

FACULDADE CATÓLICA SALESIANA DO ESPÍRITO SANTO

VICTOR VINICIUS BRAGANÇA DANTAS

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CONTROLE DE  
CALIBRAÇÃO DA PRENSA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE  
PELOTA QUEIMADA**

VITÓRIA

2016

VICTOR VINICIUS BRAGANÇA DANTAS

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CONTROLE DE  
CALIBRAÇÃO DA PRENSA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE  
PELOTA QUEIMADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade Católica Salesiana do Espírito  
Santo, como requisito obrigatório para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Produção

Orientador: Prof. Fernando Oliveira Boechat

VITÓRIA

2016

VICTOR VINICIUS BRAGANÇA DANTAS

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CONTROLE DE  
CALIBRAÇÃO DA PRENSA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE  
PELOTA QUEIMADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Católica Salesiana do Espírito Santo, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_, por:

\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Fernando Oliveira Boechat - Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Flavio Lucio Santos de Carvalho, Faculdade Católica Salesiana

\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Wesley Lucas Breda, Faculdade Católica Salesiana

Aos acadêmicos de Engenharia de Produção.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, agradeço por estar comigo todos os dias, me sustentando na sua presença e me fazendo caminhar nos teus estatutos, sempre alimentando a minha fé e direcionando teus planos na minha vida. A Deus seja dada a glória para todo sempre!

Aos meus pais, Marcos e Marli, pela excelente educação que me deram. Por estarem sempre comigo e mesmo com todas as dificuldades, com muita luta, me fizeram chegar onde cheguei, sem ferir meus princípios que com eles aprendi ao qual prezaram durante a minha vida. Obrigado.

À minha irmã Sheila, pela compreensão, paciência e por todos os ensinamentos que dela recebi desde muito pequeno.

À Thamyres, minha amada, pela paciência, compreensão, carinho, e por estar presente nos momentos difíceis em que às vezes pensei em desistir. Ela sempre me encorajou e me encoraja até hoje a vencer os desafios.

Ao Professor, Msc. Fernando Boechat, orientador do trabalho de conclusão de curso pela dedicação, empenho e ajuda na elaboração do trabalho. Vou leva-lo sempre como exemplo por onde passar, não só como excepcional Engenheiro de Produção, mas também como mestre dentro das salas de aula.

Aos meus amigos, irmãos em Cristo, colegas de trabalho e da faculdade, pela oportunidade de conhecê-los e juntos vivermos intensamente esta etapa da minha vida.

Aos professores do curso de Engenharia de Produção da Faculdade Católica Salesiana pelos ensinamentos e pela amizade obtida durante todos estes anos.

Muito obrigado!

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton.

## RESUMO

O aço tem forte impacto em nossas vidas por estar presente em praticamente todas as atividades do nosso cotidiano. Para sua obtenção é necessário Minério de Ferro de qualidade que precisa de resistência durante o seu manuseio e sob redução nos altos-fornos e fornos elétricos das siderúrgicas. Para garantir esta qualidade, vários ensaios fornecem informações valiosas, sendo que um dos ensaios que especifica a resistência das pelotas de Minério de Ferro é a análise do teste de resistência à compressão. Desta forma o presente trabalho tratou do estudo da metodologia de controle de calibração da prensa de resistência a compressão de pelotas queimadas utilizando como padrão secundário pelotas de Minério de Ferro, em comparação com uma nova metodologia utilizando uma mola de compressão. Tal comparação foi feita de modo que esta não violasse na norma ISO 4700 e também visasse a redução do tempo de preparo da carta de controle e dos custos envolvidos nesse processo. Em três prensas distintas, sob mesma condição de temperatura e calibração, foi realizada a montagem de duas cartas de controle: uma utilizando pelotas e outra utilizando a mola de compressão. Todos os dados foram tratados com o recurso do Excel, e do programa MINITAB para construção das cartas de controle e análise de variância. Ao final, com base nos valores médios, pôde-se avaliar que a dispersão dos dados obtidos com pelotas nas prensas é muito maior em contrapartida a carta feita com mola, mostrando-se um fator favorável a utilização da carta de controle por mola devido à baixa variabilidade dos valores encontrados na mesma.

**Palavras-chave:** Carta de controle. Compressão. Mola. Pelota de Minério de Ferro.

## ABSTRACT

Steel has such an impact on our lives by being present in almost all the activities of our daily. To obtain it is necessary quality iron ore that needs resistance during handling and under reduction in blast furnaces and electric furnaces of steel. In order to ensure quality, various tests provide valuable information, and one of the tests that specifies the strength of iron ore pellets is the analysis of Cold Compression Strength test. Thus, in this present work, It sought to study the methodology of calibration of cold compression strength test of iron ore pellet using iron ore pellet as a secondary standard, in comparison with a new methodology using a compression spring. Such a comparison was made to does not violate the ISO 4700 standard and also should aim to reduce the preparation time and costs involved in this process of construction of control chart. In three separate presses, under the same condition of calibration and temperature, were made two control charters: one using pellets and other using one compression spring. All data were analyzed with the use of Excel and MINITAB program for construction of control charts and analysis of variance. At the end, based on average values, it was possible to evaluate the dispersion of data in control charts with iron ore pellets in the presses is much higher in contrast the control charts made with compression spring, showing a favorable factor to use of the control chart with compression spring due to low variability of the values found.

**Keywords:** Control Charter. Cold Compression Strength test. Compression spring. Iron ore Pellet.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Consumo aparente dos produtos siderúrgicos: evolução.....	14
Figura 02 – Esquema simplificado da produção de pelotas de minério de ferro ..	19
Figura 03 – Influência da adição de água no Processo de Pelotização .....	22
Figura 04 – Forças atuantes na formação da pelota .....	23
Figura 05 – Etapas do ciclo térmico da pelota de minério de ferro.....	24
Figura 06 – Estrutura cristalina da pelota após a fase de queima.....	25
Figura 07 – Ensaio físicos e metalúrgicos para pelotas queimadas .....	27
Figura 08 – Gráfico de <i>tensão x deformação</i> de um metal.....	29
Figura 09 – Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração .....	31
Figura 10 – Corpo de prova alongado e encruado .....	32
Figura 11 – Alimentador vibratório da prensa de pelotas queimadas.....	33
Figura 12 – Sensor de presença da prensa de pelotas queimadas .....	34
Figura 13 – Tubo de alimentação.....	34
Figura 14 – Tela de resultado de ensaio de compressão.....	35
Figura 15 – Queda de 50% do diâmetro inicial da pelota.....	35
Figura 16 – Mola em ensaio de compressão .....	36
Figura 17 – Gráficos de controle .....	40
Figura 18 – Carta de controle de valor médio .....	41
Figura 19 – Carta de controle de variabilidade.....	41
Figura 20 – Seleção das pelotas para formação da carta de controle .....	47
Figura 21 – Divisor rotativo para homogeneização das amostras.....	47
Figura 22 – Processo de preparação de padrões internos de controle .....	48
Figura 23 – Mola de compressão .....	51
Figura 24 – Desenho da mola de compressão.....	52
Figura 25 – Mola centralizada durante o ensaio de compressão .....	53
Figura 26 – Teste de Análise de Variância (Minitab) para as prensas .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Reações químicas presentes em cada etapa.....	25
Tabela 02 – Resumo estatístico da prensa A.....	56
Tabela 03 – Resumo estatístico da prensa B.....	57
Tabela 04 – Resumo estatístico da prensa C.....	57
Tabela 05 – Dados para o teste de Análise de Variância.....	61

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Carta de controle utilizando pelotas.....	55
Gráfico 02 – Gráfico de probabilidade normal das médias das prensas .....	58
Gráfico 03 – Gráfico de controle da prensa A .....	59
Gráfico 04 – Gráfico de controle da prensa B .....	59
Gráfico 05 – Gráfico de controle da prensa C .....	60
Gráfico 06 – Boxplot dos resultados para as 3 prensas .....	63
Gráfico 07 – Carta de controle com maior variabilidade.....	64
Gráfico 08 – Carta de controle com os dados da mola .....	65

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO MINÉRIO.....	17
2.2 PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO .....	18
2.3 FORMAÇÃO DA PELOTA.....	22
2.3.1 Reações químicas durante a queima das pelotas.....	24
2.4 ASPECTOS LIGADOS AO CONTROLE DE QUALIDADE .....	26
2.5 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	28
2.5.1 Tensão e Deformação.....	28
2.5.2 Lei de Hooke .....	30
2.5.3 Tração e Compressão.....	31
2.5.3.1 Ensaio de resistência a compressão em pelotas de Minério de Ferro .....	32
2.5.3.2 Ensaio de resistência a compressão em molas .....	36
2.6 CONTROLE DE QUALIDADE.....	36
2.6.1 Controle Estatístico de Processo .....	37
2.6.1.1 Cartas de Controle .....	39
2.7 CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS.....	42
2.7.1 Calibração da prensa de pelotas queimadas .....	42
2.7.2 Validação de Métodos de Calibração.....	44
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	45
3.2 PREPARAÇÃO DOS PADRÕES DE CONTROLE .....	46
3.3 VALIDAÇÃO DA PRENSA UTILIZANDO PELOTAS E MONTAGEM DA CARTA DE CONTROLE .....	49
3.4 FABRICAÇÃO DA MOLA .....	49
3.5 CONFECÇÃO DA NOVA CARTA DE CONTROLE .....	52
3.5.1 Carta de controle da mola .....	52

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 RESULTADOS ENCONTRADOS EM UMA CARTA DE CONTROLE UTILIZANDO PELOTAS .....	55
4.2 RESULTADOS ENCONTRADOS DA MOLA PARA CADA PRENSA .....	55
4.2.1 Resumo estatístico por prensa.....	56
4.3 CARTAS DE CONTROLE DA MOLA AVALIADA NAS PRENSAS A, B e C..	58
4.4 ANOVA APLICADA NOS RESULTADOS DA MOLA PARA CADA PRENSA	60
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE CARTA DE CONTROLE COM PELOTAS E CARTA DE CONTROLE COM A MOLA .....	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	67
5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A – Valores médios encontrados para a prensa A.....	75
APÊNDICE B – Valores médios encontrados para a prensa B.....	76
APÊNDICE C – Valores médios encontrados para a prensa C.....	76

## 1 INTRODUÇÃO

O aço tem forte impacto em nossas vidas por estar presente em praticamente todas as atividades do nosso cotidiano. Desde que acordamos, estamos rodeados por esse elemento, basta olha em volta. Presente nas indústrias, nos vergalhões das colunas que dão sustento a uma casa, nas imensas tubulações que levam o Minério de Ferro de uma região a outra, designados minerodutos. Está presente nos transportes ferroviário, aeronáutico, marítimo, nas linhas de transmissão de energia elétrica, nas redes de telefonia, nos bens duráveis, em máquinas, etc. Devido sua força, o aço mudou o curso da história e a forma em que vivemos até hoje, de modo que seria inviável a ideia de um mundo moderno sem ele.

Suas aplicações são inúmeras, variáveis. Isso faz com que este material seja importante para economia mundial e para nossas vidas. Diferente de outros materiais da natureza como o Ouro e a Prata, o aço tem participação do homem na sua formação, desde a extração da matéria prima, o Minério de Ferro, passando pela transformação em aços com características distintas, até a confecção de elementos de máquinas.

Nos últimos anos, a indústria siderúrgica tem ganhado bastante destaque no cenário mundial, devido ao momento em que vive de altas demandas, apesar da crise dos mercados americano e europeu. Para Boechat (2013), depois da última grande crise mundial ocorrida no ano de 2001, quando a produção de aço bruto fechou em baixa, o setor siderúrgico vem crescendo por ano a um ritmo médio de quase 7,8%, e este patamar só foi alcançado devido à grande influência do mercado chinês e o excepcional crescimento do seu parque siderúrgico.

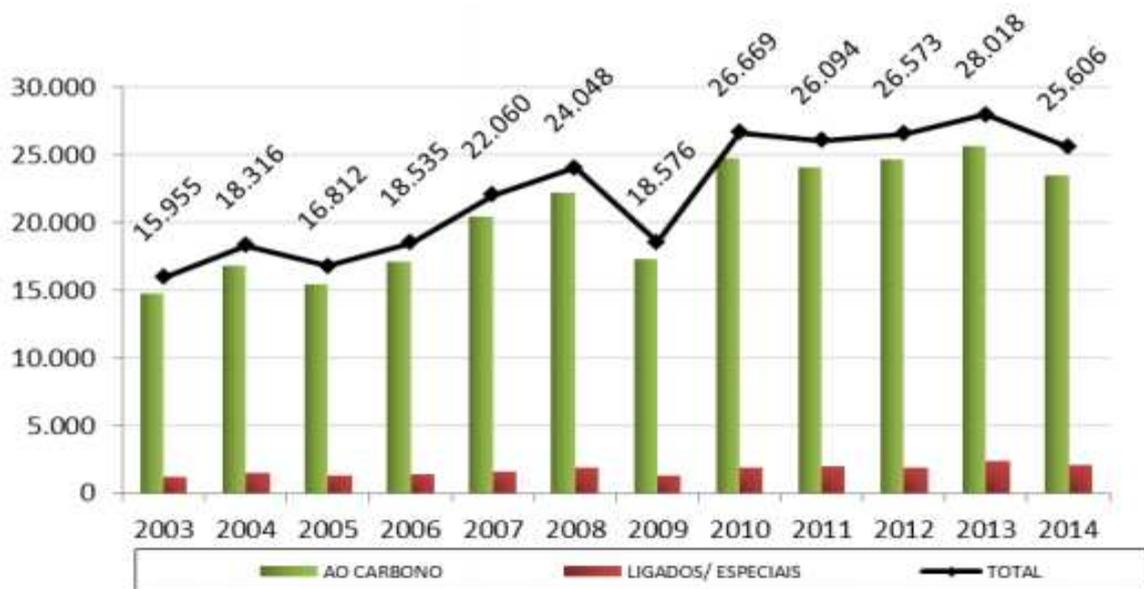
Em 2014, o mercado siderúrgico passou por grandes quedas em seus índices de consumo aparente. O consumo aparente, segundo o Instituto Brasil do Aço (2016), mede-se com os valores de produção de determinado país ou região, importações feitas naquele ano e exportações do produto, conforme equação abaixo:

$$\textit{Consumo Aparente} = \textit{Produção} + \textit{Importações} - \textit{Exportações}$$

Segundo o Mercado Brasileiro de Aço (2015), a forte queda de 8,6 % no consumo aparente de produtos siderúrgicos está ligada diretamente a redução de vendas dos

principais setores consumidores de aço. Em 2013 foram consumidos cerca de 28 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos contra 25 milhões consumidos no ano de 2014, ou seja, uma queda de quase 3 milhões de toneladas em apenas um ano. Isso se levarmos em consideração os aços ligados/especiais e os aços ao carbono, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Consumo aparente dos produtos siderúrgicos: evolução.



Fonte: (MERCADO BRASILEIRO DE AÇO, 2015)

De acordo com o Instituto Brasil do Aço (2016), depois de um ano complicado para o mercado chinês, conseqüentemente, para o mercado brasileiro, em 2016 as vendas de Minério de Ferro subiram, nos quatro primeiros meses, 30% em relação ao mesmo período no ano de 2015.

De enorme importância para o setor siderúrgico e seguindo os mesmos passos, cresce também a produção de Minério de Ferro, que comumente pode ser comercializado nas formas de:

- i. “Lump ore” ou minério granulado, que é normalmente peneirado e enornado diretamente em reatores de redução, e;
- ii. “Sínter Feed” ou finos de minério, que concentrados dão origem a um outro produto chamado de “Pellet Feed” ou concentrados de Minério de Ferro, que através do seu beneficiamento, transformam-se em “pellets” ou pelotas de Minério de Ferro (objeto de estudo).

Sabendo que a pelota é um conglomerado de finos de Minério de Ferro que, em outra circunstância, seria inviável utilizá-lo em fornos redutores, faz-se necessário a avaliação da sua qualidade e características. Sua homogeneidade granulométrica e química e o seu baixo nível de degradação física ocorridos durante o manuseio e sob redução nos altos-fornos e fornos elétricos das siderúrgicas, são características que atraem os produtores de Ferro primário.

Vários ensaios fornecem tais informações, sendo que um dos ensaios é o de resistência das pelotas de Minério de Ferro, ou seja, a análise do teste de resistência à compressão. Estes ensaios levam a indústria pelletizadora a tomar decisões importantes, tais como:

- i. Aumento ou diminuição da quantidade produzida;
- ii. Temperatura dos fornos e;
- iii. Nível da camada de forramento durante a etapa de queima.

Todos esses índices impactam diretamente na qualidade de resistência a compressão do produto final, no caso a pelota.

Durante o ensaio de resistência à compressão, a pelota é submetida a uma força contrária, levando a ruptura ou deformação plástica do corpo de prova. Neste sentido, Callister (1991) afirma que o teste de resistência à compressão deve ser conduzido de maneira similar a um teste de tração, porém exercendo uma força compressiva ao longo dos planos de modo que a amostra se contraia ao longo da direção da tensão.

Conforme a ABNT NBR ISO 4700:2010, a norma de determinação da resistência vem especificar um método para definir uma medida da carga de compressão para pelotas de Minério de Ferro como insumo para alto-forno e redução direta que, quando atingida, causa ruptura de pelotas. Esta norma aplicar-se-á a pelotas queimadas.

Com isso, é necessário haver um controle de calibração dos instrumentos de medição realizados periodicamente, afim de que ofereçam as respostas reais ou mais próximas do real possível, levando em consideração que se trata de um laboratório de controle de qualidade e que este realiza o teste de compressão diversas vezes ao dia. Para isso, utiliza-se o chamado Controle Estatístico de Processo (CEP), sendo um dos exemplos mais conhecido a Carta Controle.

Com o resultado da amostra padrão de controle, cujo o teste é realizado diariamente ao iniciar a rotina de um laboratório de testes físicos, e aplicando o método qualitativo da carta controle, pode-se dizer se a prensa de compressão está apta ou não para realizar os testes de produção daquele dia.

Para tanto, na criação das amostras padrão de controle, utiliza-se o Manual de Montagem da Carta Controle elaborado pela empresa Vale (2012), onde a cada 04 meses é realizado um trabalho de preparação das amostras padrões que faz a validação da prensa de resistência à compressão. Se levado em consideração o trajeto do pessoal, cerca de 30% do contingente é deslocado para a realização do trabalho, este processo torna-se ainda mais custoso e demorado.

Com base nesta ótica que surgiu o interesse em propor uma nova metodologia, visando à redução do tempo de preparo e custos envolvidos no processo de pelotização sem que o mesmo infira na norma ABNT BR ISO 4700:2010, mantendo as especificidades da qualidade do processo.

