande variação nos valores de momento linear estático dentro dos subgrupos devido às modificações de processo determinadas pelo grupo de trabalho.

Figura 19 - Carta de controle das amplitudes do momento linear estático - subgrupos 1-30



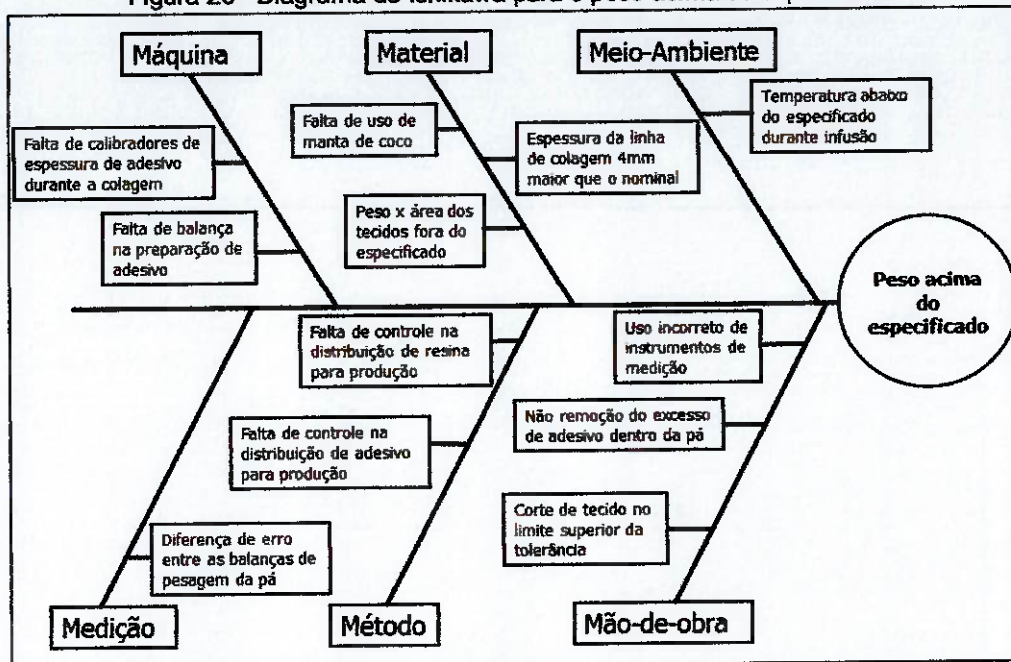
O processo atinge sua estabilidade novamente a partir do subgrupo 27, com valores de amplitude mais baixos, o que indica que o momento linear estático das pás produzidas volta a ser similar. O efeito observado na carta de amplitudes é ligeiramente retardado com relação à carta de médias devido ao fato que ao se reduzir os valores de peso na carta de médias, devido à instabilidade do processo ainda podem-se observar grande variação nos valores obtidos dentro dos subgrupos 25 e 26.

3.2 Estudo de causa raiz

Uma vez realizada a análise dos dados, iniciou-se o estudo de causa raiz para entender quais eram as variáveis do processo de fabricação que eram responsáveis pelo aumento de peso das pás. Uma vez que dificilmente uma variável sozinha é a responsável por este tipo de impacto, o grupo de trabalho após analisar os dados decidiu utilizar o Diagrama de Ishikawa para avaliar as causas potenciais para o problema.

Dessa forma, o trabalho foi iniciado com um brainstorming ou “tempestade de ideias” entre o grupo reunido. Na sequência, foram selecionadas entre as ideias as que potencialmente teriam influência sobre o sobrepeso nas pás e estas foram caracterizadas segundo os “6Ms” do processo: Mão-de-obra, Material, Meio-ambiente, Método, Medição e Máquina.

Figura 20 - Diagrama de Ishikawa para o peso acima do especificado



Fonte: autor

Doze causas potenciais foram levantadas pela equipe. Estas são mostradas na Figura 20. Com estas potenciais causas ilustradas, o próximo passo foi verificar a real procedência de cada uma e qual o efeito que cada uma causaria no processo. Logo, após se determinar em visitas à produção quais causas realmente causavam o sobrepeso das pás. Após algumas visitas e auditorias de processo, identificou-se que as seguintes causas estavam descartadas:

- Peso por área dos tecidos fora do especificado: efetuando-se medições durante as inspeções de recebimento da matéria-prima, foi possível observar que o peso por metro quadrado dos tecidos obedecia as especificações do fabricante.
- Temperatura abaixo do especificado durante infusão: a temperatura ideal para o processo de infusão gira em torno de 15 a 30°C. Durante observações na produção, verificou-se que a temperatura estava em torno de 20 a 27°C
- Diferença de erro entre as balanças de pesagem da pá: Durante o processo de pesagem, para calcular o momento estático linear, utilizam-se duas balanças. Estudos de repetibilidade e reproduzi-

bilidade mostraram que as duas balanças possuem a mesma margem de erro.

Tabela 1 - Análise dos cinco porquês

Por quê?	Por quê?	Por quê?	Por quê?	Por quê?
Por que o peso da pá está elevado?	Porque há muita resina na pá infundida	Porque não é utilizado manta de coco para absorver o excesso de resina	Porque a instrução de trabalho não especifica o uso de tal produto	Porque houve um projeto de redução de custo e a manta de coco foi vista como gasto desnecessário
		Porque não há controle da quantidade de resina liberada para produção	Porque não foi calculada a quantidade de resina ideal para cada posto de infusão	
	Porque há muito tecido na pá infundida	Porque o operador corta o tecido no máximo da tolerância	Porque o operador possui tal orientação para evitar o corte mais curto dos tecidos	Para evitar reclamações da área de laminação manual com relação a tecidos cortados fora do especificado
	Porque há muito adesivo na pá após o fechamento	Porque as linhas de colagem estão 4mm acima do nominal	Porque o operador está aplicando muito adesivo	Porque não há dispositivo de calibração da espessura de adesivo
				Porque o operador não sabe utilizar a escala para medir a altura do adesivo antes do fechamento
		Porque não há controle na liberação de adesivo para a produção	Porque não há balança na sala de preparação de adesivo	
		Porque não há remoção do excesso de adesivo	Porque não há acesso para um operador realizar a limpeza interna	Porque não há um dispositivo de prolongamento do braço do operador

Fonte: autor

Apesar da eliminação de três possíveis causas, ainda outras nove potenciais causas relacionadas a método, mão-de-obra, material, e máquina estavam causando o sobrepeso nas pás.

Visto estes fatores, o grupo chegou à conclusão que somente três processos influenciam tal aumento de peso: laminação manual, infusão e colagem.