O objetivo geral deste trabalho é comparar a metodologia atual de controle de calibração da prensa de resistência à compressão de pelota queimada, com a metodologia proposta, visando à redução do tempo de preparo e dos custos envolvidos neste processo, sem alterar as normas já implícitas da ABNT NBR ISO 4700:2010. O objetivo geral será desdobrado nos seguintes objetivos específicos: avaliar o processo atual de metodologia de controle de calibração, comparando oportunidades de melhoria e pontos positivos; aplicar metodologia proposta com a utilização da mola, comparar os resultados e aferi-los com foco em redução no tempo de preparo e custos envolvidos nos processos.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO MINÉRIO

Conforme o Manual de Operação das Usinas III e IV elaborado pela empresa Vale (2012), durante o processo de recuperação do minério de ferro das minas, o que se encontra são três tipos granulométricos de minério, que basicamente são:

- i. Granulado: cujo tamanho médio é maior que 6 mm;
- ii. Sínter Feed: cujo tamanho varia de 0,15 a 6 mm, e;
- iii. Pellet Feed: que são os minérios de tamanho inferior a 0,15mm.

Os dois últimos serão usados nos processos de sinterização e pelletização, respectivamente. Após transformarem-se em sínter e pelota, juntamente com o granulado, serão utilizados em grandes reatores de redução para a produção do aço.

Ainda, segundo o Manual de Operações das Usinas III e IV, (Vale, 2012), todo minério de ferro extraído das minas é separado, posteriormente, em rejeito e produto. Minérios do tipo Hematítico possuem concentração de 60 a 68% Ferro em sua composição. Já os do tipo Itabirítico, concentram entre 45 e 60% de Ferro em sua composição.

Para tanto, Boechat (2013) explica que o minério pode ser extraído em minas a céu aberto ou subterrâneas. No caso do Brasil, o processo mais comum empregado é a extração a céu aberto, de modo que o transporte é realizado por meio de correias ou caminhões.

Durante as operações de lavra e beneficiamento de minérios, há uma grande concentração de finos na faixa <100# (lê-se: menor que 100 mesh). Porém, este material não poderia ser utilizado na sinterização já que afetaria na permeabilidade do leito dentro do alto forno. Fonseca (2002) ressalta que “os processos de lavra, classificação, manuseio e transporte de Minério de Ferro geram uma quantidade elevada de partículas finas ultrafinas, cuja aplicação direta da indústria siderúrgica é impraticável”.

Com o intuito de aproveitar tais finos, surgiu então a Pelotização.

“A partir de 1940, o processo de pelotização passou a ser adotado devido à necessidade de aproveitarem-se minérios mais pobres, os quais eram sujeitos à concentração, que por sua vez necessitavam de cominuição mais intensa do minério e, portanto, maior geração de finos.” (BOECHAT, 2013 apud MEYER, 1980, p. 8).

De tal modo, entende-se que o processo consiste na mistura dos finos com aditivos e aglomerantes químicos. No final, essa mistura sofrerá um tratamento térmico (queima) em fornos verticais para melhorar sua resistência física.

## 2.2 PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

A pelotização é o processo que se dá a partir da aglomeração de finos de minério gerados durante a lavra, o manuseio e o transporte, cujo destino originalmente seria o descarte, já que o seu tamanho não ultrapassa a fração de 0,15mm. Para Fonseca e outros (2002), o processo de pelotização se deu inicialmente com o objetivo de viabilizar o aproveitamento comercial dos finos e obter elevação no rendimento da produção das minas, possibilitando que as partículas agregadas tivessem aplicação direta nos fornos siderúrgicos.

Desta forma, Diniz (2014, p. 14), afirma que o processo de pelotização de Minério de Ferro:

“[...] foi criado inicialmente com o objetivo de aproveitar os finos de minério de ferro gerados durante sua lavra e beneficiamento e que não eram aproveitados nos processos de redução devido a sua dificuldade de manuseio e transporte, e principalmente, por diminuir a permeabilidade dos gases redutores no interior dos altos-fornos. Além disso, os materiais finos eram carregados pelo fluxo de gases durante o processo de redução, gerando grande quantidade de emissão de poeira na atmosfera.”

Com isso, entende-se que a pelotização tem por objetivo aglomerar os finos de minério, juntamente com alguns fundentes e, a elevadas temperaturas, sofrer um processo de ligação do tipo covalente entre as partículas, resultando na pelota.

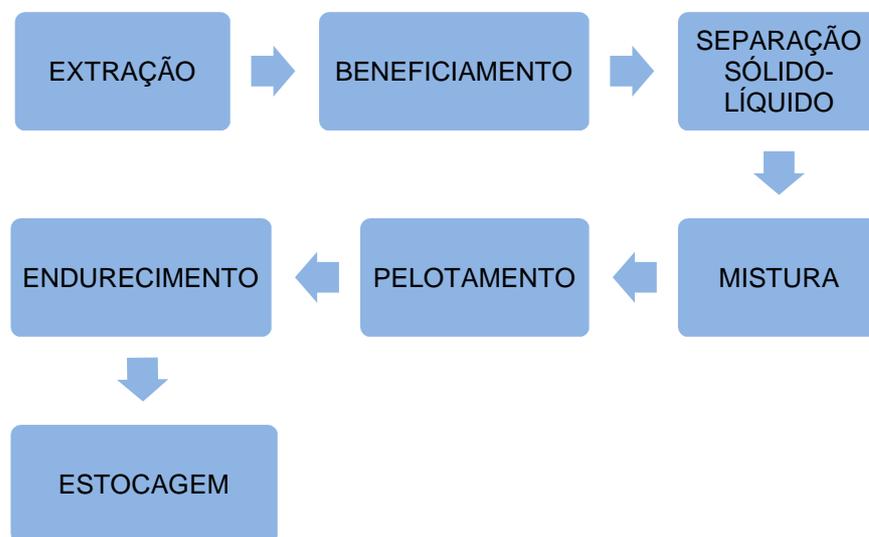
Logo, os autores Machado, Oliveira e Milagre (2012) afirmam que “[...] a pelotização é um processo de aglomeração que tem por objetivo transformar a fração ultrafina de Minério de Ferro em pelotas com qualidade.” Neste mesmo sentido, Boechat (2013) assegura que o processo de pelotização é realizado devido à alta necessidade de se

reaproveitar os finos de Minérios de Ferro, porquanto a escassez de minérios e granulados de boas características qualitativas.

Submetidas a elevadas temperaturas (1300-1350 °C) em atmosfera altamente oxidante, realizar-se-á além sinterização dos grãos das pelotas formadas, o ajuste químico e físico da qualidade da carga.

O processo produtivo de pelotas pode ser dividido nas etapas de extração, beneficiamento, separação sólido-líquido, mistura, pelotamento e endurecimento (Figura 2). Cada etapa é interligada, tendo influência nas etapas subsequentes.

Figura 2 - Esquema simplificado da produção de pelotas de Minério de Ferro.



Fonte: Elaboração própria.

A extração de minério pode se dar de duas maneiras distintas: extração a céu aberto ou subterrâneas, sendo a primeira forma a mais utilizada no Brasil. Todas as ações desta etapa implicarão na etapa seguinte que é o beneficiamento.

De acordo com as características do minério extraído, será escolhido um tipo de beneficiamento mais apropriado para tal. Os tipos mais comuns de beneficiamento são:

- i. Britagem: pode ser definida como o conjunto de operações que tem por objetivo fragmentar grandes materiais, levando-os a granulometria de tamanho que varia de 1000mm a 100mm;
- ii. Moagem: processo de cominuição do material que visa reduzir o tamanho de 10mm a 0,8mm;

- iii. Separação: o objetivo é remover os minérios de ganga (o que não é aproveitado) dos minerais de minério (minerais valiosos).

Após a extração do minério, dar-se-á a formação das pilhas em pátios de estocagem, que será feita por meio de programação em função do tipo de pelota que será produzida. A carga que será alimentada no processo de pelotização pode ser constituída de diversos tipos de Minério de Ferro e seus aditivos químicos. Com o desígnio de tornar mínimas as flutuações físicas e químicas das propriedades das diversas matérias-primas inerentes à sua gênese, estrutura cristalina, é que são formadas enormes pilhas que posteriormente serão homogeneizadas.

Tal homogeneização permite viabilizar a mistura de fundentes e combustíveis sólidos à matéria-prima. Para Goossens (2004, p. 1), “[...] os circuitos de moagem que abastecem usinas de pelotização de Minério de Ferro apresentam características, equipamentos e fluxogramas diferentes [...]”. É neste processo de moagem que o ajuste das propriedades físicas da mistura é feito. Ainda, em conformidade com o Manual de Operação das Usinas III e IV elaborado pela empresa Vale (2012), destaca-se que é nesta parte do processo de moagem, que o tamanho da partícula é reduzido para a faixa ( $<0,045\text{mm}$ ) e a sua superfície específica, entre 1700 e 1900  $\text{cm}^2/\text{g}$ , sendo a última variável, fator determinante para o sucesso na formação de uma boa pelota.

Neste mesmo sentido, Graça (2015 p. 3) afirma que:

“Na pelotização o processo de moagem é necessário para adequação dos valores de superfície específica e da distribuição granulométrica para facilitar o acesso de agentes químicos e garantir o empacotamento das partículas no processo de pelotamento. A granulometria controlada na moagem é referenciada pela peneira de malha 0,045 mm e quanto mais reduzida for a granulometria do material moído, maior será sua superfície específica. Define-se área superficial específica como sendo a área por unidade de massa, expressa em centímetros quadrados por grama ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).”

Para Ribeiro e Abrantes (2001), a granulometria das partículas exerce forte influência nas propriedades físicas do produto que será gerado. Comumente, o processo de moagem ocorre em moinhos tubulares, utilizando bolas constituídas de Carbono, Sílica e Cromo, como corpos moedores.

O circuito de moagem apresenta diferentes configurações, podendo ser feito a úmido ou a seco e aberto ou fechado. O minério passa por classificação nas baterias de hidrociclones, onde o de maior tamanho (underflow) retorna aos moinhos e o de

menor tamanho (overflow) vai para a etapa de espessamento, cuja função é adequar o percentual de sólidos do overflow da ciclonagem, às necessidades da filtragem. E como função secundária, disponibilizar água de processo para transporte via mineroduto passando para os tanques homogeneizadores. Nestes, é feita a adição de carvão antracito moído que juntamente com o Calcário adicionado na etapa de moagem, formam os fundentes, responsáveis pela queima interna da pelota. É importante que nesta etapa haja um controle na quantidade adicionada, pois esta será responsável também pela qualidade dos resultados de resistência à compressão.

O material é assim bombeado para os discos de filtragem reduzindo assim sua umidade para 9%. A torta, comumente conhecida, passa por uma espécie de prensagem, novamente com o objetivo de redução das partículas. A etapa de mistura é responsável por ajustar a composição química do material prensado, visando a formação de pelotas cruas mais resistentes. A importância na eficiência da mistura, garante a redução dos desvios dos parâmetros de qualidade. Os principais aglomerantes são divididos em dois grandes grupos. Sendo eles: inorgânicos (Bentonita e Cal Hidratada) e orgânicos.

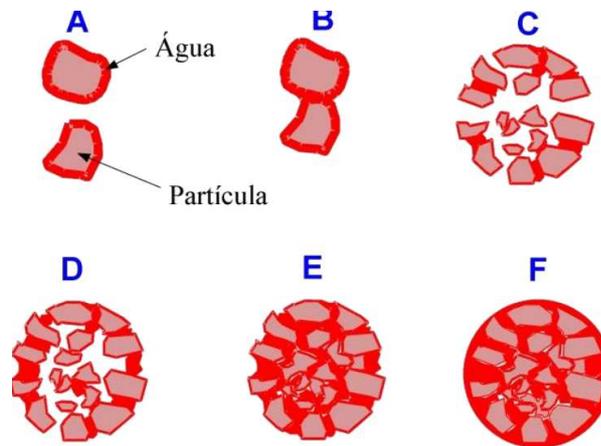
Já com a composição química ajustada, o material segue para os discos de pelotamento. Souza (2014, p. 4), afirma que: “[...]O *Pellet Feed* é inicialmente direcionado para o silo de pelotamento, onde ficará estocado provisoriamente para, em seguida, ser direcionado para os discos pelotizadores. ” Uma vez formadas as pelotas seguem para a etapa de separação por tamanho feita em peneiras de rolos e condicionadas em carros de grelha para etapa de queima ou endurecimento das partículas.

Por fim as pelotas, agora consolidadas, passam por peneiramento mecânico, de forma a separar as pelotas e finos formados de tamanho inferior a 6,3 mm, que são considerados resíduos do processo, sendo estocados e comercializados a parte. As pelotas dentro do tamanho adequado aos processos subsequentes são estocadas em pátio a céu aberto até o momento de serem transportadas aos seus respectivos clientes.

## 2.3 FORMAÇÃO DA PELOTA

Na etapa de pelotamento, é comum a adição de água à formação das pelotas “verdes” ou “cruas”. O termo “cruas” se dá devido o material aglomerado não ter sofrido qualquer processo de secagem ou endurecimento. A água é adicionada proporcionando umidade necessária à formação das pelotas e a sua quantidade varia de acordo com o material a ser pelotizado. Por isso, no processo de pelotização, a umidade adquirida nessa etapa irá prover a força de coesão necessária para a união das partículas de minério. A coesão das partículas dar-se-á na seguinte ordem, conforme Figura 3.

Figura 3 - Influência da adição de água no Processo de Pelotização.

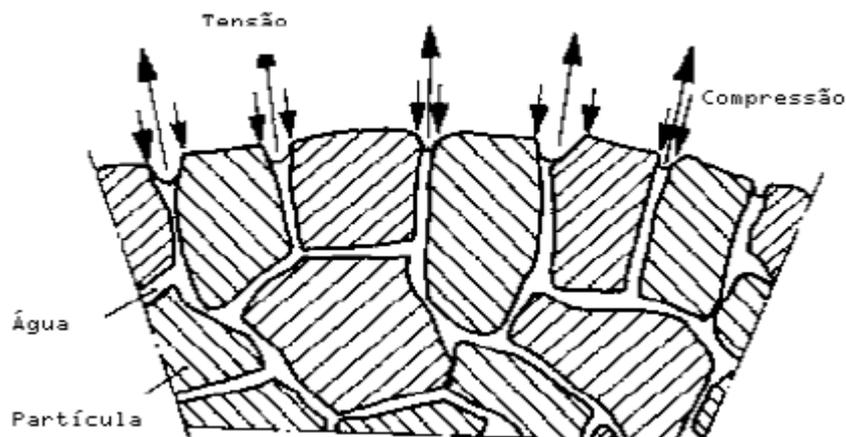


Fonte: (SILVA, 2013).

- A. A princípio as partículas de minério são envolvidas por uma película fina de água adicionada aos misturadores ou discos de pelotamento.
- B. Por existir um fenômeno conhecido como tensão superficial, são formadas pontes de hidrogênios que asseguram a aglomeração das partículas, unindo os grãos no momento do pelotamento.
- C. Formação dos primeiros aglomerados. A princípio, as pontes líquidas que aparecem são fracas e predominam-se os vazios.
- D. Ao adicionar uma quantidade maior de água, mais pontes líquidas são formadas e os aglomerados tornam-se maiores e mais densos.
- E. Os vazios entre os grãos são preenchidos de modo que a água ainda assim não envolva toda a superfície da partícula.
- F. Grãos totalmente envolvidos pela água. É a última etapa do pelotamento.

A água existente no interior das pelotas é classificada em dois tipos principais: água capilar/umidade ou água combinada. A água capilar/umidade, é a água absorvida pela pelota durante o processo de pelletização. Como observado na Figura 4, a pelota crua possui um complexo sistema de irrigações internas que estão cheios de água absorvida e é por esses canais que são exercidas as forças de compressão e tensão superficial da água, o que garante a constância da pelota.

Figura 4 - Forças atuantes na formação da pelota.

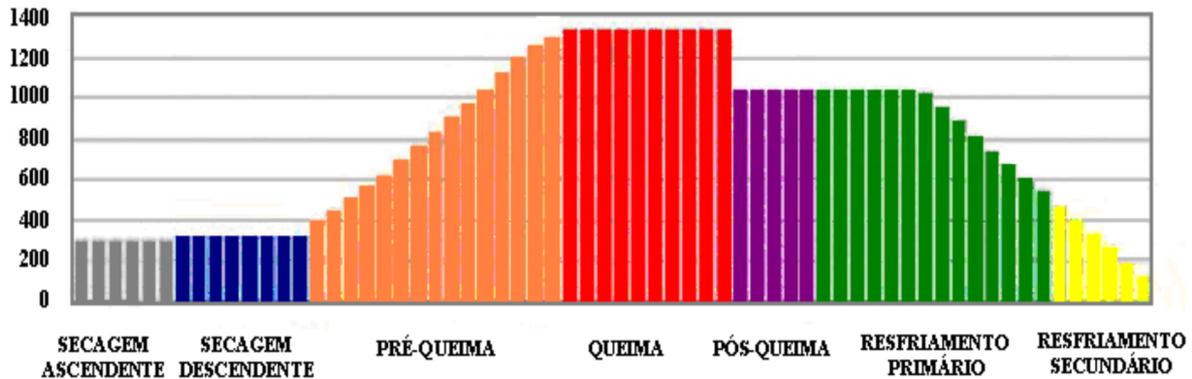


Fonte: (NUNES, 2004).

Por sua vez, a água combinada de um mineral é a porcentagem de água que combinou com a molécula do mineral e que por consequência está ligada quimicamente a ele. Um exemplo é a Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que reage com a água e se hidrata formando a Goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Uma vez combinada, a água só pode ser extraída com o fornecimento de energia, neste caso o calor dos fornos de tratamento térmico. Durante a fase de endurecimento da pelota, de uma forma resumida, está submetida às seguintes etapas, conforme Figura 5.

Figura 5 - Etapas do ciclo térmico da pelota de Minério de Ferro.

Temperatura em °C



Fonte: (COSTA, 2008).

- i. Secagem (300 - 350 °C): ocorre a remoção parcial da água;
- ii. Pré-Queima (400 - 1250 °C): onde ocorre a remoção da água de cristalização;
- iii. Queima (1300 - 1350 °C): acontece a consolidação das reações entre Ferro e escória;
- iv. Pós-Queima (900 - 1000 °C): calor dentro do forno é homogeneizado;
- v. Resfriamento (900 - 80 °C): recuperação do calor.

### 2.3.1 Reações químicas durante a queima das pelotas

No percorrer das etapas de aquecimento e queima das pelotas acontece uma sequência de reações químicas (Tabela 1). A qualidade da queima é responsável pela formação de uma ampla variedade de compostos químicos que juntos formam a estrutura interna da pelota. Tais compostos conhecidos como fases mineralógicas, são responsáveis pela resistência física e pela qualidade metalúrgica das pelotas.

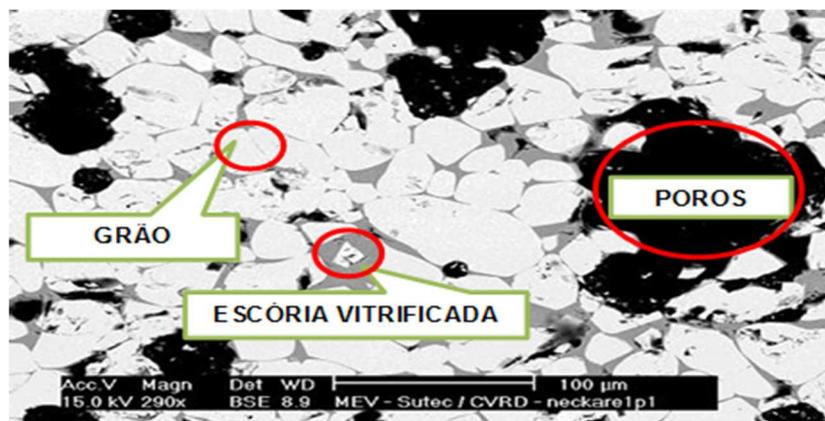
Tabela 1 - Reações químicas presentes em cada etapa.

FASES	TEMPERATURA	TIPO DE REAÇÃO QUÍMICA
Secagem e Aquecimento	A partir de 650°C	Perda de água absorvida e água capilar Decomposição térmica de fundentes tipos Carbonatos, Hidróxidos de Cálcio e Magnésio e de argilas tipo Bentonita bem como ataque químico do Óxido de Cálcio sobre a Hematita e sobre componentes da Bentonita.
Aquecimento e Pré-Queima	650-1000°C	Interação entre Silicatos de Cálcio e de Cálcio-Ferritas formando Silicatos Férricos de Cálcio e escória, seguido pela conversão gradual da Hematita para Magnetita.
Pré-Queima e Queima	1200-1350°C	Conversão gradual da Magnetita formada para Hematita secundária e remoção forçada de calor das pelotas.
Pós-Queima e Resfriamento	1200-200°C	

Fonte: (CUNHA, 2008).

Na etapa de queima, sucede a fusão de certos compostos, tais como Alumina, Sílica, Calcário, Cal, Dolomita, formando uma escória vitrificada que envolve os grãos de Minério de Ferro, como pode ser visto na Figura 6. Desta forma, atribuindo melhor resistência à compressão às pelotas.

Figura 6 - Estrutura cristalina da pelota após a fase de queima.



Fonte: (CUNHA, 2008).

## 2.4 ASPECTOS LIGADOS AO CONTROLE DA QUALIDADE

A avaliação da qualidade das pelotas é feita basicamente utilizando resultados de diferentes ensaios e testes, dentre os quais pode-se citar:

- i. Controle da química da pelota;
- ii. Ensaio metalúrgicos;
- iii. Testes físicos.

O controle constante dos processos é categoria básica para a conservação da qualidade de bens e serviços. Para Costa, Eprechet e Carpinetti (2013), qualidade denota o valor do bem ou do serviço, ou seja, quão mensurável é o grau de satisfação do consumidor com relação a quesitos, como preço, confiabilidade, pontualidade, entre outros. Para explicar o significado de qualidade, Juran (1991) baseia-se no seu *ciclo de controle* que consiste em avaliar o desempenho operacional real; comparar o desempenho real com objetivos; agir com base na diferença.

Necessariamente todos os ensaios de controle de qualidade são regidos por uma única norma internacional, a International Organization for Standardization (ISO).

Para Boechat, a análise química tem a função de controlar o teor de Ferro na pelota e também o objetivo de determinar os percentuais de principais elementos químicos como Sílica, Magnésio e Enxofre, presentes na composição da pelota. Com estes resultados é possível prever o comportamento da carga dentro dos altos fornos e fornos elétricos de redução.

A avaliação das propriedades metalúrgicas é mais complexa e os ensaios tem evoluído no tempo, em função dos desenvolvimentos tecnológicos verificados no campo da redução. Para Costa (2008), quanto ao aspecto metalúrgico, é aceitável que as pelotas apresentem alta redutibilidade com volume adequado e tamanho de poros, não afetando sua resistência física.

Para as pelotas destinadas aos altos fornos existe uma série de ensaios aplicados no meio técnico. E estes são divididos de acordo com a aplicação final de cada tipo de pelota. Sendo: Pelotas para alto forno (porosidade, inchamento, redutibilidade, desintegração) e Pelotas para redução direta (ensaio de Colagem, redutibilidade e desintegração e metalização).

Por sua vez, com os resultados dos testes físicos é possível realizar alterações no processo de produção das usinas de pelotização, interferir nos cálculos de produção e insumos utilizados.

De acordo com Fonseca:

“Uma pelota com resistência mecânica adequada resiste mais às solicitações de naturezas físicas relacionadas às etapas de manuseio e transporte. (...) a resistência mecânica de pelotas de Minério de Ferro pode ser avaliada através de ensaios que traduzem o comportamento físico destes materiais, nas diversas etapas de sua utilização.” (2004, p.68)

Neste sentido, destacam-se os testes de abrasão, granulometria e análise de compressão, todos feitos em pelotas queimadas. Estes e outros estão listados na Figura 7.

Figura 7 - Ensaios físicos e metalúrgicos para pelotas queimadas.

Ensaio	Norma utilizada comercialmente	Descrição
Análise Granulométrica	ISO 4701	Teste realizado visando conhecer a distribuição granulométrica da pelota a fim de controlar que o material tenha um mínimo possível de partículas nas extremidades de sua distribuição.
Tamboramento	ISO 3271	Teste realizado visando conhecer a degradação da pelota causada por efeito de seu manuseio e de seu transporte.
Resistência à compressão	ISO 4700	Realizado com o objetivo de conhecer a resistência da pelota à aplicação de uma carga contínua sobre a mesma.
Determinação Relativa do Grau de Inchamento	ISO 4698	Consiste em submeter à redução uma amostra de pelota para avaliar o aumento de volume.
Degradação Dinâmica a Baixa Temperatura (LTD)	ISO/DIS 13930	Simula a degradação das pelotas na região superior dos altos fornos, onde a atmosfera tem baixo potencial redutor e temperatura.
Determinação Relativa da Redutibilidade	ISO 7215	Este ensaio consiste em determinar a perda de peso de uma amostra de pelota de minério de ferro, provocada pela remoção do oxigênio combinado com o ferro, através da ação de um gás redutor a alta temperatura.
Determinação das propriedades da redução sob a carga (Delta P)	ISO 7992	Este ensaio possibilita um conhecimento da resistência e a permeabilidade das pelotas durante o processo de redução, devido às mudanças na fase escória e estrutura dos grãos de óxido de ferro. Delta P é a diferença de pressão dos gases antes e após uma camada de pelotas, que está submetida a uma determinada pressão.
Determinação do índice de Clustering	ISO 11256	Permite conhecer o índice de colagem da pelota ( <i>Clustering</i> ) que é a formação de cachos de pelotas de minério de ferro, um fenômeno superficial, que ocorre durante a redução do minério.
Determinação da Desintegração e Metalização (LMT)	ISO 11257	Este ensaio tem o objetivo de avaliar o grau de metalização do minério de ferro e, simultaneamente, submeter as amostras às ações de tamboramento, choque térmico em atmosferas de alto potencial redutor.
Liberção de Enxofre em pelotas.	IAS Nº 09-11606	Este ensaio, desenvolvido pelo IAS (Instituto Argentino de Siderurgia), tem por objetivo quantificar o enxofre liberado durante a redução do minério de ferro.
Teste de Queda ( <i>Shatter Test</i> )	JIS M 8711	Este ensaio visa determinar a distribuição granulométrica do material (desenvolvido para sinter) submetido a quatro quedas sucessivas de 2m de altura.

Fonte: (BOECHAT, 2013).

O ensaio de compressão é realizado conforme a norma ABNT NBR ISO 4700:2010, a norma de determinação da resistência que vem especificar um método para definir

uma medida da carga de compressão para pelotas de Minério de Ferro como insumo para alto-forno e redução direta que, quando atingida, causa ruptura de pelotas.

## 2.5 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

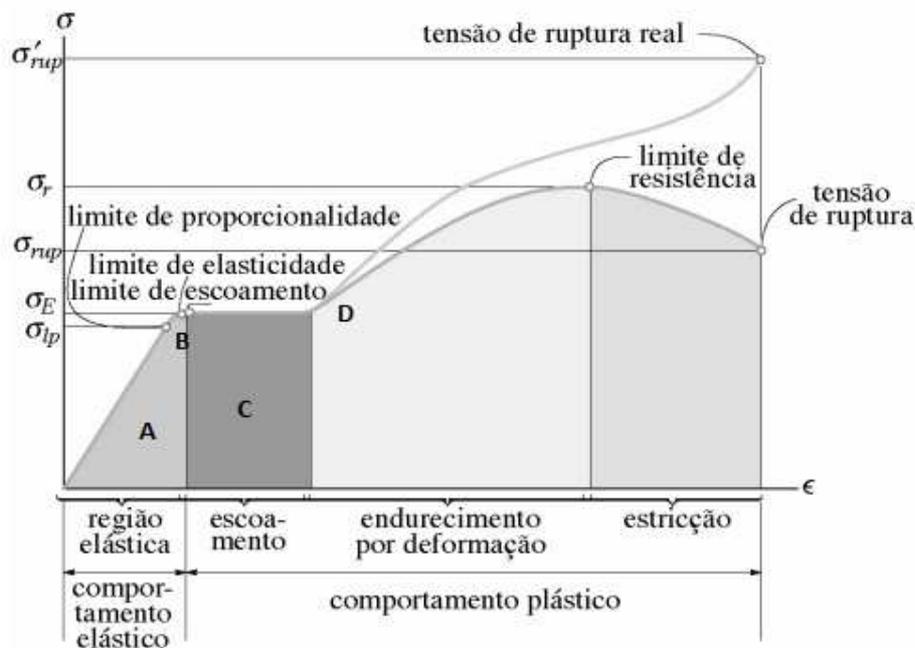
A resistência dos materiais é um assunto bastante conhecido a algum tempo. Para Bento (2003, p. 2), “[...] os cientistas da antiga Grécia já tinham conhecimento do fundamento da estática, porém poucos sabiam do problema de deformações [...]”. Conforme o conhecimento dos conceitos das Leis de estática e dinâmica iam se aplainando, de sobremaneira ia também se desenvolvendo a resistência dos materiais. Então, pode-se determinar que a resistência à compressão leva em consideração o comportamento dos sólidos quando submetidos à esforços externos, por meio de um comportamento interno (BENTO, 2003).

### 2.5.1 Tensão e Deformação

Para Buffoni (2016), o gráfico de tensão e deformação deve ser adquirido por meio dos resultados do ensaio de tração e compressão, podendo-se calcular vários valores de tensão e deformação correspondente ao corpo de prova. Caso a carga aplicada seja estática ou varia de maneira relativamente branda com o tempo e está sendo aplicada de maneira uniforme sobre o corpo de prova, o comportamento mecânico pode ser determinado por um simples teste de tensão-deformação (CALLISTER, 1991).

Hooke observou que a medida que a força era aplicada, a “deformação” era proporcional da “tensão” sofrida pelo corpo, conforme demonstra o gráfico de *tensão x deformação* na Figura 8. Filho e Neto (2004, p. 3), propoem que em uma barra seja impressa uma força  $P$  e que esta força varie no decorrer do tempo, e que seja  $(L_f - L_i)$  o alongamento que a barra sofreu. Há duas possibilidades com a retirada da força: a deformação irreversível e a deformação reversível, cuja esta retorna ao seu estado inicial.

Figura 8: Gráfico de *tensão x deformação* de um metal.



Fonte: (VANDERLEI, 2016).

Para Almeida (2015), Hooke constatou que nessa região linear o corpo de prova não sofria alteração em sua forma e então chamou-a de região elástica (A) e que a mesma seguia até um ponto em que chamou de Limite de elasticidade (até onde vai a fase elástica) ou limite de proporcionalidade (B), que é calculado pela fórmula (1), dado o valor da tensão (2) e o valor da deformação (3).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon = (Lf - L0) / L0 \quad (3)$$

Onde,  $N$  é força aplicada e  $m^2$  é a área a qual esta força foi aplicada.  $Lf$  é o comprimento final do corpo ensaiado e  $L0$  o comprimento inicial deste.

Na região de escoamento (C), onde começa a acontecer um deslizamento de discordâncias, é gerada uma fragilidade no material. “[...] o escoamento ocorre quando um pequeno aumento de tensão, acima do limite de elasticidade, resulta no

colapso do material, fazendo com que se deforme permanentemente [...]” (TAKEDA; MORCELLI, p. 16).

Terminada a região de escoamento, inicia-se a região de encruamento (D), com a deformação mais permanente no material. Vão se solicitando mais cargas e corpo de prova vai se deformando até chegar no limite de ruptura, calculado pela fórmula de limite de ruptura (4).

$$LR = F_{m\acute{a}x}/S_0 \quad (4)$$

Onde,  $F_{m\acute{a}x}$  é a força máxima aplicada e  $S_0$  é a área inicial do corpo ensaiado ao qual foi aplicado esta força.

### 2.5.2 Lei de Hooke

A maioria dos materiais existentes na natureza e que são amplamente utilizados nas indústrias exibe um comportamento linear na região elástica do diagrama tensão-deformação, apresentando certa proporcionalidade entre tensão e deformação. Tal relação linear simples entre força e alongamento, foi comprovada pelo cientista inglês Robert Hooke, em 1678 (ALMEIDA, 2015, p. 2). Foi ele que percebeu, pela primeira vez, a elasticidade dos materiais (FILHO; NETO, 2004).

A relação entre a tensão  $\sigma$  e a deformação  $\varepsilon$ , é definido por meio do coeficiente de proporcionalidade ou módulo de elasticidade ( $E$ ). E pode ser expressa por meio da equação de Hooke (5):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Utilizando uma mola em seus experimentos (ANJOS, 2015), Hooke corroborou que materiais elásticos deformam-se proporcionalmente a uma força elástica sobre eles produzida. E foi através desta teoria que propôs-se a equação matemática (6), sendo  $F$  a intensidade da força aplicada,  $K$ , a constante elástica da mola (conhecida) e  $\chi$  a deformação elástica da mola.

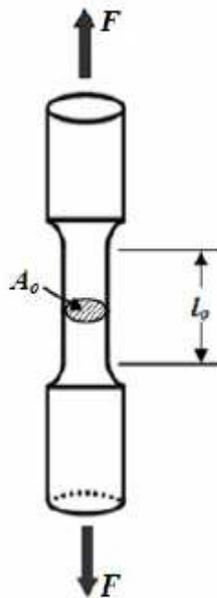
$$F = K \cdot \chi \quad (6)$$

“[...] A constante elástica da mola depende principalmente da natureza do material de fabricação da mola e de suas dimensões. Sua unidade mais usual é o  $\frac{N}{m^2}$  mas também encontramos  $\frac{N}{cm}$ ,  $\frac{Kgf}{m}$ , etc [...]” (RIGHI, s.d.).

### 2.5.3 Tração e compressão

O ensaio de tração utiliza da força de tração ou da força de tensão, que é a força que tende a puxar o corpo em direção às extremidades, conforme Figura 9. O teste pode ser usado para determinação de várias propriedades mecânicas de materiais que são importantes em diversos projetos (CALLISTER, 1991). No ensaio de tração o ideal seria que se pudesse tracionar e medir em todos os pontos a resistência mecânica a tração daquela peça. Porém como isso não é possível, utiliza-se de corpos de prova. O corpo de prova apresenta na região de ruptura características de alongamento e encruamento, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 9 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração.



Fonte: (ENSAIOS, 2016).

Figura 10 - Corpo de prova alongado e encruado.



Fonte: (DEBONA, 2010).

O corpo de prova é submetido à uma máquina de tração que deve possuir os seguintes componentes: extensômetro (para medir a deformação), uma “garra” para prender o corpo de prova e aplicação de uma força para deformação do corpo.

O teste de compressão-deformação pode ser executado de maneira similar a um teste de tração, exceto pela direção da força: que deixa de tensionar e passa a comprimir. Conforme Apostila Estruturas e Propriedade dos Materiais (2010), o ensaio de compressão consiste na aplicação de uma carga uniaxial sobre o corpo ensaiado. Em resposta a essa carga aplicada, o corpo sofre uma deformação linear que é calculada por meio da medida da distância entre as bases que comprimem o corpo de prova, por meio da carga de compressão aplicada.

#### 2.5.3.1 Ensaio de resistência a compressão em pelotas de Minério de Ferro

Para Adams (1994), em alguns processos de aglomeração e de formação de partículas por muitas vezes é necessário controlar a resistência do produto quando submetido a uma força de compressão axial. Isto é particularmente importante se a desagregação de partículas no manuseamento subsequente é para ser evitado. O método convencional é o chamado “Teste Brasileiro”, no qual as partículas individuais são esmagados entre duas mesas de prensa e a carga necessária para provocar fratura é gravado.

O ensaio de resistência à compressão tem por objetivo avaliar a resistência da pelota quando submetida à ação de carga e sucessivas quedas, provenientes de operações e manuseios, empilhamentos e transporte. Neste sentido, Sá, Costa e Vieira (2004, p. 18) afirmam que “ o comportamento das pelotas no interior dos fornos é sensivelmente afetado por suas propriedades físicas, e estes servem, em uma avaliação primária , para indicativo dos índices de produtividade”.

Sendo destrutivo o ensaio, cada pelota tem o seu valor medido individualmente, na faixa granulométrica especificada (VALE, 2015).

O ensaio consiste na seleção de pelotas nas faixas granulométricas  $<12,5\text{mm}$  e  $>10,0\text{mm}$  que são colocadas em um alimentador vibratório (Figura 11). Este é acionado automaticamente até que seja detectada a queda de uma pelota, por meio de um sensor de presença (Figura 12), no tubo de alimentação (Figura 13).

Figura 11 - Alimentador vibratório da prensa de pelotas queimadas.



Fonte: (AUTOMÁTICA, 2010).

Figura 12 - Sensor de presença da prensa de pelotas queimadas.



Fonte: (AUTOMÁTICA, 2010).

Figura 13 - Tubo de alimentação.



Fonte: (AUTOMÁTICA, 2010).

A pelota é movida então até a posição de ensaio e é comprimida pela cabeça da prensa até o rompimento. Os cacos da pelota ensaiada são descartados e o ciclo se inicia novamente até concluir a quantidade de 100 pelotas.

Os valores de força de quebra, diâmetro inicial e variação de diâmetro até a quebra de cada pelota são transmitidos por meio de um software até o computador e mostrados na tela do programa de controle (Figura 14) durante o ensaio.

Figura 14 – Tela de resultado de ensaio de compressão.