É possível assim iniciar a análise dos cinco porquês partindo de um denominador comum: excesso de peso é primariamente causado por excesso de material na pá. Logo, para a análise, subdividiu-se o excesso de material em três subcategorias: excesso de resina, tecido e adesivo.

Na sequência, procedeu-se com a análise dos cinco porquês de cada uma dessas subcategorias. O resultado desta análise é mostrado na Tabela 1.

Tabela 2 - Plano de melhorias do processo

Ação	Contenção/ Correção	Responsável	Subgrupo de implantação
Remover excesso de tecido antes da laminação	Contenção	Operador da laminação	Subgrupo 22
Revisar procedimentos de corte de tecidos	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 24
Treinar operadores no novo procedimento	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 24
Incluir manta de coco nos procedimentos	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 22
Calcular quantidade de resina ideal em cada ponto de infusão	Correção	Engenheiro de produto	Subgrupo 22
Revisar procedimentos de preparação de resina	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 24
Implementar controle de liberação de resina	Correção	Supervisor de produção	Subgrupo 25
Treinar operadores em como medir altura do adesivo	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 23
Criar dispositivo para calibração da espessura do adesivo	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 26
Comprar balança para a sala de preparação de adesivo	Correção	Gerente de produção	Subgrupo 25
Implementar controle de liberação de adesivo	Correção	Supervisor de produção	Subgrupo 25
Criar dispositivo prolongador do braço do operador, para limpeza do excesso de adesivo	Correção	Engenheiro de processos	Subgrupo 27

Fonte: autor

Com as verdadeiras causas raízes em mãos, foi possível então gerar um plano de melhoria focado nos pontos de maior influência no peso e no momento estático das pás. A conclusão deste estudo de causa raiz foi durante a produção de pás do subgrupo 19. O plano de ação gerado está ilustrado na Tabela 2. Pode-se observar que as primeiras ações foram aplicadas no subgrupo 22, onde se observa uma redução acentuada no peso e momento estático das pás nas Figura 15 e Figura 17 e uma abrupta mudança nas cartas de amplitudes das Figura 16 e Figura 19. Ações mais complexas foram implantadas no processo de fabricação até o subgrupo 27, onde se nota uma estabilização e a redução de peso e momento estático se torna menos acentuada.

Observa-se que dessa forma, o plano de ação foi eficaz para reduzir o peso e o momento estático das pás, uma vez que os valores médios do

subgrupo 28 estão abaixo de 8500 kg. O resultado final foi uma redução de peso em torno de 200 kg e momento linear estático de 4500 kgf.m. Avaliando estas influências, é possível observar que muito do peso removido estava concentrado a uma grande distância da raiz. Dessa forma, pode-se inferir que uma das ações que teve grande efeito neste trabalho foi a criação do dispositivo para prolongamento do braço do operador, facilitando as operações de limpeza do excesso de adesivo a partir do interior da pá.

Visto que a partir do subgrupo 27 foi atingido um novo patamar de valores de peso e momento estático, observou-se a necessidade de realizar um novo estudo estatístico e criação de novas cartas de controle.

3.3 Resultado do estudo de causa raiz (subgrupos 31-60)

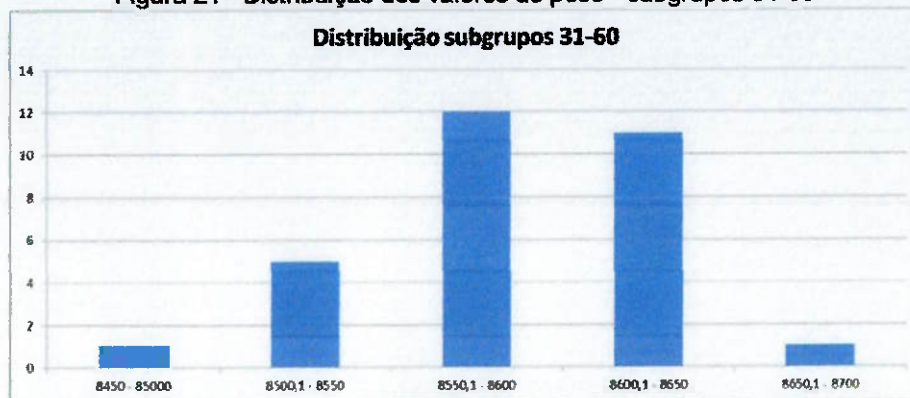
Uma vez que o processo atingiu resultados que reduziu o peso e o momento estático para novos patamares, torna-se necessário avaliar, para os próximos 30 subgrupos novos limites de controle, distribuição dos valores e se com as ações tomadas até o momento pode-se considerar que o processo está sob controle estatístico.

3.3.1. Resultado obtido para o peso (subgrupos 31-60)

Com um novo patamar de peso em mãos, a equipe de trabalho volta a coletar os dados de peso das pás produzidas. Novamente dividem-se as pás produzidas em subgrupos de 10 unidades, e realizam-se os cálculos de média dos subgrupos e a amplitude dos valores dentro de cada subgrupo. Os valores são apresentados no ANEXO D.

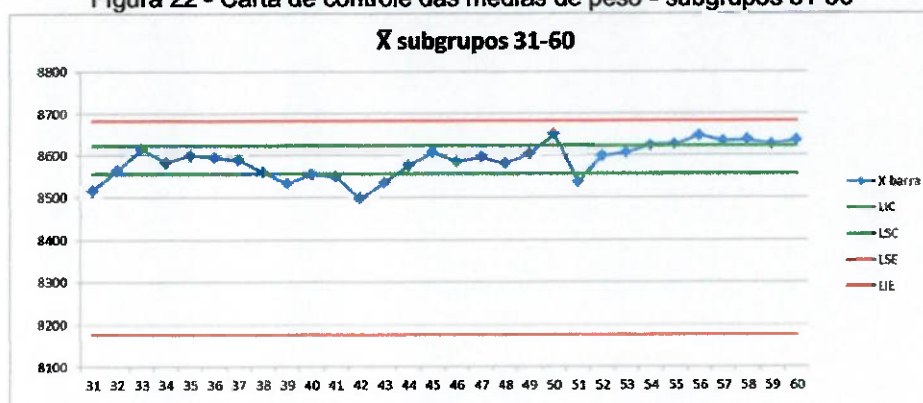
Abaixo, encontra-se a distribuição dos valores dentro da faixa estabelecida. Observa-se na Figura 21 pelo formato da distribuição que a mesma é normal.