ENSAIO DE COMPRESSÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO  
 \*\*\*\* ESTE ENSAIO SEGUE A NORMA ISO 4700:1996 \*\*\*\*

DADOS DO ENSAIO:

Identificação : Pelota CVRD  
 Amostra :  
 Cliente :  
 Data do Ensaio : 03/08/2004 9:03:37 A  
 Data da Amostra : 03/08/2004 9:03:20 A  
 Operador : EDU  
 Número de Pelotas : 100  
 Tipo de Pelota : Queixada  
 Unidade : daN

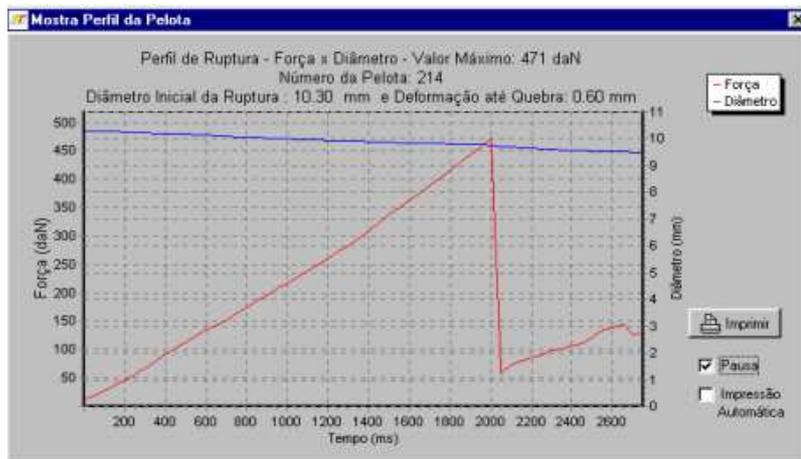
Valores Medidos: Força (daN), Diâmetro (mm) e Deformação (mm)

169 (11.10 0.32)	197 (10.36 0.35)	292 (12.10 0.27)	296 (11.73 0.32)	357 (9.66 0.75)
355 (12.60 0.50)	329 (11.30 0.40)	163 (9.51 0.60)	259 (11.18 0.60)	189 (11.18 0.30)
189 (10.90 0.20)	129 (8.91 0.15)	146 (10.71 0.20)	408 (10.66 0.30)	250 (8.41 0.70)
389 (10.80 0.40)	337 (10.11 0.32)	291 (10.83 0.42)	455 (11.00 0.60)	301 (11.70 0.30)
381 (9.51 0.32)	262 (10.85 0.35)	295 (9.59 0.27)	175 (10.48 0.37)	418 (10.28 0.30)
17 (10.01 0.00)	265 (11.88 0.22)	375 (10.11 0.77)	17 (9.39 0.07)	14 (10.68 0.85)
264 (9.93 0.32)	370 (10.41 0.40)	363 (11.23 0.32)	162 (10.21 0.35)	330 (12.72 0.52)
125 (10.85 0.17)	254 (11.18 0.35)	132 (10.11 0.20)	143 (9.31 0.35)	156 (11.45 0.37)
19 (9.19 0.15)	384 (11.18 0.52)	337 (10.18 0.37)	385 (11.10 0.60)	251 (11.10 0.60)
180 (10.31 0.22)	376 (11.43 0.52)	45 (11.13 0.10)	164 (11.30 0.90)	485 (11.70 0.30)
337 (10.43 1.12)	12 (10.51 0.02)	284 (10.48 0.77)	169 (10.31 0.55)	240 (11.30 0.40)
305 (10.71 0.32)	308 (10.61 0.30)	96 (12.50 0.07)	63 (11.70 0.10)	326 (10.01 0.40)
321 (11.38 0.27)	334 (12.42 0.52)	109 (11.00 0.30)	308 (10.71 0.30)	145 (11.10 0.35)
311 (11.20 0.35)	134 (10.38 0.27)	292 (9.71 0.30)	492 (9.71 0.30)	236 (10.01 0.55)

Fonte: (AUTOMÁTICA, 2010).

O valor de resistência a compressão de cada pelota é definido por meio de *Gráficos de variação de força e diâmetro*. Quando o diâmetro inicial da pelota sofrer uma queda maior que 50% do seu valor, o ensaio para esta pelota está concluído, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 – Queda de 50% do diâmetro inicial da pelota



Fonte: (AUTOMÁTICA, 2010).

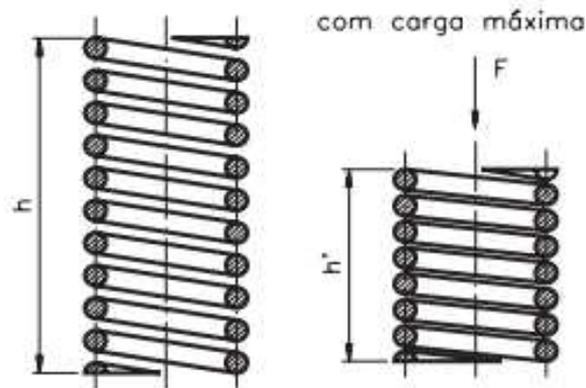
O resultado final é representado pela média aritmética dos valores de cada pelota, determinados em *kgf/pelota* ou *daN/pelota*, dependendo da norma especificada.

Adicionalmente, verifica-se o percentual de pelotas com resistência a compressão inferior a 20, 80, 100 e 250 *daN/pelota*, os valores máximo e mínimo e o desvio padrão.

### 2.5.3.2 Ensaio de resistência a compressão em molas

Aplicando diferentes forças em molas, Robert Hooke constatou que a deformação da mola era proporcional ao aumento da força quando aplicada. Para Miranda (2015), a variação da mola é definida pela proporcionalidade direta da intensidade da força que a provoca, conforme observamos na Figura 16.

Figura 16 – Mola em ensaio de compressão



Fonte: (SENAI, 2015).

Segundo SENAI (2015), para os ensaios de compressão, a lei de Hooke aplicar-se-á também para a fase elástica da deformação, sendo possível a determinação do módulo de elasticidade da mola.

Por ser um material mais resistente a deformações na sua região plástica, a mola é capaz de fornecer apenas as propriedades mecânicas referentes à zona elástica (SENAI, 2015).

## 2.6 CONTROLE DE QUALIDADE

A qualidade sempre esteve presente em praticamente todos os produtos e serviços. Porém, a conscientização de sua importância e do seu controle têm tido um desenvolvimento evolutivo (MONTGOMERY, 2013). Para Paladini e outros (2012, p. 3), “o conceito de controle de qualidade total deu início em 1924 com as cartas ou gráficos de controle proposto por Walter A. Shewhart, quando o mesmo também propôs o ciclo PDCA”.

Anos depois, na década de 30, o controle de qualidade deu um salto com o “desenvolvimento do sistema de medidas, das ferramentas de controle estatístico do processo do surgimento de normas específicas para essa área” (PALADINI, 2012, p. 5), e tem evoluído até hoje como os círculos de controle de qualidade (CCQ), onde as empresas incentivam seus funcionários a produzirem trabalhos de melhoria contínua.

Savino (2016) corrobora que o controle de qualidade é um processo que está ligado diretamente, por meio de técnicas e metodologias, ao cumprimento de requisitos técnicos do produto ou serviço. Ou seja, para a emissão de conclusão final a respeito de determinado produto ou serviço, faz-se necessária a utilização de parâmetros pré-estabelecidos e já conhecidos.

Para Castilho e outros (2004, p.2), “[...] As atividades de um laboratório de controle de qualidade de Minérios de Ferro baseiam-se em normas internacionais padronizadas, sendo a maioria normas ISO [...]”. Sendo assim, tal padronização leva o setor a um patamar de maior qualidade no controle dos seus processos internos.

Filho (2013), afirma que para Juran, o que para muitos é considerado o “Pai da Qualidade”, “[...] alta qualidade implica, geralmente, maiores custos. De acordo com uma ótica de custos, a qualidade é a ausência de defeitos ou erros. Logo, alta qualidade custa menos dinheiro para as empresas [...]”, ou seja, os custos de uma empresa estão altamente atrelados ao controle de qualidade.

Com a evolução das máquinas, aberturas de novas fábricas e advento das tecnologias atreladas a esses, administrar os processos tornou-se tarefa indispensável para a sobrevivência das empresas. Por conta disso, o Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) evoluiu para CEP, que é o Controle Estatístico de Processos.

### **2.6.1 Controle Estatístico de Processo**

SILVA (2014), afirma que o controle estatístico de processo pode ser definido como um método de prevenção e combate aos desvios que muitas vezes estão presentes nos processos industriais. Para Silva et al. (2008), “[...] o uso do CEP, a princípio, foi desenvolvido e utilizado por empresas buscando melhoria de qualidade e de produtividade”.

Para Ribeiro e Caten (2012), o uso da ferramenta CEP proporciona, se aplicada à produção, a diminuição da variabilidade de algumas características indesejáveis presentes na qualidade dos processos, aumentando a qualidade inerente, da produtividade e custos do que está sendo produzido.

Comparando-se perpetuamente os resultados de um processo já conhecido, identificando, por meio de documentos estatísticos, qual a tendência das variações encontradas, por meios desse controle é possível eliminar ou diminuir essas variabilidades antes que cheguem ao consumidor final. Entende-se por variabilidade a característica de um processo sofrer variações ou mudanças ao longo do tempo.

Quanto a variabilidade, Montgomery (2013, p. 129), assegura que “[...] A variabilidade do processo pode ser monitorada tanto através do gráfico de controle para desvio padrão, chamado gráfico *S*, ou pelo gráfico de amplitude, chamado gráfico *R*”.

Portanto, “[...] processos são dinâmicos e podem mudar, logo o desempenho do processo deve ser monitorado, para que medidas eficazes de prevenção contra mudanças indesejáveis possam ser executadas [...]” (PORTAL Action, acesso em 24 de abril de 2016).

Para Ribeiro e Caten (2012, p. 12), o controle estatístico é ferramenta importante para desenvolvimento de melhorias:

” [...] Num ambiente competitivo, o controle estatístico abre caminho para melhorias contínuas, uma vez que garante um processo estável, previsível, com uma identidade e capacidade definidas, cuja evolução pode ser facilmente acompanhada”.

O controle estatístico de processos utiliza as técnicas estatísticas para analisar o comportamento dos processos de fabricação, com objetivo de tomar decisões e agir corretamente para evitar a perda do controle das condições preestabelecidas (SOTUYO, 1987).

Segundo a definição de Ribeiro e Caten (2012, p. 14), “[...] o CEP fornece uma radiografia do proceso, identificando sua variabilidade e possibilitando o controle desta ao longo do tempo, através de coleta de dados continuada [...]”.

Alguma ferramentas são essenciais dentro do controle de processos, tais como: diagramas, histogramas, cálculos de capacidade do processo, Gráfico de Pareto, Gráfico de Ishikawa e cartas de controle.

### 2.6.1.1 Cartas de Controle

As cartas de controle tiveram sua origem em 1924, por mãos de Walter A. Shewart, que observou variações aleatórias de um processo. Ele constatou que estas representavam um comportamento segundo uma distribuição de probabilidades. Walter também verificou que, de tempos em tempos surgiam algumas variações de comportamento não aleatório.

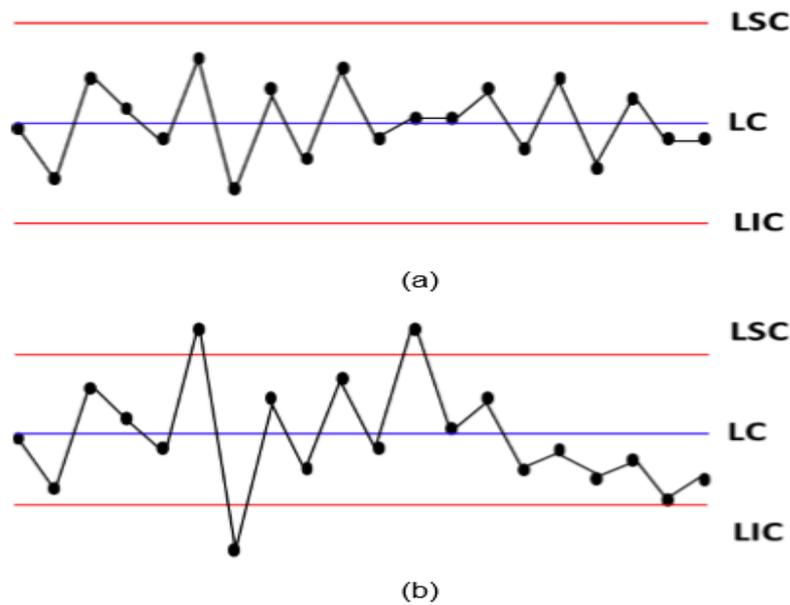
Deste modo, foi possível concluir que seria possível e desejável colocar limites sobre a variação natural do processo, de maneira que se houvessem flutuações dentro desses limites (ao qual mais tarde chamou de limite inferior e superior de controle), obedeceriam as causas aleatórias. Entretanto, toda variação fora dos limites denotariam alteração no processo que prontamente deveriam ser corrigidas (SOTUYO, 1987).

Então, as cartas de controle podem ser definidas como gráficos para análise e possíveis ajustes de um determinado processo, conseguindo reduzir o tempo de resposta para a solução de desvios, por meio de duas primícias básicas: centralização e dispersão (SILVA, 2014). De modo que a centralização é a média calculada para esse processo e a dispersão deve ser obtida por dados do desvio padrão e amplitude.

Em suma, esta carta é uma série de dados medidos ao longo do tempo que tem linhas horizontais como apontadores os limites para o controle do processo que está em análise. Estas linhas normalmente são calculadas “[...] com base nos dados adquiridos pelas  $n$  amostragens, de forma que aproximadamente 0,23% dos pontos irão permanecer fora dos limites de controle enquanto for estável o processo” (ELIPSE, 2014).

A linha LSC (Limite Superior de Controle) fica localizada acima da linha central (LC) e abaixo fica a linha LIC (Limite Inferior de Controle), são essas linhas que delimitam o processo. Quando os pontos permanecem dentro dos limites inferior e superior, constata-se que o processo em questão está “sob controle” (a). Porém, se um ponto sai fora da linha LSC ou LIC, diz-se que o processo está fora de controle (b). Isso pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Gráficos de controle

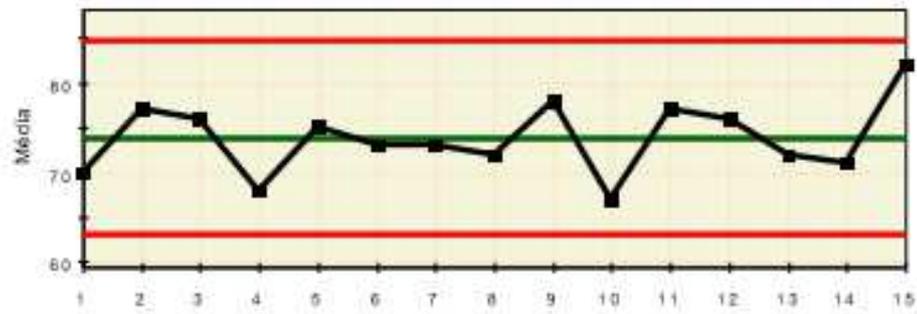


Fonte: (OLIVEIRA, 2013).

Para Oliveira e outros (2013), as cartas de controle de processos podem ser divididas em dois tipos específicos: carta de controle para variáveis e carta de controle para atributos. Sendo a primeira denominada assim por conta dos valores de seus dados que são mensuráveis, “[...] como por exemplo: o diâmetro de um rolamento, uma resistência elétrica, o tempo de atendimento de um pedido [...]” (RIBEIRO; CATEN, 2012, p. 3). Já a segunda é classificada assim devido seus parâmetros não serem mensuráveis. “[...]Nestes casos, classifica-se cada item de ensaio ou amostra com um atributo que pode ser conforme ou não-conforme, presença ou ausência, positivo ou negativo” (OLIVEIRA et al. 2013, p. 20).

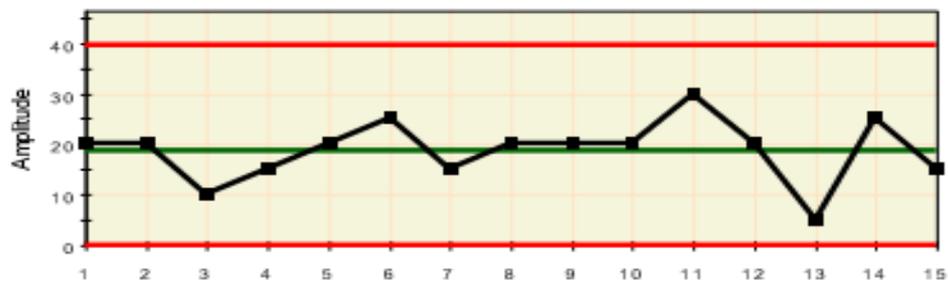
A partir do momento que se empregam variáveis contínuas no controle de processos, é indispensável monitorar duas cartas de controle simultaneamente: a carta de valor médio (Figura 18) e a carta de variabilidade do processo ou amplitude (Figura 19).

Figura 18 – Carta de controle de valor médio



Fonte: (RIBEIRO; CATEN, 2012).

Figura 19 – Carta de controle de variabilidade



Fonte: (RIBEIRO; CATEN, 2012)

Oliveira (2013) afirma que para cartas de controle utilizando variáveis, destaca-se o uso de três principais tipos:

- i. Carta do tipo Média e Amplitude ou  $\bar{X}$  e  $R$
- ii. tipo Média e Desvio Padrão ou  $\bar{X}$  e  $s$
- iii. tipo Valores Individuais e Amplitudes Móveis ou  $I - MR$ .

Para amostras cuja variabilidade não apresenta tamanho significativo, sendo inviável a utilização dos dois primeiros tipos de carta de controle, utiliza-se a carta do tipo  $I - MR$ .

Utilizadas em laboratório, para Pereira e Aurélio (2016), elas são de suma importância para controle dos processos internos do mesmo. Devido sua facilidade na interpretação do gráfico e boa aplicabilidade, é possível agilizar a rotina de modo a permitir a análise crítica dos resultados.

## 2.7 CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

Com o advento da tecnologia, a necessidade de conhecer os instrumentos de medição e melhorar suas incertezas se amplia. Essas características só estão asseguradas por causa da calibração dos instrumentos (SILVA; ALVES, 2004).

De acordo com CALIBRATEC (2016), a calibração pode ser resumida como o “[...] processo de ajuste da saída ou da indicação de um instrumento de medição a fim de estabelecer os resultados de acordo com o valor da norma aplicada, dentro de uma precisão especificada [...]”. Ou seja, calibrar significa comparar a máquina ou instrumento de medição com um padrão com precisão superior, regido por uma norma internacional (ISO), estabelecendo uma relação com uma incerteza de avaliação associada a um nível de credibilidade, a partir de 95% (SILVA; ALVES, 2004).

A norma que rege as especificidades do método de calibração é a ISO 10012. Ela propõe requisitos de garantia de qualidade para equipamento de medição (ABNT, 2004).

### 2.7.1 Calibração da prensa de pelotas queimadas

Durante a análise que levará a indústria a tomar decisões importantes, faz-se necessário a calibração dos instrumentos de forma correta de forma a evitar desvios nos processos produtivos. Por isso, não obstante, a prensa de pelotas queimadas também deve ser calibrada para que os resultados sejam precisos. Dois tipos de calibração são necessários: primeiramente do mecanismo de força, responsável pela fratura da pelota e conseqüentemente, o valor da resistência da pelota e a calibração do sistema de medição do diâmetro (AUTOMÁTICA, 2010).

Conquanto, para assegurar a qualidade do equipamento e principalmente dos resultados emitidos pelo mesmo, é imprescindível a calibração deste mensalmente.

Para isso, o manual da Automática (2010, p. 32), descreve que a calibração deve ser feita seguindo os próximos passos:

1. Uma célula de carga com valor conhecido (padrão) é conectada no indicador digital e ambos são conectados na fonte de alimentação antes de iniciar a calibração;
2. A prensa é ligada juntamente com a unidade hidráulica;
3. Na tela de controle do programa, é selecionada a opção Diagnósticos> Calibração;
4. Com a força “zero” aplicada à célula de carga da prensa, o botão Tara deve ser acionado. O valor medido de força deve ficar em zero;
5. O cilindro deve ser movido para a posição mais inferior;
6. Então, a unidade hidráulica deve ser desligada;
7. O parafuso do tipo Allen, disposto na parte superior da estrutura deve ser afrouxado para soltar a célula de carga. O tubo que separa a célula de carga da estrutura deve ser retirado e passado para a parte de cima da estrutura da prensa;
8. A célula de carga padrão deve ser posicionada entre a base e a cabeça de compressão;
9. A unidade hidráulica novamente será ligada;
10. Pressionado o botão Subir, até que a célula de carga toque a cabeça de compressão, o operador deve observar que o valor mostrado aumenta à medida que o botão é acionado. O botão deve continuar sendo pressionado até que o valor mostrado pelo indicador digital seja superior ao valor indicado no campo Força de Referência;
11. Quando for isso for observado, deve-se soltar o botão Subir e então esperar a diminuição da força;
12. A força apontada pelo indicador digital diminui lentamente. Quando essa força for igual a força de referência, o botão Força do Indicador Digital deve ser acionado. Então, o fator de calibração será automaticamente ajustado para o seu valor correto;
13. A calibração está concluída.

Feito esse procedimento, o equipamento estará pronto para emitir valores confiáveis para a tomada de decisões da indústria.

## 2.7.2 Validação de Métodos de Calibração

Para Valentini, Sommer e Matioli (2007), “[...] validar uma metodologia é tornar legítimo, através do estabelecimento de documentações, tudo que envolve o processo de produção e controle de qualidade, desde as condições de ambiente, até insumos, que entram em sua composição [...]”.

Conforme a ABNT ISO/IEC 17025:2005 (ISO, 2005), validação é o modo de comprovação, por meio do fornecimento de evidência objetiva, de que os requisitos para uma aplicação ou uso foram atendidos. Por meio desta norma é possível validar os procedimentos para métodos não normalizados de calibração e ensaio, ou desenvolvidos pelo próprio laboratório. Uma vez que a validação do método de ensaio é importante para a comprovação da sua eficácia (PIZZOLATO et al. 2015). Para Filipe (2004), a norma também define que devem ser validados os métodos internos, métodos não-normalizados ou os normalizados que são usados fora do seu âmbito.

Quanto a validação do novo método, Pizzolato e outras (2015, p. 3) explica que:

“[...] De acordo com a NBR ISO/IEC 17025:2001, convém que a técnica utilizada para a determinação do desempenho do método seja uma das seguintes ou combinação das mesmas: calibração com o uso de padrões de referência ou materiais de referência; comparações com resultados obtidos por outros métodos; comparações interlaboratoriais; avaliação sistemática dos fatores que influenciam o resultado; avaliação da incerteza dos resultados com base no conhecimento científico dos princípios teóricos do método e na experiência prática.”

Para Pizzolato (2015), a forma que será conduzido o processo de validação, depende essencialmente se o método a ser utilizado é interno (novo ou reaplicado de outros laboratórios), e se o método é de referência.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 TIPO DE PESQUISA

Para dar início ao método de pesquisa, utilizar-se-á a pesquisa bibliográfica e documental sobre o tema. Esta primeira foi utilizada uma vez que para Lakatos (1992), a pesquisa bibliográfica pode ser considerada como primeiro passo de toda pesquisa científica:

A pesquisa bibliográfica permite compreender que, se de um lado a resolução de um problema pode ser obtida através dela, por outro, tanto a pesquisa de laboratório quanto a de campo (documentação direta) exigem como premissa, o levantamento de estudo da questão que se propõe a analisar e solucionar. (1992, p.44)

Para tanto, foram consultados sites, revistas eletrônicas, documentos, livros, dissertações e teses disponíveis sobre a questão da pelletização e temas correlatos.

Lakatos (1992) ainda afirma que a pesquisa bibliográfica proporcionará ao pesquisador embasamento teórico-metodológico que amplia seu conhecimento e capacidade de argumentação.

Para o levantamento de dados congêneres, entre outros expedientes, também se utilizará a pesquisa documental, bem como estudos em documentos oficiais (fichas de registros e/ou processos) produzidos pela instituição privada pesquisada.

No intuito de obter informações pautadas no campo a que se pesquisa, serão adotados os métodos qualitativo e quantitativo para análise dos dados coletados, bem como a utilização dos seguintes procedimentos: a entrevista, observação, pesquisa bibliográfica e documental conforme já mencionados.

Segundo Leopardi (2002, p. 117) apud Chemin (s.d., p. 55), a pesquisa qualitativa “é utilizada quando não se podem usar instrumentos de medida precisos, desejam-se dados subjetivos, ou se fazem estudos de um caso particular, de avaliação de programas ou propostas de programas”; ela auxilia na compreensão do contexto do problema sob a perspectiva dos sujeitos investigados (por exemplo, parte da sua vida diária, sua satisfação, desapontamentos, surpresas, emoções, sentimentos, desejos) e sob a perspectiva do pesquisador.

Essa forma de se pesquisar trata da investigação de valores, atitudes, percepções e motivações do público pesquisado, com o objetivo principal de compreendê-los em profundidade; não tendo preocupação estatística. (GONÇALVES; MEIRELLES, 2004 apud CHEMIN, s.d., p. 55).

De tal modo, entende-se que a observação, assim como as demais aqui mencionadas, é uma técnica de coleta de dados para alcançar informações, porém, é uma técnica complementar. Por meio dela, o pesquisador apenas complementa dados levantados através de outras técnicas. Neste estudo, a observação será estruturada (roteiro organizado do que se deve ter como foco de observação), e participante (o pesquisador interfere na realidade por trabalhar com o tema que está sendo pesquisado).

A relevância científica desse estudo consiste na contribuição para uma análise crítica dos desafios que o engenheiro de produção enfrenta ao realizar trabalhos em fábricas e linhas de produção. Buscou-se com essa pesquisa proporcionar a comparação da metodologia atual de controle de calibração da prensa de resistência à compressão de pelota queimada, com a metodologia proposta visando a redução do tempo de preparo e dos custos envolvidos neste processo sem alterar as normas já implícitas da ISO 4700:2010.

### 3.2 PREPARAÇÃO DOS PADRÕES DE CONTROLE

Para melhor compreender o problema é necessário conhecê-lo. Assim, evidencia-se que em consonância com o Manual de Montagem da Carta Controle elaborado pela empresa Vale (2015) que: o laboratório físico fica responsável por acumular 450 kilos de pelotas do tipo RM20 (*Redução Direta Midrex*). Essas pelotas devem ser selecionadas manualmente pelo operador de modo que todas as pelotas “defeituosas”, ou seja, com trincas mecânicas e térmicas, pelotas coladas e cacos sejam retiradas, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Seleção das pelotas para formação da carta de controle



Fonte: (VALE, 2015)

Após o procedimento de acumulação, o material passa em um divisor rotativo de pelota queimada do tipo carrossel (Figura 21).

Figura 21 – Divisor rotativo para homogeneização das amostras.



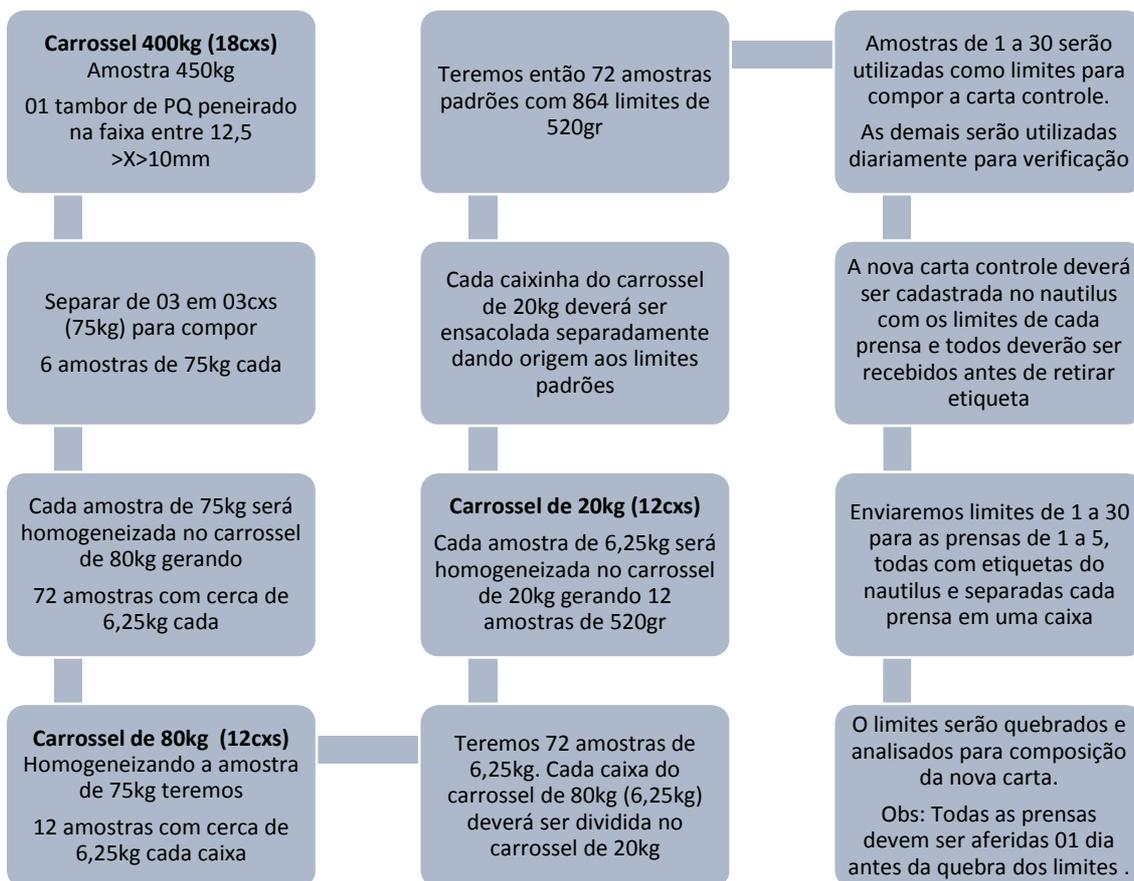
Fonte: (VALE, 2015).

A função desse divisor é homogeneizar a amostra e subdividi-la em 6 grupos de amostras menores, com cerca de 75 kilos cada. Esses grupos serão novamente homogeneizados em um outro carrossel rotativo (capacidade 80 kilos), dividindo cada um dos seis grupos em 12 novos grupos de amostras contendo 6,25 kilos cada. Ao final, serão 72 amostras de 6,25 kilos cada.

Feito isso, cada amostra de 6,25 kilos será homogeneizada novamente em um carrossel de capacidade 20 kilos, compondo cerca de 12 amostras de 520 gramas. Essas amostras de 520 gramas deveram ser ensacoladas separadamente dando origem as amostras padrões de controle. Ao todo serão 864 amostras padrões de controle. Destas, cerca de 120 serão utilizadas para a composição das cartas de controle e as demais serão utilizadas diariamente para verificação, conforme Manual elaborado para verificação do controle estatístico de qualidade e processamento dos testes de compressão e suas especificidades.

Todo processo supracitado pode ser conferido na Figura 22.

Figura 22 - Processo de preparação de padrões internos de controle



Fonte: (VALE, 2012).

### 3.3 VALIDAÇÃO DA PRENSA UTILIZANDO PELOTAS E MONTAGEM DA CARTA DE CONTROLE

São testadas destrutivamente 30 amostras em cada uma das 3 prensas automáticas de compressão (A, B e C) de mesmo fabricante e evidencia-se os resultados de suas médias.

A máquina ou prensa de compressão, conforme Automática (2010), é um sistema de medição de força de compressão, realizado conforme a ISO 4700. Ao concluir os testes de compressão, o programa da prensa realiza os cálculos daquele teste, indicando os valores de força aplicada, deformação da pelota, velocidade do ensaio, diâmetro inicial e final e os componentes principais da prensa de compressão são: uma prensa hidráulica, uma célula de carga, um alimentador vibratório, um cilindro manipulador e um cilindro de compressão.

A próxima etapa consiste na realização do teste estatístico de análise de variância (ANOVA).

Utilizando o teste de análise de variância (ANOVA), que conforme Montgomery (2013, p. 81), é teste usado para “comparar médias quando há mais de dois níveis de um único fator”, ou seja testa a chance das médias de várias populações diferentes sejam iguais ou equivalentes. Ao final do teste, se constatada a hipótese nula, isso significa que as médias são iguais.

Caso contrário, rejeitando a hipótese nula ( $H_0 = \mu_1 = \dots = \mu_k$ ), evidencia-se que as médias entre os níveis se diferem (PORTAL Action, acesso em 10 de maio de 2016). Caso comprovado a diferença entre alguma das prensas A,B e C, esta passará por uma nova calibração.

Com os resultados, montar-se-á a carta ou gráfico de controle do tipo  $\bar{X}$  e R.

### 3.4 FABRICAÇÃO DA MOLA

Evidencia-se que as molas são fabricadas conforme a ISO 10243 (*Alta Performance em Molas de Compressão*), e nas suas especificidades servem no uso de máquinas devido à alta compressão que suportam, para exercer força, flexibilidade e armazenar ou absorver energia. Moro (2015) define que no geral os aços-ligas

empregados na fabricação das molas têm alto teor de carbono (acima de 0,5%), proporcionando assim alta resistência a fratura à peça. A escolha do material depende das aplicações a qual aquela mola será submetida e dos custos envolvidos no processo.

De acordo com Peruzzo (2012, p. 62), sujeitando uma mola à uma forma compressiva  $\vec{F}$ , a mesma deforma-se ao longo da sua extensão. Então ela passa a exercer uma força elástica  $\vec{F}_{el}$ , de mesma intensidade, porém em sentido oposto ao da força  $\vec{F}$  aplicada. Esse comportamento das molas faz com que elas sejam utilizadas em testes para determinação da sua área de deformação elástica. Se não ultrapassado esse limite, teremos seu valor de resistência.

Bitencourt (2008), afirma que as molas podem ser usadas principalmente nos casos de armazenamento de energia, preservação de junções, amortecimento de choques e distribuição de cargas. Elas podem ser divididas nos tipos:

1. Molas helicoidais de compressão;
2. Molas helicoidais de tração;
3. Molas helicoidais de torção;
4. Molas helicoidais de cônicas;
5. Molas planas.

A mola (Figura 23) fabricada para os testes apresenta em sua configuração algumas características como alto limite de elasticidade, alta resistência a compressão, alto limite de fadiga e grande durabilidade, sendo esta fabricada a partir de fios já endurecidos (passados por TT de têmpera e revenido), e depois passando por um tratamento térmico a baixas temperaturas, de maneira que sofra um alívio de tensões internas. Isso evitará que ao ser pressionada, esta mola sofra uma ruptura e assim, suporte altas cargas.

Figura 23 – Mola de compressão.



Fonte: (VALE, 2016).

A Lei de Hooke será utilizada como instrumento comprobatório.

De acordo com Hibbeler:

[...] o diagrama tensão-deformação para a maioria dos materiais de engenharia exibe uma *relação linear* entre tensão e deformação dentro da região elástica. Por consequência, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. (2010, p.63)

Conforme Anjos (2015), a Lei de Hooke “é responsável por verificar a deformação do corpo elástico ao se expandir” e, desta forma, utilizou-se a equação  $F = kx$ . Onde:  $F$  = força aplicada;  $k$  = constante elástica da mola;  $x$  = deformação da mola, sabendo que a constante  $k$  e a deformação  $x$  conhecidas.

Para determinação da constante elástica da mola, assumiu-se como valor de força a média das forças aplicadas em todos os testes, na unidade *Newton*, e a média dos valores de deslocamento sofrido pela mola, na unidade *metro*.

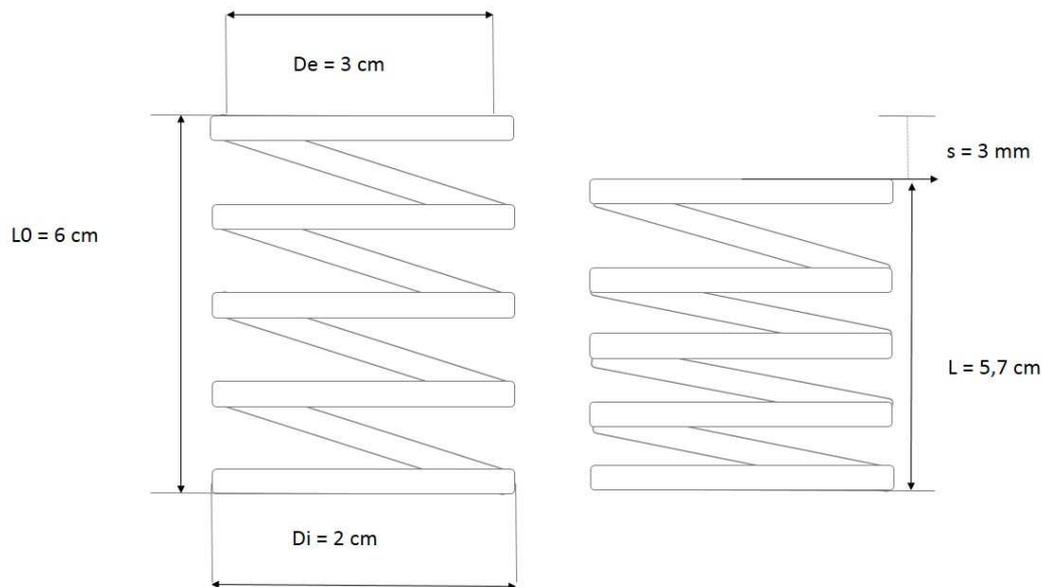
Portanto, a mola apresenta uma constante elástica no valor de  $1256063,91N/m$ , conforme cálculos realizados sobre a mesma (8).