Figura 21 - Distribuição dos valores de peso - subgrupos 31-60



Fonte: autor

Figura 22 - Carta de controle das médias de peso - subgrupos 31-60



Fonte: autor

Dessa forma, construiu-se a carta de controle das médias do subgrupo 31 ao subgrupo 60. Na carta de controle apresentada na Figura 22 também estão apresentados os limites superior e inferior de engenharia e os limites de controle calculados para este novo patamar de valores de peso atingidos.

Os novos valores de limites superior e inferior de controle calculado para o subgrupo 31 ao subgrupo 60 foram:

$$\bar{\bar{X}} = 8588 \text{ kg}$$

$$\bar{R} = 108 \text{ kg}$$

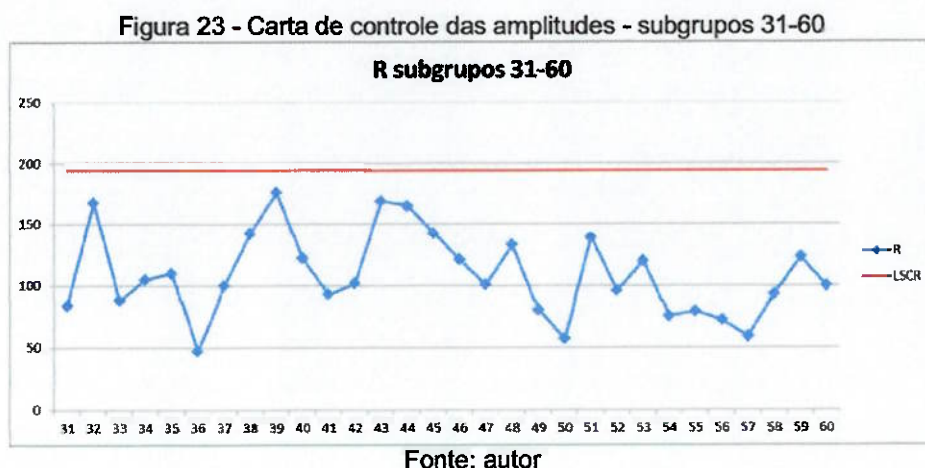
$$LSC = 8622 \text{ kg}$$

$$LIC = 8555 \text{ kg}$$

$$LSC_R = 152 \text{ kg}$$

Observando os resultados na redução de peso obtida e ilustrados na Figura 22, é possível dizer que o processo esteve entre o subgrupo 32 e 38 sob controle estatístico. Na sequência, fatores externos reduziram o peso para fora

dos limites de controle. A partir do subgrupo 44 o processo volta para dentro dos limites de controle para então sofrer uma oscilação nos subgrupos 50 e 51 e assim ao buscar o retorno à normalidade o peso das pás produzidas aumenta cerca de 120 kg para então buscar a estabilidade acima do limite superior de controle. Possíveis causas para este comportamento estão relacionadas ao comentado no início do item 3.



Assim que o processo atinge um nível de estabilidade e maturidade, reduz-se o controle da equipe de trabalho e a própria gerência de produção busca meios seguros para acelerar o ciclo de processo e reduzir a probabilidade de retrabalhos posteriores. Importante ressaltar que a partir deste patamar alcançado e apesar dos aumentos de peso a partir do subgrupo 55, nenhuma das pás teve seu peso fora dos limites de engenharia especificados pelo cliente.

A Figura 23 ilustra a carta de controle das amplitudes para os subgrupos 31 ao 60. Analisando esta carta, é possível observar que todos os subgrupos avaliados estiveram abaixo do limite de controle calculado para estas amostras. Entretanto, ainda assim há dificuldade para manter variações pequenas de peso dentro dos próprios subgrupos. Possivelmente uma das influências é a própria operação de balanceamento dos rotores ao final do processo. Esta etapa do processo é feita a partir da adição de peso em duas das três pás do rotor, para que as pás de um mesmo rotor possuam o mesmo valor de momento linear estático. Logo, mesmo que o processo seja capaz de produzir pás com os mesmos valores de peso repetitivamente, a distribuição de peso ao

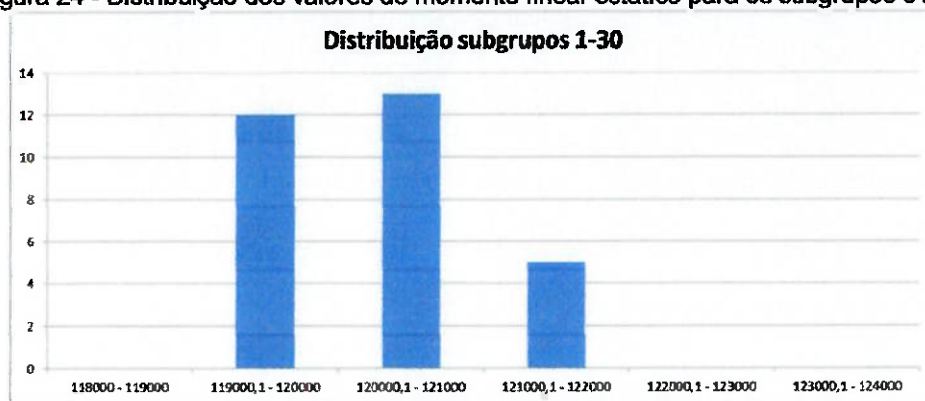
longo da pá sofre variações, o que gera valores de momentos diferentes e a necessidade de realizar o balanceamento do rotor.

3.3.2. Resultado obtido para o momento linear estático (subgrupos 31-60)

Para o momento linear estático, a redução do valor gerou uma concentração na distribuição dos valores no centro da faixa, diminuindo assim a variabilidade do processo. Provavelmente por conta da influência da quantidade do excesso de adesivo retirado de dentro da pá com o auxílio do dispositivo criado para aumentar o alcance do operador no interior da pá.

Este fenômeno é claramente observado na Figura 24. O próximo passo foi construir as novas cartas de controle para as médias dos valores de momento estático dos subgrupos e também a amplitude dentro de um mesmo subgrupo.

Figura 24 - Distribuição dos valores de momento linear estático para os subgrupos 31-60



Fonte: autor

Avaliando a Figura 25 é possível observar os valores das médias de momento estático sofrem menor variação que o peso. Entretanto, como as duas grandezas estão diretamente relacionadas, nos subgrupos onde o peso foi reduzido, o mesmo aconteceu com o momento linear estático. Há alguns casos especiais, onde, por exemplo, uma pá necessitou de reparos por conta de defeitos do processo de fabricação em zonas distantes à raiz.