Então,  $F = kx$ ;

$$k = \frac{F}{x} \therefore k = \frac{3341,13}{0,00266} \therefore k = 1256063,91$$

A mola apresenta tamanho inicial de 6 cm. Ao ser pressionada pela máquina de compressão, pode apresentar deslocamento máximo de 3 mm, chegando a 5,7 cm, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Desenho da mola de compressão.



Fonte: Elaboração própria.

Sobre seu funcionamento, ela é acompanhada por dois batentes, um superior e outro inferior. A medida que o teste se procede, ambos são pressionados de maneira que sejam convergidos. Quando estes se tocam, o software entende que o teste foi concluído. Assim a simulação da ruptura da pelota ocorre com sucesso. O resultado da força aplicada e da deformação da mola apareceram na tela.

### 3.5 CONFECÇÃO DA NOVA CARTA DE CONTROLE

#### 3.5.1 Carta de controle da mola

Para a montagem da carta de controle, serão utilizados os valores adquiridos por meio dos testes de compressão feitos na mola. Todos estes realizados sob supervisão do mesmo executante, evitando assim os desvios contidos em uma mudança de cenário. Para isso, discrimina-se que o teste será realizado da seguinte forma:

1. Nas prensas A, B e C, serão realizados 30 testes em cada, e para todos os testes a mola sofrerá 20 compressões com duração de 40 segundos cada, sob as mesmas condições de temperatura ambiente, realizados pelo mesmo operador. Entretanto o operador ajustará a mola conforme o transcorrer do teste, utilizando apenas sua percepção ao centraliza-la sob a cabeça da prensa de compressão, conforme pode-se observar na Figura 25.

Figura 25 – Mola centralizada durante o ensaio de compressão.



Fonte: (VALE, 2015)

2. Coletados os valores de resistência a compressão, os mesmos serão lançados no programa Excel e organizados em planilhas. Além destes serão abstraídos também os valores máximos, mínimos, valores médios, desvio padrão e velocidade média obtidos em cada um dos 90 testes.
3. Para o registro dos dados e criação das cartas de controle da mola, utilizar-se-á o programa Nautilus, coordenado pelo sistema LIMS (*Laboratory Information Management System*), que é a ferramenta responsável por gerenciar todos os dados pertinentes aos laboratórios de controle de minérios e insumos, contendo desde de planos de amostragem e registros das amostras, passando por emissão de relatos e laudos de análises, até controle de limites de especificação e controle (PORTAL, 2013).

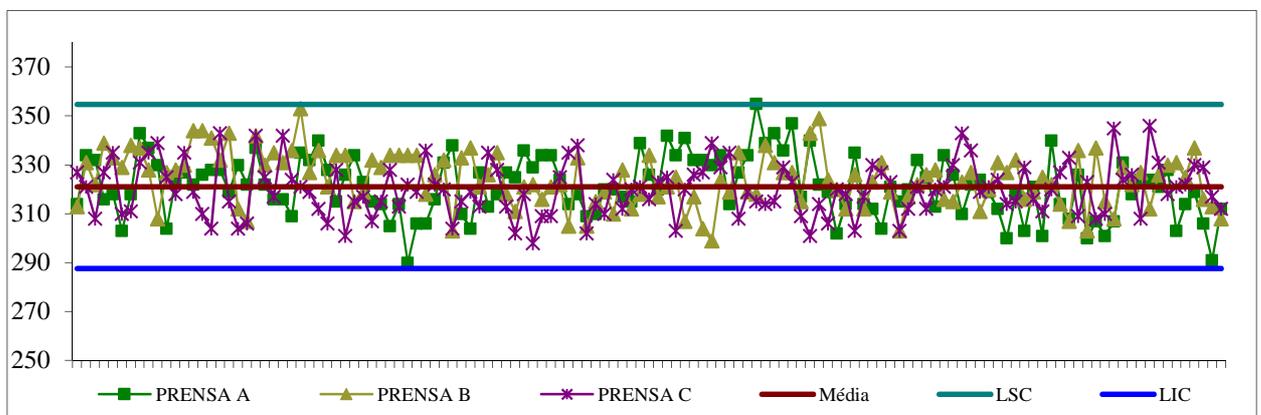
Para a análise do processo foi utilizada a carta de controle do tipo  $I - MR$ , cujas variáveis são os valores médios das forças obtidas nos testes durante os dias em que a mola foi testada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS ENCONTRADOS EM UMA CARTA DE CONTROLE UTILIZANDO PELOTAS

Com posse de dados coletados nas prensas A, B e C, entre os dias 24 de novembro de 2015 e 14 de abril de 2016, e montada a carta de controle descrita no Gráfico 1 (*força (kgf) x dias de teste*), constata-se presença de grande variabilidade nos dados, sendo seus valores de limite inferior de controle e limite superior de controle, 288 e 355, respectivamente conforme Gráfico 1. Isso se deve ao fato de pelotas serem corpos de prova que variam suas características física e química ao longo do processo, não apresentando assim, uma regularidade nos seus resultados, ao olharmos de forma individual cada pelota.

Gráfico 1 – Carta de controle utilizando pelotas.



Fonte : (VALE, 2016).

### 4.2 RESULTADOS ENCONTRADOS DA MOLA PARA CADA PRENSA

Sendo M a quantidade de vezes que a mola foi pressionada e T, o número de testes, e, considerando que 30 testes foram realizados em cada uma das prensas A, B e C. Os valores das médias que foram encontrados para as prensas A (APÊNDICE A), B (APÊNDICE B) e C (APÊNDICE C) foram utilizados na construção das cartas de controle.

#### 4.2.1 Resumo estatístico por prensa

Foram calculados também, os valores das médias, máximo e mínimo, desvio padrão e velocidade média de cada um dos testes, para as amostras de 1 a 30. E os valores são, para a prensa A (Tabela 2), prensa B (Tabela 3) e prensa C (Tabela 4). A unidade de medida da velocidade média utilizada é *mm/min*.

TABELA 2 – Resumo estatístico da prensa A.

PRENSA A									
AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP	AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP
1	340,7	340	342	0,7	16	338,7	338	340	0,9
2	341,2	341	342	0,4	17	341,5	341	343	0,7
3	340,4	339	341	0,7	18	340,2	340	341	0,4
4	333,5	333	335	0,7	19	335,3	333	337	1,1
5	336,9	336	338	0,6	20	334,0	333	335	0,7
6	339,9	338	341	0,7	21	333,6	333	335	0,6
7	340,0	339	341	0,6	22	337,9	337	339	0,5
8	333,5	331	335	0,9	23	339,9	339	341	0,5
9	337,6	337	339	0,6	24	340,0	339	341	0,3
10	341,4	341	342	0,5	25	337,3	336	338	0,6
11	337,2	336	338	0,6	26	341,8	341	343	0,7
12	334,2	333	335	0,7	27	342,1	341	343	0,4
13	339,9	338	342	0,9	28	343,8	343	345	0,6
14	335,3	334	336	0,7	29	342,3	342	343	0,5
15	335,8	334	337	0,8	30	344,0	343	345	0,5

Fonte: Elaboração própria.

Ao avaliar o comportamento da prensa A, verificamos que os valores de média variaram no curso dos testes, entre 333,5 e 344 kgf. Um valor baixo, se for comparado com os valores da carta de controle utilizada anteriormente. Os valores de desvio padrão variam muito pouco ou quase nada. Isso se deve a mola sofrer pequena variação no seu deslocamento.

Ao avaliarmos ainda a prensa A, observa-se que há a presença de maior repetição de valores bem próximos a 1 no desvio padrão, configurando mais uma vez a pequena variação do deslocamento da mola. Se levados em consideração os valores mínimos obtidos nos testes, os mesmos variaram entre 331 e 343 kgf. Diferentemente dos testes feitos na prensa B, onde os mesmos variaram de 333 a 343 kgf. Com isso, constata-se que há pequena diferença entre as prensas A e B, utilizando a mesma mola como corpo de prova.

TABELA 3 – Resumo estatístico da prensa B.

PRENSA B									
AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP	AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP
1	339,9	339	341	0,7	16	341,2	339	343	0,9
2	341,8	340	343	0,9	17	343,1	341	344	0,8
3	334,4	333	335	0,6	18	341,8	341	343	0,8
4	338,1	337	339	0,6	19	337,1	336	338	0,6
5	337,6	337	339	0,6	20	336,5	335	337	0,9
6	342,3	342	343	0,5	21	340,9	340	342	0,6
7	343,7	343	345	0,7	22	338,4	335	340	1,2
8	342,9	342	344	0,5	23	339,9	339	341	0,6
9	340,2	339	342	0,8	24	337,8	337	339	0,6
10	342,9	341	344	0,6	25	339,3	337	341	0,9
11	339,8	339	341	0,6	26	338,1	337	339	0,6
12	338,7	338	340	0,6	27	341,0	340	343	0,7
13	341,1	340	343	0,9	28	336,3	335	338	1,1
14	342,9	340	344	1,1	29	337,3	335	338	0,8
15	342,7	340	344	0,9	30	339,4	338	340	0,6

Fonte: Elaboração própria.

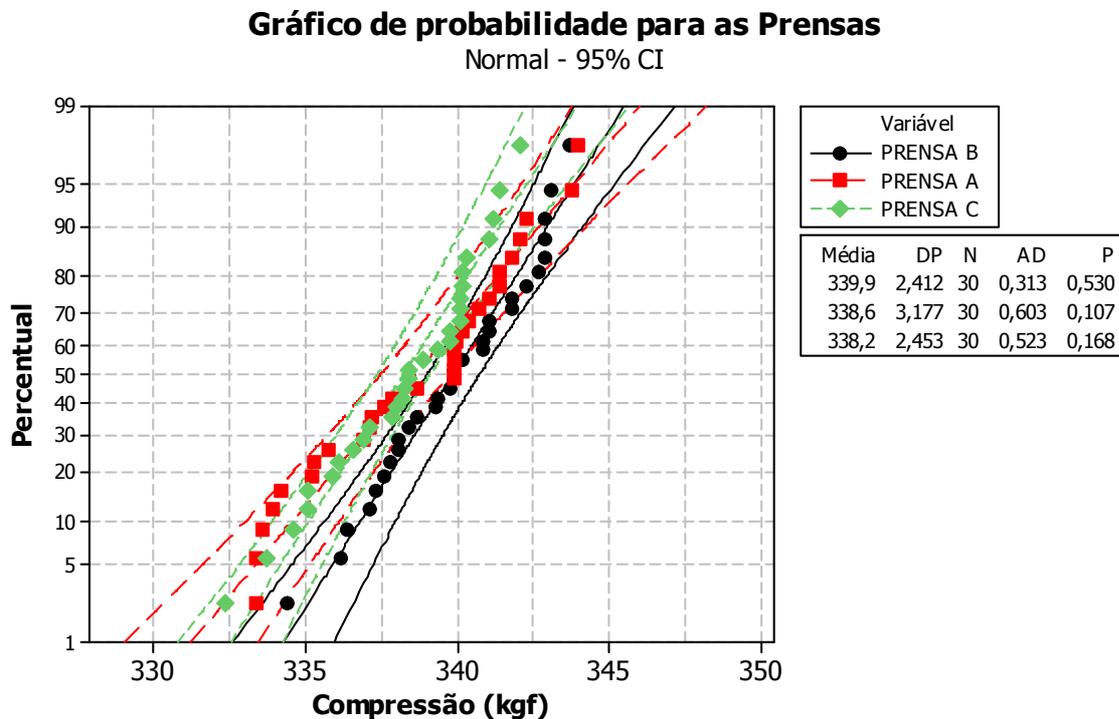
TABELA 4 – Resumo estatístico da prensa C.

PRENSA C									
AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP	AMOSTRA	MÉDIA	MINIMO	MAXIMO	DP
1	338,5	338	339	0,5	16	339,0	338	341	1,1
2	340,2	339	341	0,5	17	341,1	340	343	0,7
3	338,0	336	339	0,9	18	342,2	341	344	1,0
4	336,0	335	337	0,5	19	341,3	340	343	1,2
5	336,7	336	338	0,7	20	340,2	339	343	1,3
6	338,2	338	339	0,4	21	340,4	339	343	1,0
7	337,9	336	339	0,7	22	341,4	341	343	0,7
8	335,1	334	337	0,8	23	340,2	339	342	0,9
9	334,6	333	336	0,8	24	339,8	339	341	0,8
10	335,2	333	338	1,1	25	340,1	339	341	0,9
11	333,8	329	336	2,0	26	339,5	339	340	0,5
12	337,0	335	339	1,0	27	339,8	338	341	0,9
13	337,1	335	338	1,1	28	340,1	339	341	0,6
14	338,4	335	340	1,0	29	336,1	335	337	0,6
15	338,3	337	339	0,7	30	332,4	328	335	2,3

Fonte : Elaboração própria.

Para aplicação das cartas de controle, torna-se necessário verificar a normalidade dos dados. O Gráfico 2 compara a linha ajustada aos dados reais, a fim de determinar o quão bem a distribuição dos dados se encaixa. Como esta distribuição se ajusta aos dados, pode-se usá-la para estimar percentis afim de fazer as devidas observações.

Gráfico 2 – Gráfico de probabilidade normal das médias das prensas



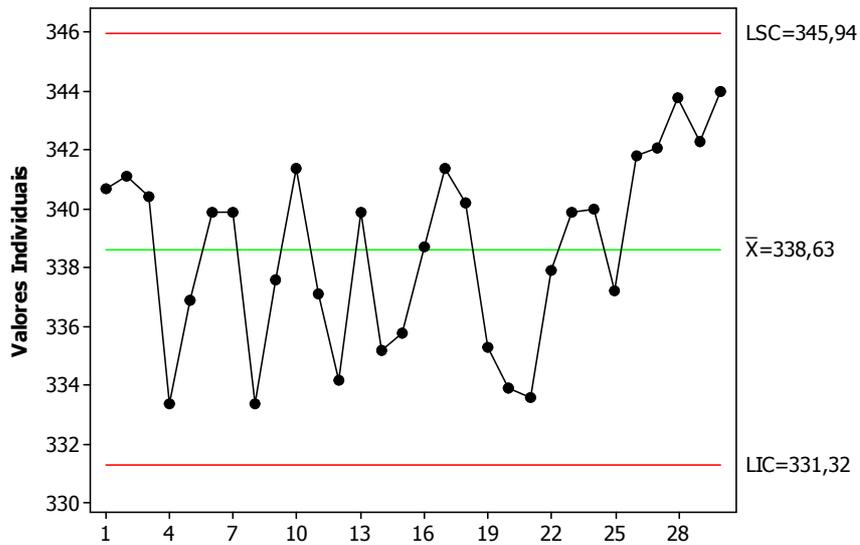
Fonte : Elaboração própria.

O gráfico de probabilidade para os dados de compressão mostra que os pontos de dados para as distribuições estão perto da linha normal ajustada e dentro do intervalo de confiança. Além disso, os valores de AD (Teste estatístico Anderson-Darling) são baixos e os valores de p (para as três prensas) estão acima do nível de significância de 0,05. Juntos, estes valores sugerem que a distribuição normal encaixa aos conjuntos de dados de compressão. Como a distribuição se ajusta aos dados e os dados podem ser considerados normais, pode-se usá-los para construção das cartas de controle.

#### 4.4 CARTAS DE CONTROLE DA MOLA AVALIADA NAS PRENSAS A, B e C

Sendo os dados organizados, utilizou-se para a construção das cartas de controle das prensas A, B e C, o programa Action do Excel. Conforme consta, com os dados do processo e análise das variáveis do CEP, pode-se apurar que, para o gráfico da prensa A (Gráfico 3), os valores do limite inferior de controle e limite superior de controle são de 331,3 e 345,9, sendo a média 338,6.

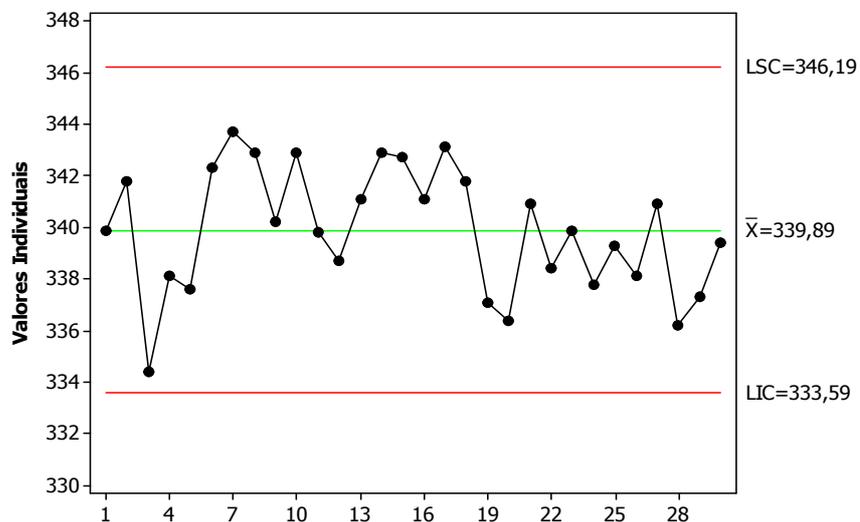
Gráfico 3 – Gráfico de controle da prensa A



Fonte : Elaboração própria.

Já para os testes realizados na prensa B, constatou-se os valores de limite inferior de controle 333,6 e 346,2 para o limite superior de controle. A média encontrada foi 339,9, conforme Gráfico 4.

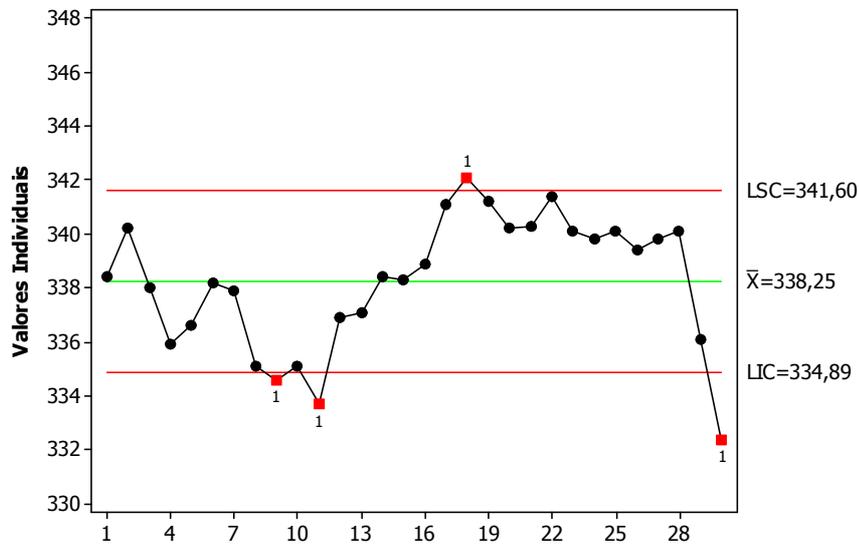
Gráfico 4 – Gráfico de controle da prensa B.



Fonte : Elaboração própria.

Com os dados da prensa C, a carta de controle montada (Gráfico 5) apresenta valores limites de 334,9 (LIC) e 341,6 (LSC). Já a média encontrada foi de 338,2.

Gráfico 5 – Gráfico de controle da prensa C.



Fonte : Elaboração própria.

Nos gráficos 3, 4 e 5, as unidades de medida utilizadas foram força (*kgf*) x *dias de teste*. É possível verificar que os dados referentes a carta A e B (Gráficos 3 e 4) mostram que os processos apresentam um comportamento aleatório dentro dos limites de controle sendo correto afirmar que os mesmos estão sob controle estatístico, o que valida a utilização destas cartas. Entretanto, o gráfico de controle da prensa C (Gráfico 5) além de apresentar um crescimento sequencial dos valores, apresenta pontos fora dos limites de controle. Desta forma, esta carta está fora de controle estatístico e não pode ser usada sem que um ajuste seja aplicado a prensa C.

#### 4.5 ANOVA APLICADA NOS RESULTADOS DA MOLA PARA CADA PRENSA

Organizando os dados de cada prensa no Excel (Tabela 5), foi realizado o teste de Análise de Variância nas prensas A, B e C e calculado a média das médias para cada uma.

TABELA 5 – Dados para o teste de Análise de Variância

Análise de Variância - ANOVA							
Média/Teste	Prensa A (kgf)	Prensa B (kgf)	Prensa C (kgf)	Média/Teste	Prensa A (kgf)	Prensa B (kgf)	Prensa C (kgf)
1	340,7	339,9	338,4	16	338,7	341,1	338,9
2	341,1	341,8	340,2	17	341,4	343,1	341,1
3	340,4	334,4	338	18	340,2	341,8	342,1
4	333,4	338,1	335,9	19	335,3	337,1	341,2
5	336,9	337,6	336,6	20	333,9	336,4	340,2
6	339,9	342,3	338,2	21	333,6	340,9	340,3
7	339,9	343,7	337,9	22	337,9	338,4	341,4
8	333,4	342,9	335,1	23	339,9	339,9	340,1
9	337,6	340,2	334,6	24	340	337,8	339,8
10	341,4	342,9	335,1	25	337,2	339,3	340,1
11	337,1	339,8	333,7	26	341,8	338,1	339,4
12	334,2	338,7	336,9	27	342,1	340,9	339,8
13	339,9	341,1	337,1	28	343,8	336,2	340,1
14	335,2	342,9	338,4	29	342,3	337,3	336,1
15	335,8	342,7	338,3	30	344	339,4	332,4
				Mm	337,8	340,6	337,0

Fonte : Elaboração própria.

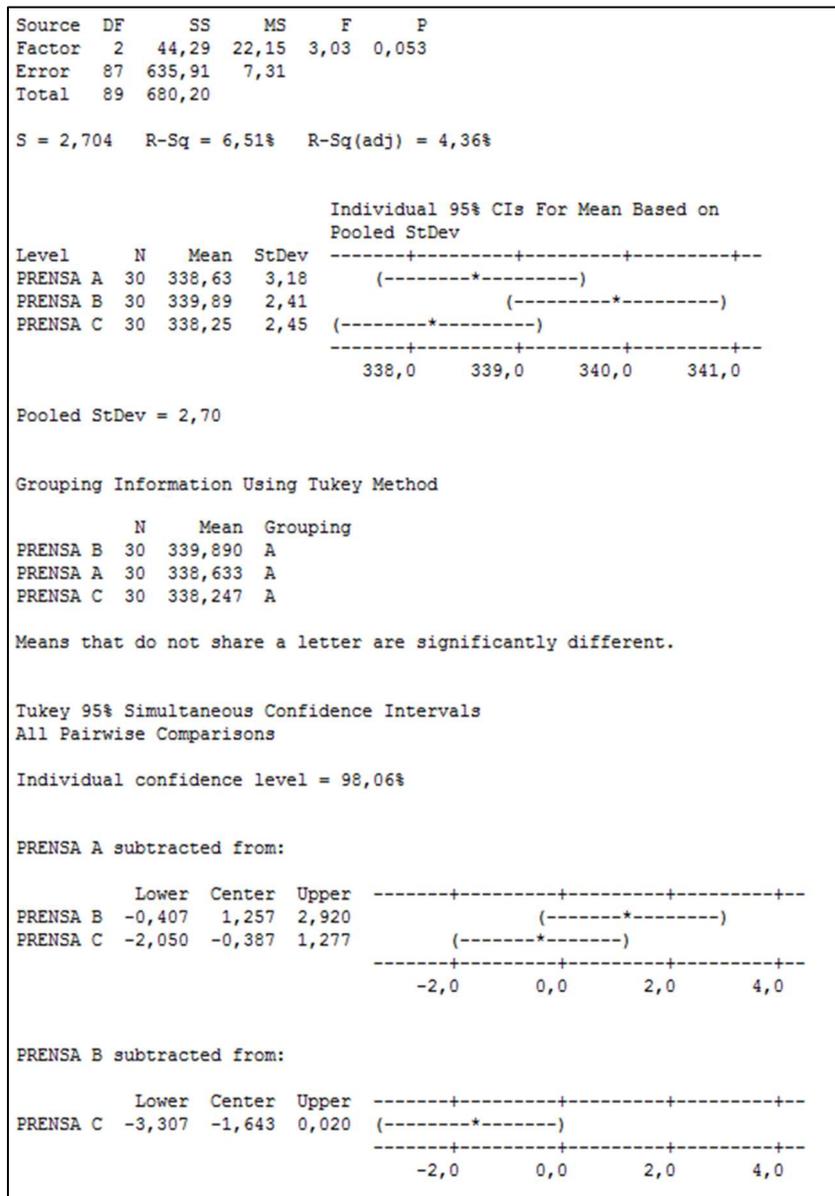
Considerando um  $\alpha = 0,05$ , interpretando o valor P, pode-se averiguar, apesar de próximo do nível de significância, o valor é maior que o de nível  $\alpha$  selecionado. Desta forma as médias não são significativamente diferentes.

A tabela de estatísticas individuais apresentada na Figura 26 avalia as seguintes propriedades dos dados da compressão:

- N: O número de observações incluídas para cada nível do fator.
- *Mean*: A média das observações para cada nível.
- StDev: Os desvios padrão da amostra para cada nível. A análise de variância assume que os desvios padrão da população para todos os níveis são iguais..
- PooledStDev: O desvio padrão combinado é uma estimativa do desvio padrão comum para todos os níveis.

Pode-se observar, através da comparação do intervalo de confiança individuais das médias (95%), que apesar da prensa B apresentar uma média superior as prensas A e C, seu intervalo de confiança se sobrepõem aos demais.

Figura 26 – Teste de Análise de Variância (Minitab) para as prensas



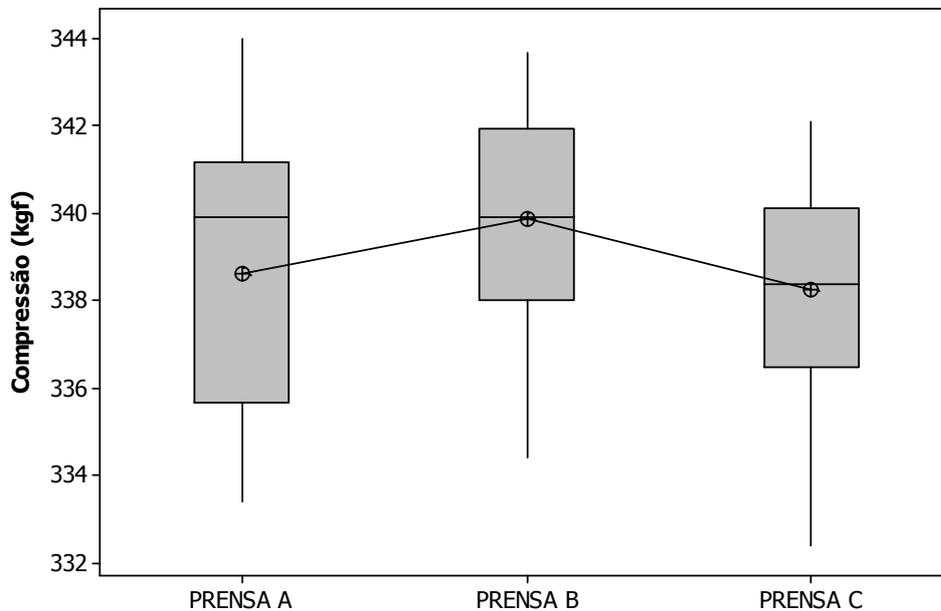
Fonte : Elaboração própria.

Para confirmação das informações, foi utilizado o método de Tukey. Este método compara as médias para cada par de níveis de fatores utilizando uma taxa de erro da família para controlar a taxa de erro do tipo I. A taxa de erro família é a probabilidade de fazer um ou mais erros do tipo I para todo o conjunto de

comparações. O método de Tukey ajusta o nível de confiança individual com base na taxa de erro da família escolhida. Desta forma, com o intervalo de confiança da família de 98,06%, comparando as prensas pode-se verificar que todas as prensas contêm o 0 (zero) no seu intervalo. Logo, assume-se que não há diferença significativa entre as médias.

Pela análise da Gráfico 6 podemos verificar que não existem *outlier* para os dados analisados e que suas distribuições se sobrepõem, sendo esta, mais uma evidencia da igualdade entre as médias.

Gráfico 6 – Boxplot dos resultados para as 3 prensas.



Fonte: Elaboração própria.

Desta forma os resultados das análises de compressão poderão ser utilizados e comparados, independente da prensa que venha a ser usada.

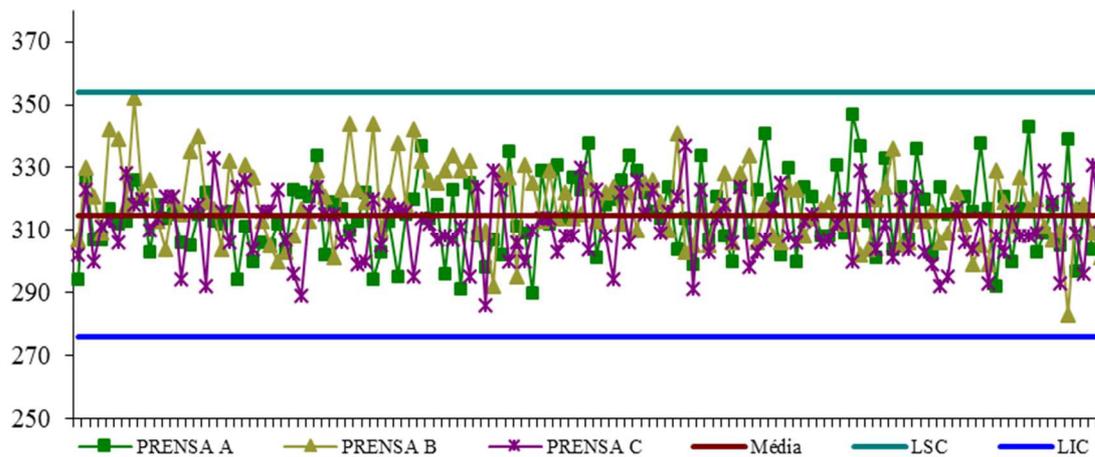
#### 4.6 COMPARAÇÕES ENTRE CARTA DE CONTROLE COM PELOTAS E CARTA DE CONTROLE COM A MOLA.

De maneira que ambas metodologias sejam replicadas, é necessário que se entenda como cada uma funciona. Deste modo que, evidencia-se que a carta de

controle utilizando pelotas demora cerca de 2 semanas para a sua conclusão (desde a coleta das pelotas do tipo RM20 até a realização da montagem dos gráficos de controle contendo os limites e a média), isso se forem deslocados 30% do contingente. Tendo assim, maiores custos no processo, já que os mesmos deixam de cumprir suas respectivas funções durante este tempo.

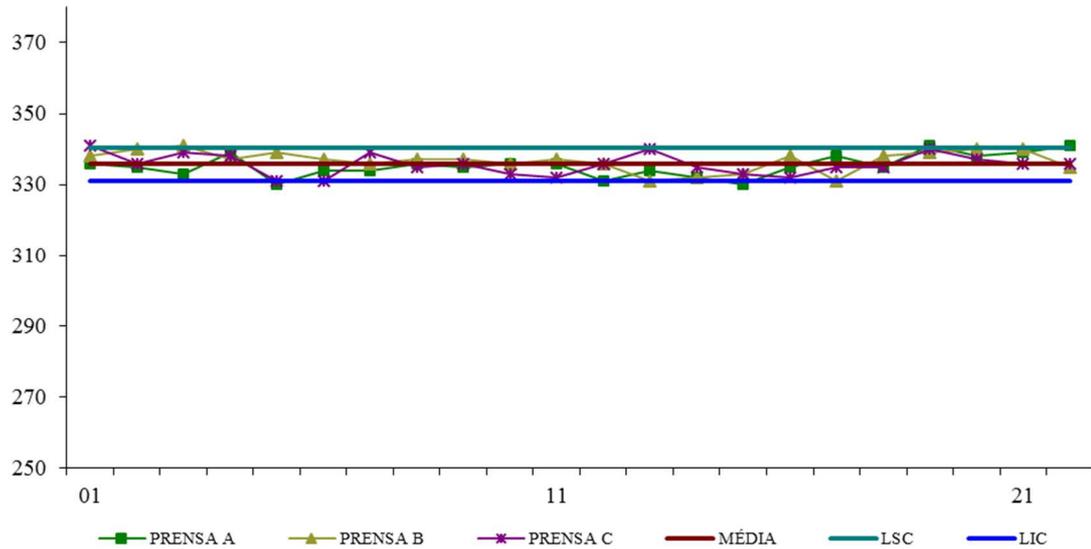
Feita a comparação das cartas de controle de ambas metodologias de controle de calibração, foi observado que os limites de controle inferior e superior adotados na metodologia proposta, variam bem menos que os limites utilizados nas cartas de controle anteriores. Conforme Gráfico 7 (*força (kgf) x dias de teste*), evidencia-se que ao utilizar pelotas em sua confecção, os limites se distanciam de maneira bem superior, se levado em consideração a carta de controle utilizando a mola (Gráfico 8), cujo resultado do deslocamento sofre uma pequena variação.

Gráfico 7 – Carta de controle com os dados utilizando pelota.



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 8 – Carta de controle com os dados da mola.



Fonte : Elaboração própria.

Considerando uma carta feita com base nos valores médios das prensas utilizadas (A, B e C), pode-se avaliar que a dispersão dos dados obtidos com pelotas comparadas aos obtidos com as prensas é muito maior. Isto também se mostra um fato favorável a utilização ao controle com a mola devido a baixa variabilidade dos valores encontrados na mesma. Esta variabilidade maior das pelotas explica-se pelo fato de sua própria variabilidade estrutural.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos por meio das análises de compressão utilizando a mola como instrumento comparativo com a metodologia adotada anteriormente, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- ✓ Através da carta de controle (Gráfico 1), constatou-se que utilizando pelotas como padrão secundário na aferição da calibração da prensa de compressão, pôde-se notar a presença de grande variabilidade na carta de controle, permitindo que a prensa trabalhe com menor rigor, contando com a presença de limites maiores, podendo ocorrer pequenos desvios sem serem notados.
- ✓ Ao serem avaliadas, as prensas A, B e C (Gráficos 3, 4 e 5) apresentaram valores bem próximos, concluindo-se que a mola não altera seus valores ao mudar de uma prensa pra outra, assim apresentando menor variabilidade nos seus resultados.
- ✓ Por meio do gráfico de probabilidade comprovou-se que para os dados de compressão utilizando a mola, as distribuições estão próximas a linha normal ajustada e dentro do intervalo de confiança, sendo que o valor de  $p$  sugere juntamente com os valores de  $AD$ , que os dados são normais podendo usá-los na construção das cartas de controle.
- ✓ Por último foi utilizado o método de Turkey que comparou as médias para cada par de níveis, comprovou que não há diferença significativa entre as médias da mola. Assim, os resultados das análises de compressão poderão ser utilizados e comparados, independente da prensa que venha ser utilizada.
- ✓ É esperado que a metodologia utilizando a mola de compressão seja mais sensível a desvios de calibração. Prova disso é que por meio desta, foi possível verificar que a prensa C estava fora de controle, algo que carta de controle utilizando pelotas não tinha constatado.
- ✓ Além do custo-benefício, a mola oferece maior confiabilidade nos resultados, pois como sua variação é bem baixa, qualquer pequeno desvio apresentado pela prensa sugerirá que esta necessita de alguma manutenção. Qualquer ponto fora dos limites de controle servirão como alerta para o check-up da prensa. Além de proporcionar ao empregado a menor exposição aos riscos inerentes da preparação da carta de controle utilizando pelotas.

Assim, com o auxílio do MINITAB e do Action foi possível demonstrar a aplicação confiável de uma nova metodologia de controle de calibração em prensas de resistência a compressão de pelotas queimadas. Essas ferramentas mostraram-se importantes para o entendimento do comportamento das variáveis quando solicitadas em cartas de controle de processos. Com base nos resultados encontrados, aplicando modelos conhecidos como da carta de controle do tipo *I – MR*, foi possível concluir a viabilidade da troca das metodologias de controle de calibração, com foco na redução do tempo e custos envolvidos no preparo da carta de controle.