A Figura 25 também mostra os limites superior e inferior de controle calculado para os subgrupos onde as ações para a redução do peso e momento estático já haviam sido concluídas. Os valores calculados foram:

$$\bar{\bar{X}} = 120337 \text{ kgf.m}$$

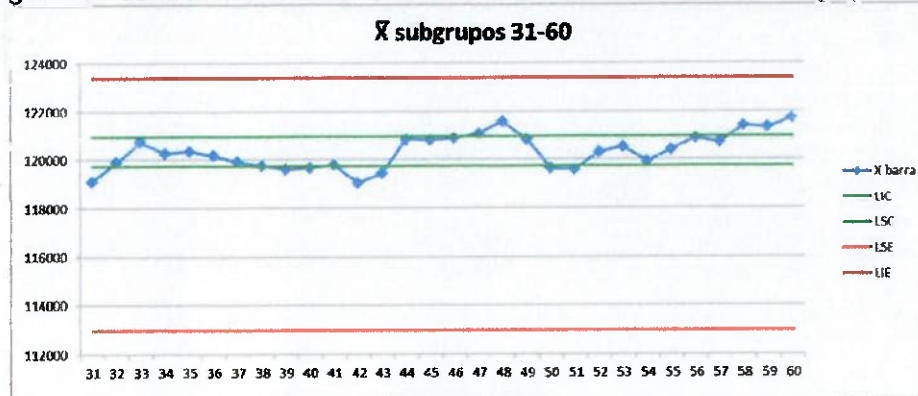
$$\bar{R} = 1973 \text{ kgf.m}$$

$$LSC = 120944 \text{ kgf.m}$$

$$LIC = 119729 \text{ kgf.m}$$

$$LSC_R = 3527 \text{ kgf.m}$$

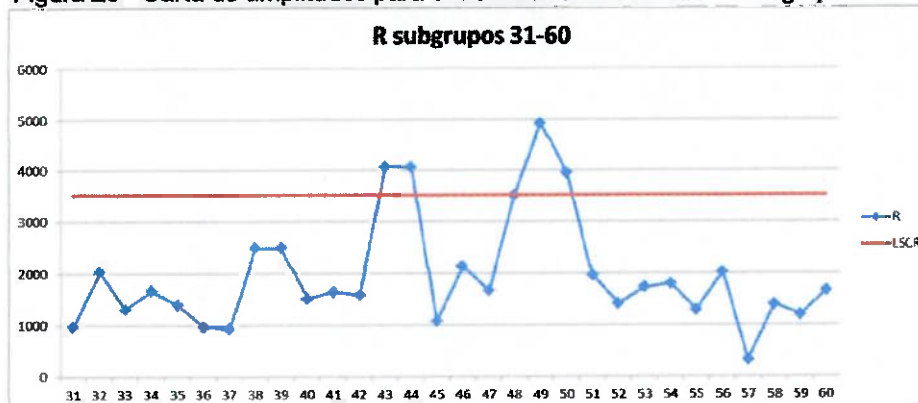
Figura 25 - Carta de controle das médias de momento linear estático - subgrupo 31-60



Fonte: autor

Este fato de possíveis reparos serem necessários em algumas pás causando um aumento do momento linear estático é notório avaliando-se a carta de amplitudes. A Figura 26 ilustra claramente este fato. É possível observar grandes variações de até 5000 kgf.m dentro de um mesmo subgrupo.

Figura 26 - Carta de amplitudes para o momento linear estático - subgrupos 31-60



Fonte: autor

4 CONCLUSÃO

Avaliando os dados obtidos dos primeiros 30 subgrupos, é possível afirmar que o processo não se encontra sob controle estatístico. Além disso, práticas de produção para acelerar o processo não foram corretamente acompanhadas pela equipe de Engenharia o que gerou o aumento de peso para fora dos limites de engenharia especificados pelo cliente.

A utilização do Controle Estatístico de Processo e as cartas de controle para avaliar que, apesar do processo conter pouca variabilidade no curto prazo, este não cumpria com os limites de controle calculados para as primeiras 300 pás produzidas.

O estudo de causa raiz utilizando as ferramentas apropriadas para avaliação de múltiplas causas simultâneas, tal como o Diagrama de Ishikawa e a análise dos cinco porquês para identificar subcausas ocultas foram eficazes na identificação das reais dificuldades no controle de peso e momento linear estático das pás eólicas produzidas. O plano de ação construído pela equipe de trabalho foi eficiente e gerou a redução de peso esperada e necessária para cumprir com os limites especificados pelo cliente. Ao mesmo tempo, ao controlar as quantidades de material liberados para a produção, houve uma redução de custo da ordem de alguns milhares de reais.

Como comentário final, conclui-se que mesmo com as melhorias de processo implementadas, o processo não se encontra sob controle estatístico, visto que as médias e amplitudes dos subgrupos 31 ao 60 ficaram fora dos limites de controle calculados para o peso e o momento linear estático das pás.

Por isto, tendo em vista as condições de processo disponíveis para fabricação de pás, as cartas de controle construídas para o novo patamar de peso e momento atingidos após a conclusão do plano de melhorias a partir do subgrupo 31, mostrou que ainda existem outras variáveis que não foram escopo de estudo deste trabalho que influenciam a variação de peso e momento. Estima-se que a quantidade de retrabalhos onde se exija a substituição do laminado e a inclusão de reforços estruturais por conta de defeitos de produção gera um aumento no peso e no momento linear estático das pás.

Sugere-se que tais variáveis sejam o escopo de um estudo futuro, além da realização do estudo estatístico por meio de cartas de controle em outros processos relacionados à fabricação de pás, tais como corte de tecidos, adição de material para balanceamento das pás de um mesmo rotor, quantidade aplicada de massas de correção da superfície e controle do peso de componentes pré-fabricados, tais como seções de raiz, longarinas e nervuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SCHUBEL, P. J. e CROSSLEY, R. J. **Wind turbine blade design**. Nottingham, UK: University of Nottingham, 2012 Disponível em: <[http://www.engr.sjsu.edu/ebasham/E11/windturbine/research/Wind Turbine Blade Design.pdf](http://www.engr.sjsu.edu/ebasham/E11/windturbine/research/Wind_Turbine_Blade_Design.pdf)> Acesso em: 10 ago. 2015.

JUNIOR, L. M. **Composite Materials in Wind Energy Technology**. Roskilde, Denmark: Technical University of Denmark, 2012 Disponível em: <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-11-42.pdf>> Acesso em: 08 ago. 2015.

GRIFFIN, D. A. **Blade System Design Studies Volume 1: Composite Technologies for Large Wind Turbine Blades**. Kirkland, US: Global Energy Concepts, 2002 Disponível em: < <http://windpower.sandia.gov/other/021879.pdf> > Acesso em: 11 ago. 2015.

CONTADOR, J. C. et al. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa**. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

PINTO, M.O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

AMARANTE, O. A. C. et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: CEPEL, 2001.

CHAIM, O. C. **Análise de Custos de Fontes Alternativas de Energia**. São Carlos: EESC/USP, 2011.

CAIMS, D. S.; RIDDLE, T.; NELSON, J. **Wind Turbine Composite Blade Manufacturing: The Need for Understanding Defect Origins, Prevalence, Implications and Reliability**. Estados Unidos: Sandia National Laboratories, 2011.

BRASIL, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica do Brasil**. Brasília: ABDI, 2014. 152 p.

NOLET, S. C. **Composite Wind Blade and Manufacturing**. Warren, Estados Unidos: TPI Composites, 2011.

WE Handbook: Blade Manufacturing Processes. 35 p.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. S.; **Controle Estatístico do Processo: Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012. 172 p.

DE OLIVEIRA, C. C.; et al.; **Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2013. 76 p.

ANEXO A

GAMESA Eólica – História e situação atual

A Gamesa Eólica é uma empresa espanhola fabricante e desenvolvedora de aerogeradores para o mercado de energia eólica mundial. Fundada em 1976, inicialmente era uma fabricante de máquinas e equipamentos para a indústria metal-mecânica espanhola. A partir do final da década de 80, realizou uma parceria com a Embraer para projeto e fabricação das asas do ERJ-145. A partir de 1994, redireciona seu foco para o crescente mercado europeu de projeto e fabricação de aerogeradores, entrando no mercado com máquinas de 40 metros de diâmetro. A partir de 1998, inicia suas operações de manutenção de aerogeradores fora da Espanha, em um parque presente no México.

A partir dos anos 2000, expande-se para se consolidar globalmente como um dos maiores fabricantes de aerogeradores, realizando projetos por toda a Europa e expandindo seus mercados para Estados Unidos e Índia (2004). Hoje, a empresa vende contratos que contemplam desde o projeto de layout do parque eólico, venda dos equipamentos, construção do parque e operação e manutenção durante 20 anos.

Atualmente, seus aerogeradores estão presentes em quatro continentes e possui centros produtivos em diversas localidades do mundo. No Brasil, está presente desde 2010, com uma planta de montagem de nacelles e rotores na Bahia e um escritório em São Paulo. Atualmente, no Brasil existem mais de 400 funcionários diretos, e outros 300 contratados indiretos, por meio de empresas subcontratadas para realizar inspeções, manutenção e construção de parques eólicos. Sua capacidade instalada no Brasil é de produzir 600 MW em equipamentos ao ano.

Recentemente, está adentrando ao mercado offshore na Europa com participação em uma joint-venture com a empresa francesa Areva, de onde se criou a Adwen.

ANEXO B

Valores tabelados para elaboração de cartas de controle:

Fatores para cálculo de limites de controle				
n	A2	D3	D4	d2
2	1,880	-	3,267	1,128
3	1,023	-	2,574	1,693
4	0,729	-	2,282	2,059
5	0,577	-	2,114	2,326
6	0,483	-	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078

ANEXO C

Valores de peso e momento para os subgrupos 1 a 60:

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
1	11-001	120296	8675	6	11-051	121065	8640
	11-002	120296	8680		11-052	121065	8635
	11-003	121995	8652		11-053	121770	8657
	11-004	121995	8673		11-054	121770	8648
	11-005	121995	8672		11-055	121770	8681
	11-006	123077	8676		11-056	120910	8624
	11-007	123077	8675		11-057	120910	8631
	11-008	123077	8660		11-058	120910	8681
	11-009	120296	8645		11-059	121610	8649
	11-010	120296	8636		11-060	121998	8675
2	11-011	122923	8630	7	11-061	121610	8664
	11-012	122923	8676		11-062	121610	8682
	11-013	122923	8620		11-063	121998	8681
	11-014	123312	8665		11-064	121998	8670
	11-015	123312	8628		11-065	121767	8675
	11-016	123312	8619		11-066	121767	8660
	11-017	122410	8668		11-067	121767	8634
	11-018	122410	8675		11-068	121533	8657
	11-019	122410	8657		11-069	121533	8678
	11-020	121842	8675		11-070	121533	8682
3	11-021	121842	8672	8	11-071	121384	8595
	11-022	121842	8666		11-072	121384	8680
	11-023	120600	8643		11-073	121384	8591
	11-024	120600	8619		11-074	119827	8619
	11-025	120600	8620		11-075	119827	8623
	11-026	121687	8636		11-076	119827	8615
	11-027	121687	8630		11-077	122572	8677
	11-028	121687	8680		11-078	122572	8670
	11-029	123300	8663		11-079	122572	8590
	11-030	123300	8680		11-080	121291	8680
4	11-031	123300	8607	9	11-081	121291	8654
	11-032	121687	8655		11-083	122622	8760
	11-033	121687	8630		11-084	121291	8627
	11-034	121687	8675		11-085	120911	8638
	11-035	121690	8681		11-086	120911	8640
	11-036	121690	8682		11-087	120915	8651
	11-037	121690	8648		11-088	120911	8668
	11-038	122150	8681		11-089	120915	8618
	11-039	122150	8668		11-090	120915	8680
	11-040	122150	8672		11-091	120445	8620
5	11-041	122150	8636	10	11-092	120445	8666
	11-042	122150	8682		11-093	122622	8671
	11-043	122150	8641		11-094	120445	8680
	11-044	121068	8670		11-095	122622	8657
	11-045	121068	8631		11-096	120914	8648
	11-046	121068	8640		11-097	120914	8675
	11-047	121290	8668		11-098	122879	8610
	11-048	121290	8670		11-099	120914	8636
	11-049	121290	8668		11-100	122879	8715
	11-050	121065	8660		11-101	121769	8652

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
11	11-102	121769	8680	16	11-153	121995	8666
	11-103	121769	8662		11-154	122923	8736
	11-104	122879	8752		11-155	121995	8676
	11-105	121532	8675		11-156	122923	8749
	11-106	120808	8623		11-157	122214	8664
	11-107	120808	8640		11-158	121995	8677
	11-108	120808	8660		11-159	122214	8677
	11-109	121224	8635		11-160	123087	8777
	11-110	121224	8681		11-162	122214	8677
	11-112	121224	8682		11-163	122534	8672
12	11-113	121532	8664	17	11-164	122534	8681
	11-114	120493	8678		11-165	123087	8718
	11-115	120493	8635		11-166	122534	8674
	11-116	120493	8640		11-167	122927	8772
	11-117	120944	8672		11-168	123087	8740
	11-118	121532	8668		11-169	122927	8649
	11-119	120944	8677		11-170	122990	8769
	11-120	120944	8664		11-171	122927	8661
	11-121	121314	8658		11-172	122990	8770
	11-122	121314	8663		11-173	122990	8768
13	11-123	122180	8664	18	11-174	123049	8720
	11-124	121314	8662		11-175	122493	8708
	11-125	122180	8678		11-176	122493	8724
	11-126	122180	8656		11-177	123049	8720
	11-127	120361	8638		11-178	123049	8725
	11-128	120361	8668		11-179	123422	8702
	11-129	120425	8642		11-180	123422	8741
	11-130	120361	8661		11-181	122992	8771
	11-131	120425	8656		11-182	123422	8724
	11-132	120425	8645		11-183	122556	8722
14	11-133	120446	8628	19	11-184	123118	8772
	11-134	122000	8720		11-185	122280	8680
	11-135	120446	8622		11-186	122280	8682
	11-136	122000	8726		11-187	122280	8669
	11-137	120389	8670		11-188	122556	8697
	11-138	120446	8678		11-189	122992	8752
	11-139	120758	8660		11-190	123118	8756
	11-140	120389	8682		11-191	122556	8714
	11-141	120758	8681		11-192	122992	8754
	11-142	120389	8678		11-193	123360	8720
15	11-143	120758	8661	20	11-194	123360	8731
	11-144	121253	8677		11-195	123360	8724
	11-145	121253	8664		11-196	122672	8776
	11-146	121253	8682		11-197	123175	8724
	11-147	121440	8674		11-198	122672	8718
	11-148	121440	8681		11-199	122672	8727
	11-149	122493	8752		11-200	122414	8767
	11-150	121440	8680		11-201	122414	8750
	11-151	122923	8739		11-202	122414	8739
	11-152	122000	8674		11-203	123115	8712

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
21	11-204	121993	8722	26	11-254	123118	8577
	11-205	123115	8744		11-255	119360	8532
	11-206	123115	8758		11-256	119046	8516
	11-207	123175	8715		11-257	119360	8532
	11-208	121993	8743		11-258	119046	8560
	11-209	121993	8650		11-259	119046	8509
	11-210	123175	8727		11-260	119509	8530
	11-211	120939	8627		11-261	119509	8518
22	11-212	120939	8678	27	11-262	119524	8555
	11-213	120939	8641		11-263	119509	8528
	11-214	120323	8610		11-264	119524	8535
	11-215	120323	8590		11-265	119524	8537
	11-217	120323	8634		11-266	119520	8507
	11-216	121577	8572		11-267	119520	8515
	11-218	120758	8605		11-268	119356	8522
	11-219	120759	8622		11-269	119520	8492
23	11-220	120007	8654	28	11-270	119356	8498
	11-221	121577	8623		11-271	119356	8540
	11-222	121433	8600		11-272	119510	8535
	11-223	121577	8641		11-273	118429	8545
	11-224	121433	8643		11-274	119510	8507
	11-225	121433	8612		11-275	119201	8535
	11-226	121433	8626		11-276	119510	8512
	11-227	121433	8614		11-277	118881	8476
24	11-228	121433	8636	29	11-278	119201	8532
	11-229	120933	8610		11-279	118881	8460
	11-230	120933	8614		11-280	119201	8493
	11-231	120933	8583		11-281	118241	8440
	11-232	120552	8581		11-282	118881	8505
	11-233	120552	8586		11-283	119307	8482
	11-234	120552	8630		11-284	118241	8485
	11-235	121958	8673	30	11-285	119037	8470
25	11-236	121958	8674		11-286	118241	8467
	11-237	121958	8656		11-287	119664	8528
	11-238	121061	8601		11-288	119037	8490
	11-239	121061	8616		11-289	118736	8488
	11-240	121061	8639		11-290	119664	8509
	11-241	119077	8488		11-291	118736	8461
	11-242	120293	8592		11-292	119664	8530
	11-243	119077	8558		11-293	118429	8452
25	11-244	119360	8572		11-294	118736	8520
	11-245	119077	8558		11-295	118563	8426
	11-246	120380	8583		11-296	118429	8476
	11-247	120293	8537		11-297	118267	8451
	11-248	120293	8580		11-298	118563	8466
	11-249	120380	8507		11-299	118267	8455
	11-250	120289	8556		11-300	118563	8520
	11-251	120380	8592		11-301	118888	8495
25	11-252	120289	8616		11-302	118267	8470
	11-253	120289	8600		11-303	119043	8523

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
31	11-304	118888	8530	36	11-354	120134	8590
	11-305	119043	8495		11-355	120289	8600
	11-306	118888	8502		11-356	120134	8585
	11-307	119043	8535		11-357	120289	8596
	11-308	119043	8535		11-358	120289	8596
	11-309	119043	8495		11-359	120487	8597
	11-310	119043	8521		11-360	120487	8615
	11-311	119684	8492		11-361	119514	8568
	11-312	119684	8565		11-362	120487	8610
	11-313	118720	8481		11-363	119514	8575
32	11-314	119684	8560	37	11-364	119514	8599
	11-315	118720	8484		11-365	119513	8583
	11-316	119823	8583		11-366	119513	8578
	11-317	119823	8555		11-367	120447	8597
	11-318	118720	8495		11-368	119513	8570
	11-319	119981	8518		11-369	120447	8598
	11-320	120753	8652		11-370	120447	8640
	11-321	120753	8610		11-371	120135	8566
	11-322	119823	8575		11-372	120135	8605
	11-323	120753	8603		11-373	119524	8540
33	11-324	119981	8606	38	11-374	120135	8571
	11-325	120805	8582		11-375	119524	8560
	11-326	119981	8615		11-376	119524	8559
	11-327	121290	8608		11-377	119821	8557
	11-328	120805	8617		11-378	119821	8555
	11-329	121290	8670		11-379	119514	8527
	11-330	120805	8610		11-380	119821	8517
	11-331	120487	8620		11-381	121221	8655
	11-332	121290	8604		11-382	119514	8575
	11-333	120487	8601		11-383	118722	8512
34	11-334	120487	8603	39	11-384	119514	8541
	11-335	120008	8554		11-385	121221	8622
	11-336	120008	8573		11-386	118722	8515
	11-337	119718	8543		11-387	119040	8507
	11-338	120008	8576		11-388	118722	8487
	11-339	119718	8558		11-389	119042	8521
	11-340	119718	8590		11-390	121221	8626
	11-341	121375	8612		11-391	119980	8450
	11-342	121375	8648		11-392	119042	8520
	11-343	120198	8563		11-393	119512	8534
35	11-344	121375	8650	40	11-394	120551	8602
	11-345	120198	8617		11-395	120132	8546
	11-346	120198	8588		11-396	119512	8560
	11-347	120551	8563		11-397	120132	8580
	11-348	120551	8647		11-398	119512	8545
	11-349	119980	8562		11-399	119046	8538
	11-350	120551	8617		11-400	120132	8616
	11-351	119980	8540		11-401	119355	8516
	11-352	119980	8600		11-402	119046	8494
	11-353	120134	8600		11-403	119355	8535

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
41	11-404	119046	8565	46	11-454	122050	8597
	11-405	120378	8578		11-455	120875	8652
	11-406	119355	8529		11-456	120689	8583
	11-407	119821	8549		11-457	120687	8555
	11-408	120378	8563		11-458	121433	8632
	11-409	119821	8514		11-459	119907	8535
	11-410	120378	8587		11-460	121433	8627
	11-411	119975	8550		11-461	119907	8557
	11-412	119821	8555		11-462	120687	8568
	11-413	118736	8494		11-463	120992	8531
42	11-414	119975	8546	47	11-464	120687	8569
	11-415	118736	8460		11-465	120992	8561
	11-416	119975	8543		11-466	120935	8576
	11-417	118952	8449		11-467	121570	8604
	11-418	118736	8520		11-468	119907	8654
	11-419	118398	8465		11-469	121568	8612
	11-420	118952	8526		11-470	120992	8566
	11-421	118398	8444		11-471	121568	8553
	11-422	118952	8517		11-472	121570	8599
	11-423	119443	8494		11-473	120935	8650
43	11-424	118398	8444	48	11-474	121570	8645
	11-425	119144	8590		11-475	123103	8650
	11-426	119443	8528		11-476	121568	8584
	11-427	119144	8500		11-477	119584	8526
	11-428	119443	8490		11-478	120935	8568
	11-429	118328	8503		11-479	119584	8517
	11-430	119144	8606		11-480	123103	8617
	11-431	120611	8605		11-481	120232	8542
	11-432	118328	8462		11-482	123103	8630
	11-433	122401	8613		11-483	123029	8518
44	11-434	118328	8475	49	11-484	119584	8597
	11-435	120352	8518		11-485	123029	8600
	11-436	120611	8573		11-486	120232	8636
	11-437	122401	8604		11-487	118094	8567
	11-438	120611	8584		11-488	120232	8626
	11-439	120501	8640		11-489	121119	8560
	11-440	120352	8624		11-490	123029	8615
	11-441	121374	8554		11-491	121119	8640
	11-442	122401	8620		11-492	118094	8615
	11-443	121374	8555		11-493	122050	8608
45	11-444	120352	8637	50	11-494	118094	8669
	11-445	120814	8521		11-495	119694	8632
	11-446	120501	8560		11-496	121119	8625
	11-447	120814	8664		11-497	119051	8617
	11-448	120501	8648		11-498	122050	8653
	11-449	120689	8525		11-499	118731	8674
	11-450	121374	8635		11-500	119694	8663
	11-451	120689	8657		11-501	118731	8670
	11-452	120814	8597		11-502	119694	8648
	11-453	121433	8610		11-503	119506	8666

SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO	SUBGRUPO	SN	MOMENTO	PESO
51	11-504	119051	8498	56	11-554	121738	8680
	11-505	119506	8500		11-555	121446	8640
	11-506	119051	8524		11-556	120259	8670
	11-507	119519	8517		11-557	121446	8662
	11-508	118731	8479		11-558	119712	8608
	11-509	120692	8581		11-559	120758	8641
	11-510	119506	8504		11-560	121446	8669
	11-511	119637	8616		11-561	120754	8620
	11-512	119519	8514		11-562	120758	8660
	11-513	120692	8618		11-563	120444	8638
52	11-514	119519	8593	57	11-564	120758	8655
	11-515	120317	8574		11-565	120651	8660
	11-516	119637	8641		11-566	120754	8606
	11-517	120317	8641		11-567	120651	8626
	11-518	119637	8574		11-568	120754	8651
	11-519	120738	8580		11-569	120759	8665
	11-520	120692	8648		11-570	120651	8641
	11-521	120875	8565		11-571	120759	8616
	11-522	120317	8552		11-572	120759	8633
	11-523	120929	8609		11-573	120444	8606
53	11-524	120738	8680	58	11-574	121738	8635
	11-525	120929	8574		11-575	120444	8605
	11-526	120738	8561		11-576	121738	8650
	11-527	120812	8580		11-577	121449	8682
	11-528	120875	8590		11-578	121449	8589
	11-529	120446	8634		11-579	121449	8670
	11-530	120929	8681		11-580	121689	8609
	11-531	119205	8596		11-581	120644	8677
	11-532	120812	8586		11-582	121689	8600
	11-533	119205	8576		11-583	121844	8665
54	11-534	120812	8617	59	11-584	121689	8682
	11-535	119215	8628		11-585	120644	8590
	11-536	120446	8594		11-586	121844	8619
	11-537	119215	8656		11-587	120644	8623
	11-538	120446	8590		11-588	121844	8625
	11-539	121002	8606		11-589	121529	8645
	11-540	119205	8631		11-590	121529	8559
	11-541	119892	8665		11-591	121067	8655
	11-542	119215	8608		11-592	121529	8655
	11-543	119892	8651		11-593	121067	8622
55	11-544	121002	8615	60	11-594	121326	8582
	11-545	120749	8605		11-595	121326	8670
	11-546	121002	8630		11-596	121067	8681
	11-547	119712	8621		11-597	122727	8682
	11-548	119892	8650		11-598	121326	8653
	11-549	119712	8644		11-599	121128	8645
	11-550	120749	8663		11-600	122727	8603
	11-551	120259	8643		11-601	121128	8622
	11-552	120749	8584		11-602	122727	8593
	11-553	120259	8619		11-603	121766	8645

ANEXO D

Valores de $\bar{X}$ e R obtidos para os subgrupos 1 a 60 para a característica peso:

Subgrupo	X barra	R	Max valor	Min valor	LSC	LIC	LSCR
1	8664	44	8680	8636	8664	8611	152
2	8651	57	8676	8619	8664	8611	152
3	8651	61	8680	8619	8664	8611	152
4	8660	75	8682	8607	8664	8611	152
5	8657	51	8682	8631	8664	8611	152
6	8652	57	8681	8624	8664	8611	152
7	8668	48	8682	8634	8664	8611	152
8	8634	90	8680	8590	8664	8611	152
9	8656	142	8760	8618	8664	8611	152
10	8661	105	8715	8610	8664	8611	152
11	8669	129	8752	8623	8664	8611	152
12	8662	43	8678	8635	8664	8611	152
13	8657	40	8678	8638	8664	8611	152
14	8675	104	8726	8622	8664	8611	152
15	8688	91	8752	8661	8664	8611	152
16	8697	113	8777	8664	8664	8611	152
17	8720	123	8772	8649	8664	8611	152
18	8726	69	8771	8702	8664	8611	152
19	8720	103	8772	8669	8664	8611	152
20	8737	64	8776	8712	8664	8611	152
21	8701	131	8758	8627	8664	8611	152
22	8615	82	8654	8572	8664	8611	152
23	8611	62	8643	8581	8664	8611	152
24	8613	186	8674	8488	8664	8611	152
25	8570	109	8616	8507	8664	8611	152
26	8536	68	8577	8509	8664	8611	152
27	8523	53	8545	8492	8664	8611	152
28	8494	95	8535	8440	8664	8611	152
29	8488	78	8530	8452	8664	8611	152
30	8480	97	8523	8426	8664	8611	152
31	8515	84	8565	8481	8622	8555	194
32	8564	168	8652	8484	8622	8555	194
33	8613	88	8670	8582	8622	8555	194
34	8582	105	8648	8543	8622	8555	194
35	8598	110	8650	8540	8622	8555	194
36	8593	47	8615	8568	8622	8555	194
37	8588	100	8640	8540	8622	8555	194
38	8559	143	8655	8512	8622	8555	194
39	8532	176	8626	8450	8622	8555	194
40	8553	122	8616	8494	8622	8555	194

Subgrupo	X barra	R	Max valor	Min valor	LSC	LIC	LSCR
41	8548	93	8587	8494	8622	8555	194
42	8496	102	8546	8444	8622	8555	194
43	8534	169	8613	8444	8622	8555	194
44	8575	165	8640	8475	8622	8555	194
45	8605	143	8664	8521	8622	8555	194
46	8584	121	8652	8531	8622	8555	194
47	8594	101	8654	8553	8622	8555	194
48	8580	133	8650	8517	8622	8555	194
49	8603	80	8640	8560	8622	8555	194
50	8652	57	8674	8617	8622	8555	194
51	8535	139	8618	8479	8622	8555	194
52	8598	96	8648	8552	8622	8555	194
53	8606	120	8681	8561	8622	8555	194
54	8625	75	8665	8590	8622	8555	194
55	8627	79	8663	8584	8622	8555	194
56	8649	72	8680	8608	8622	8555	194
57	8636	59	8665	8606	8622	8555	194
58	8638	93	8682	8589	8622	8555	194
59	8628	123	8682	8559	8622	8555	194
60	8638	100	8682	8582	8622	8555	194

Valores de $\bar{X}$ e R obtidos para os subgrupos 1 a 60 para a característica momento linear estático:

Subgrupo	X barra	R	Max valor	Min valor	LSC	LIC	LSCR
1	121640	2781	123077	120296	121743	120729	2924
2	122778	1470	123312	121842	121743	120729	2924
3	121715	2700	123300	120600	121743	120729	2924
4	121988	1613	123300	121687	121743	120729	2924
5	121459	1085	122150	121065	121743	120729	2924
6	121378	1088	121998	120910	121743	120729	2924
7	121712	465	121998	121533	121743	120729	2924
8	121264	2745	122572	119827	121743	120729	2924
9	121113	2177	122622	120445	121743	120729	2924
10	121640	2434	122879	120445	121743	120729	2924
11	121405	2071	122879	120808	121743	120729	2924
12	121000	1039	121532	120493	121743	120729	2924
13	121021	1819	122180	120361	121743	120729	2924
14	120802	1611	122000	120389	121743	120729	2924
15	121625	2165	122923	120758	121743	120729	2924

Subgrupo	X barra	R	Max valor	Min valor	LSC	LIC	LSCR
16	122409	1092	123087	121995	121743	120729	2924
17	122899	553	123087	122534	121743	120729	2924
18	122995	929	123422	122493	121743	120729	2924
19	122753	1080	123360	122280	121743	120729	2924
20	122827	946	123360	122414	121743	120729	2924
21	122138	2236	123175	120939	121743	120729	2924
22	120866	1570	121577	120007	121743	120729	2924
23	121107	881	121433	120552	121743	120729	2924
24	120806	2881	121958	119077	121743	120729	2924
25	120103	1303	120380	119077	121743	120729	2924
26	119703	4072	123118	119046	121743	120729	2924
27	119362	1095	119524	118429	121743	120729	2924
28	119081	1269	119510	118241	121743	120729	2924
29	118945	1423	119664	118241	121743	120729	2924
30	118559	776	119043	118267	121743	120729	2924
31	119108	964	119684	118720	120944	119729	3527
32	119883	2033	120753	118720	120944	119729	3527
33	120722	1309	121290	119981	120944	119729	3527
34	120261	1657	121375	119718	120944	119729	3527
35	120350	1395	121375	119980	120944	119729	3527
36	120162	973	120487	119514	120944	119729	3527
37	119919	934	120447	119513	120944	119729	3527
38	119762	2499	121221	118722	120944	119729	3527
39	119602	2499	121221	118722	120944	119729	3527
40	119677	1505	120551	119046	120944	119729	3527
41	119771	1642	120378	118736	120944	119729	3527
42	119052	1577	119975	118398	120944	119729	3527
43	119438	4073	122401	118328	120944	119729	3527
44	120831	4073	122401	118328	120944	119729	3527
45	120798	1081	121433	120352	120944	119729	3527
46	120866	2143	122050	119907	120944	119729	3527
47	121072	1663	121570	119907	120944	119729	3527
48	121581	3519	123103	119584	120944	119729	3527
49	120817	4935	123029	118094	120944	119729	3527
50	119636	3956	122050	118094	120944	119729	3527
51	119590	1961	120692	118731	120944	119729	3527
52	120298	1410	120929	119519	120944	119729	3527
53	120511	1724	120929	119205	120944	119729	3527
54	119934	1797	121002	119205	120944	119729	3527
55	120409	1290	121002	119712	120944	119729	3527
56	120876	2026	121738	119712	120944	119729	3527
57	120694	315	120759	120444	120944	119729	3527
58	121413	1400	121844	120444	120944	119729	3527
59	121339	1200	121844	120644	120944	119729	3527
60	121725	1660	122727	121067	120944	119729	3527