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Devido ao êxito dos testes, comprovado pelos resultados encontrados, utilizando a mola como instrumento de conferência de calibração da prensa de resistência à compressão, alguns trabalhos podem ser sugeridos para o futuro, como:

- ✓ Calibração da prensa C que apresentou alguns pontos fora dos limites de controle, de maneira que com isso seja corrigida a carta de controle de processos;
- ✓ Realização do teste RR (Repetitividade e Reprodutibilidade) que é uma análise que visa comparar dados obtidos por um único operador e dados obtidos por operadores diferentes escolhidos de forma aleatória. Desta maneira, minimizando os desvios inerentes a realização do teste por uma única pessoa.
- ✓ Estudar a possibilidade de substituição do material para a mola.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Pelotas de minério de ferro como insumo para alto forno e redução direta. Determinação da resistência à compressão. **NBR ISO 4700: 2010**. 2010. Disponível em: <<http://abnt.org.br/pesquisas/?searchword=iso+4700>>. Acesso em: 11 nov. 2015.
- ABNT. Sistemas de gestão de medição - Requisitos para os processos de medição e equipamentos de medição. **NBR ISO 10012:2003**. 2004. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=1154>>. Acesso em: 03 mai. 2016.
- ADAMS, M. J.; MULLIER, M. A.; SEVILLE, J. P. K. Agglomerate strength measurement using a uniaxial confined compression test. **Powder Technology**, v. 78, n. 1, p. 5-13, 1994.
- ALMEIDA, Raimundo. **Resistência dos Materiais**. Escola Técnica Estadual Ferreira Viana. 2015. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/resmat1.html>>. Acesso em: 23 abr. 2016.
- ANJOS, Talita A. **Lei de Hooke**. Mundo Educação. 2015. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com/fisica/lei-hooke.htm>>. Acesso em: 22 set. 2015.
- APOSTILA **Estrutura e Propriedades dos Materiais: Ensaios Mecânicos dos Materiais**. 2010. 110 f. Disponível em: <<https://jorgeteofilos.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2016.
- AUTOMÁTICA Tecnologia. **Manual da Máquina Automática para Ensaio de Compressão de Pelotas de Minério de Ferro**. Serra, Espírito Santo. 2010.
- BENTO, Daniela A. **Fundamentos de Resistência dos materiais**. 2003. 67 f. Projeto Integrador (Curso Técnico em Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- BITENCOURT, Diógenes. **Molas**. IFES. Araguaia, Santa Catarina. 2008. Disponível em: <<https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/a/a6/MOLAS.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2016.
- BOECHAT, Fernando Oliveira. **Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro em fornos de redução direta usando o método dos elementos discretos**. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- BUFFONI, Salete Souza de Oliveira. **Propriedades Mecânicas dos Materiais**. UFF. 2016. Disponível em: <<http://www.cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2015/09/Propriedades-Mecanicas-dos-Materiais.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering an Introduction**. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

CALIBRATEC. **Calibração de Instrumentos de Medição**. Disponível em: <<http://www.calibratec.net.br/servicos/calibracao-de-instrumentos-de-medicao/>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

CASTILHO, Rodrigo Alberto de. et al. **Desenvolvimento de uma abordagem de programação das atividades de um laboratório de controle de qualidade de uma usina de pelotização de minérios de ferro**. XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, 03 a 05 de novembro de 2004.

COSTA, Antonio Fernando Branco; EPPRECHT, Eugenio Kahn; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. **Controle estatístico da qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

COSTA, Ricardo Vinícius Pereira da. **Otimização da Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta pela Aplicação de Projeto Robusto**. 2008. 130 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – CETEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

CUNHA, Rogério. **Curso de Pelotização de Minério de Ferro**. Relatório técnico, 2008.

DEBONA, Guilherme Mafioletti. et al. **Ensaio de Tração**. 1 fotografia. UTFPR. 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeuOkAE/relatorio-tracao>> Acesso em: 23 abr. 2016.

DINIZ, Eduardo José. **Pelotização de Minério de Ferro**. Faculdade Presidente Antônio Carlos de Conselheiro Lafaiete. Bacharelado em Engenharia de Minas. 2014. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAyYj4AF/pelotizacao-minerio-ferro>>. Acesso em: 22 set. 2015.

ELIPSE Software. **CEP – Controle Estatístico de Processo**. 11 de novembro de 2014. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=0aDb8xGWufU>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

FILIFE, Eduarda. **Validação dos Métodos de Calibração nos Laboratórios Nacionais de Metrologia**. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal, 2004.

FILHO, Hayrton Rodrigues do Prado. **A Trilogia de Joseph Juran**. 2013. Disponível em: <<http://banasqualidade.com.br/2012/portal/conteudo.asp?secao=artigos&codigo=16582>>. Acesso em: 26 abr. 2016.

FILHO, Lauro França; NETO, Henrique Lindenberg. **Resistência dos materiais com descrição, modelos e história dos conceitos**. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Brasília, 14 a 17 de setembro de 2004.

FONSECA, Mauricio Cota. **Influência da Distribuição Granulométrica do Pellet Feed no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta**. 2004. 142 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais) – CETEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

FONSECA, Urano Troseski et al. **Estudo no processo de amostragem sob visão preliminar de risco**. Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba-PR, 2002.

GONÇALVES, Carlos A.; MEIRELLES, Anthero M. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas, 2004.

GOOSSENS, M; RIBEIRO, Magno Rodrigues; MOURA, Gláucia Ellen de. **Alternativas de Circuitos de Moagem para Pelotização**. São Paulo: ABM, 2004. 1 v. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/12143.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

GRAÇA, Leonardo Martins. **Implicações das propriedades mineralógicas e microestruturais do minério de ferro no processo industrial de pelotização**. 2015. 204 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. Trad. Arlete Simille Marques. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INMETRO. **Acreditação de Laboratórios (ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005)**. 2005. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/acre\\_lab.asp](http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/acre_lab.asp)>. Acesso em: 04 mai. 2016.

INSTITUTO BRASIL DO AÇO. **Depois de queda em 2015, exportação da China volta a crescer em 2016**. 27 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/imprensa/noticias.asp?id=12901>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

JURAN, J. M.; GRZYNA, Frank M. **Controle de Qualidade I: Conceitos, políticas e filosofia da qualidade**. Revisão Técnica TQS Engenharia. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia do Trabalho**. São Paulo: Atlas. 1992.

LEOPARDI, Maria T. **Metodologia da pesquisa na saúde**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2002.

MACHADO, Caruline de Souza C; OLIVEIRA, José Roberto de; MILAGRE, Mariana Xavier. **Avaliação do efeito de uma mistura a base de CMC e resíduos de mármore na aglomeração de finos de minério**. 1 ed. Instituto Federal do Espírito Santo: coordenadoria de metalurgia, 2012.

MERCADO BRASILEIRO DE AÇO, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. 4-45, set. 2015.

MIRANDA, Juliana. **Deformação Elástica**. Grupo Escolar. 2015. Disponível em: <[www.grupoescolar.com/pesquisa/deformacao-elastica.html](http://www.grupoescolar.com/pesquisa/deformacao-elastica.html)>. Acesso em: 24 abr. 2016.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MORO, Norberto. **Elementos de Máquinas: Molas**. Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015. Disponível em: <<http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/Molas.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2016.

NUNES, José Eduardo Fernandes. **Controle de um Processo de Pelotização: Realimentação por Imagem**. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica. UFMG. 2004.

OLIVEIRA, Camila Cardoso de. et al. **Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio**. 1. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2013.

PEREIRA, Flávia; AURÉLIO, Sandro. **Como elaborar cartas de controle**. 2 de março de 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=6Kif86OoYKo>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

PALADINI, Edson Pacheco. et al. **Gestão da Qualidade: Teoria e Caos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

PERUZZO, Jucimar. **Experimentos de Física Básica: Mecânica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012.

PIZZOLATO, Morgana. et al. **Desenvolvimento e validação de métodos de ensaio**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2015.

PORTAL Boas Práticas. **LIMS é opção para automação e gestão de laboratórios**. 21 mar. 2013. Disponível em: <<http://boaspraticasnet.com.br/?p=787>>. Acesso em: 17 mai. 2016.

PORTAL Action: **Controle Estatístico do Processo**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/controle-estatistico-do-processo/introducao>>. Acesso em: 24 abr. 2016.

PORTAL Action: **Gráfico para valores individuais**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/controle-estatistico-do-processo/43-graficos-para-valores-individuais-e-amplitudes-moveis>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber Ten. **Controle Estatístico do Processo: Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Funções de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição**. Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS. UFRGS. Porto Alegre, 2012.

RIBEIRO, Manuel Joaquim P.M.; ABRANTES, João Carlos Castro. **Moagem em moinho de bolas**: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal. Março/abril, 2001.

RIGHI, Luiz Antônio. **Propriedades mecânicas dos materiais elétricos e eletrônicos**. Universidade Federal de Santa Maria. [s.d.]. Disponível em: <[http://coral.ufsm.br/righi/Materiais/MEE\\_aula11.php](http://coral.ufsm.br/righi/Materiais/MEE_aula11.php)>. Acesso em: 03 maio 2016.

SÁ, Kessel Godinho de; COSTA, Geraldo Magela da; VIEIRA, Cláudio Batista. **Efeito da composição mineralógica na resistência à compressão de pelotas de minério de ferro**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 1, p. 18-22, out-dez, 2004.

SAVINO, Maria Helena. **Gestão da qualidade em laboratórios – Conceitos básicos: Sistemas de Gestão**. 28 de janeiro de 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=zPi6Z0wgrLs>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DA ABM, p. 7. 2003. Santos. **Modelagem neural de um processo de produção de pelotas de minério de ferro**. Minas Gerais: UFMG, 2003.

SENAI. **Fundamentos da mecânica 2**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

SILVA, André Carlos. Aglomeração mineral. Curso de Especialização em Tratamento de Minérios. UFG, 2013.

SILVA, Aneirson F. **Estatística Industrial**: CEP. 23 de maio de 2014. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=WX2\\_ScFzrM8](https://www.youtube.com/watch?v=WX2_ScFzrM8)>. Acesso em: 26 abr. 2016.

SILVA, Luiz Roberto Oliveira da; ALVES, Marcelo Lima. **A calibração periódica de instrumentos de medição de padrões e suas relações com custos e benefícios**. In: Encontro para a Qualidade de Laboratórios, 1 a 3 de junho de 2004, São Paulo.

SILVA, Rouverson P. da. **et al. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n2/a10v28n2>> Acesso em: 06 mai. 2016.

SOTUYO, Juan Carlos. **Automatização do controle estatístico da qualidade dimensional nos processos de fabricação mecânica**. 1987. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1987.

SOUZA, Anderson Lucio de. **Efeito da adição de cal hidratada na etapa de aglomeração das pelotas de minério de ferro produzidas pela Samarco S.A.** Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014. Disponível em: <[www.ppgem.eng.ufmg.br](http://www.ppgem.eng.ufmg.br)>. Acesso em: 13 set. 2015.

TAKEDA, Mauro Noriaki; MORCELLI, Aparecido Edilson. **Apostila de Resistência dos Materiais.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAg4E4AC/apostila>>. Acesso em: 24 abr. 2016.

TECNOLOGIA em **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.1, n.2, p. 1-4, out-dez 2004. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materiais/download/12143.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

VALE. Unidade Técnica da Gerência Geral. **Manual de operação das usinas III e IV.** REG-000290, 01 nov.2012.

VALE. Laboratório Físico. **Manual de testes físicos.** REG-000600, 21 jun. 2015.

VALE. Laboratório Físico. **Manual de montagem da carta de controle.** REG-000603, 01 ago. 2012.

VALENTINE, Sóstenes Rosa; SOMMER, Willy Arno; MATIOLI, Graciette. **Validação de métodos analíticos.** Farmacêutica Industrial da UPM/LEPEMC. Maringá, Paraná. 2007.

VANDERLEI, Romel Dias. **Tensão e deformação: Carregamento Axial.** Centro de Tecnologia. Universidade Estadual de Maringá. 2016.

## APÊNDICES

Nestes apêndices são apresentados resultados complementares obtidos durante a execução dos testes com a mola de compressão apresentados na forma de tabelas.

### APÊNDICE A – Valores médios encontrados para a prensa A.

PRENSA A (Unidade de medida Kgf)																				
AMOSTRA	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
T1	341	340	340	340	340	340	340	340	341	340	341	341	341	341	342	341	341	341	341	342
T2	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	342	341	341	342	341	341	342	341
T3	341	339	339	340	341	341	341	340	340	340	340	340	341	341	341	341	340	341	341	340
T4	335	334	333	333	333	333	333	333	333	333	334	333	333	333	334	334	333	333	334	335
T5	336	337	336	336	337	336	337	337	337	336	337	337	337	337	337	338	338	338	337	337
T6	340	339	340	338	339	339	339	340	340	340	340	340	340	341	341	340	340	340	340	341
T7	340	340	340	339	341	340	340	340	340	340	341	339	341	340	340	340	340	339	340	339
T8	332	331	333	333	333	333	333	333	334	334	333	334	334	334	334	334	335	334	334	334
T9	338	337	337	337	337	337	338	338	339	338	338	337	338	337	338	337	338	338	337	337
T10	341	341	341	342	341	342	341	341	342	341	341	341	342	342	342	341	341	341	341	342
T11	337	337	336	337	337	336	337	337	337	338	337	338	338	337	337	337	338	338	337	337
T12	333	333	333	334	334	334	334	335	334	334	334	335	334	335	335	335	334	335	334	335
T13	342	341	341	340	339	340	340	339	338	339	339	340	339	340	340	340	340	340	340	341
T14	336	334	334	334	335	335	335	336	335	336	336	335	336	336	335	335	335	336	335	336
T15	334	335	335	336	336	335	335	336	336	336	336	337	337	336	336	337	336	336	336	335
T16	338	338	339	338	340	338	338	340	340	338	340	340	338	338	339	338	338	338	338	340
T17	341	341	342	341	342	341	341	341	341	343	342	343	342	342	341	341	341	341	341	341
T18	340	340	340	341	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	341	341	340	340	340	341
T19	333	333	334	334	335	335	336	335	336	336	335	335	336	337	337	336	336	336	335	336
T20	333	334	333	334	333	334	334	333	334	333	334	334	334	335	334	334	335	335	334	335
T21	334	334	333	335	334	334	333	333	334	333	333	333	334	334	334	334	333	333	333	334
T22	338	337	337	337	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	338	339	337
T23	339	340	341	340	340	339	340	340	340	339	340	340	340	340	340	340	340	340	339	340
T24	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	341	339	340	340	340
T25	336	336	337	338	338	338	337	337	338	337	338	337	337	338	337	337	337	337	337	338
T26	343	342	342	342	341	342	341	342	341	341	343	342	342	341	341	341	341	342	342	343
T27	342	342	343	343	342	342	342	343	342	342	342	342	342	342	342	341	342	342	342	342
T28	344	344	345	344	344	345	344	344	344	344	344	343	343	343	343	344	343	344	343	343
T29	342	342	342	343	342	342	342	342	342	342	343	342	343	342	342	343	343	342	343	342
T30	344	343	344	344	344	343	344	344	345	344	344	344	344	344	344	344	344	345	344	344

Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE B – Valores médios encontrados para a prensa B.

PRENSA B (Unidade de medida Kgf)																				
AMOSTRA	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
T1	339	339	339	339	339	340	340	339	340	340	340	340	340	341	340	341	340	341	340	340
T2	340	341	341	343	341	341	341	341	342	343	342	341	342	343	342	343	342	343	342	342
T3	334	333	335	335	335	335	334	334	335	335	334	335	334	334	334	334	334	334	334	335
T4	337	338	337	338	338	338	337	338	338	338	338	338	338	339	339	338	339	339	339	338
T5	338	339	338	338	338	337	338	338	337	337	338	338	337	338	337	337	337	337	337	338
T6	342	342	342	343	342	342	342	342	343	343	343	342	342	343	343	342	342	342	342	342
T7	345	344	343	344	344	343	344	344	344	343	343	343	344	343	344	343	343	344	345	344
T8	343	343	343	343	344	343	343	343	343	343	343	343	342	343	343	343	342	342	342	343
T9	342	340	342	340	341	340	341	340	339	339	340	340	340	340	340	339	340	340	340	341
T10	341	343	343	344	343	344	343	343	342	343	343	343	343	343	342	343	343	343	343	343
T11	339	341	340	340	340	340	339	340	340	339	339	340	339	340	340	340	339	340	341	340
T12	339	339	339	339	339	338	339	339	338	339	338	339	339	338	339	338	340	338	338	339
T13	341	340	340	341	340	340	340	341	341	342	341	343	341	341	341	341	343	341	341	342
T14	340	340	343	344	343	344	344	342	342	344	343	343	343	343	343	343	343	343	343	344
T15	340	341	343	343	343	343	342	343	343	342	344	344	343	343	343	342	343	343	343	343
T16	340	339	341	341	341	342	341	341	341	342	343	341	341	340	343	341	341	342	341	341
T17	341	343	342	342	343	343	344	343	344	343	344	343	343	344	344	343	343	343	344	343
T18	341	342	343	342	342	341	342	342	341	342	343	342	341	341	343	341	341	342	341	343
T19	337	337	338	338	337	337	338	337	337	337	337	338	336	336	337	337	337	336	337	337
T20	337	337	336	337	337	337	337	337	335	337	335	337	335	337	337	337	335	337	337	335
T21	341	341	342	341	341	340	341	341	341	342	340	341	341	340	341	342	341	340	341	340
T22	335	337	337	337	337	339	338	339	338	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	340
T23	339	339	341	339	340	339	340	340	340	340	341	340	340	340	340	340	340	340	340	340
T24	337	339	338	337	338	338	338	337	338	339	337	338	338	337	338	337	338	338	337	338
T25	337	338	339	338	339	339	339	339	339	339	340	341	340	340	340	340	340	340	340	339
T26	337	338	337	338	338	338	338	338	339	338	339	337	338	338	339	339	338	338	338	338
T27	341	343	342	341	341	341	341	341	341	340	341	341	341	340	341	341	340	341	341	341
T28	335	335	335	337	337	335	335	336	335	336	336	336	337	337	337	336	336	338	338	338
T29	335	337	336	337	337	337	338	337	338	337	338	337	337	338	338	337	338	338	338	338
T30	338	339	339	339	339	340	339	339	340	339	339	340	339	340	339	340	340	340	340	339

Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE C – Valores médios encontrados para a prensa C.

PRENSA C (Unidade de medida Kgf)																				
AMOSTRA	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
T1	339	338	338	339	338	339	339	338	338	339	338	339	339	338	338	338	339	338	339	338
T2	339	340	340	340	340	340	341	340	340	341	340	340	340	341	341	340	340	341	340	340
T3	336	338	339	338	338	336	337	338	338	338	338	339	338	338	339	339	338	338	338	339
T4	337	337	336	336	336	336	336	336	335	336	336	336	335	336	335	336	336	336	336	336
T5	336	336	336	337	336	336	338	336	338	337	337	338	337	336	336	337	336	337	337	336
T6	338	338	338	339	338	338	338	338	338	339	338	338	339	338	338	338	338	338	338	339
T7	336	337	337	337	338	338	338	338	338	338	338	339	338	338	339	338	338	338	338	338
T8	336	337	336	336	335	335	335	335	335	335	335	334	334	335	334	335	335	334	335	335
T9	336	336	335	335	335	335	335	335	335	335	334	335	334	335	334	334	333	334	333	334
T10	335	338	336	336	336	336	335	335	335	335	336	335	335	335	336	335	333	334	334	334
T11	335	335	336	336	335	335	335	335	335	335	334	335	334	333	333	333	333	330	329	330
T12	336	339	338	338	338	337	337	337	337	338	337	338	337	337	336	336	336	335	336	336
T13	335	337	338	338	338	337	338	338	337	337	338	338	338	337	336	336	338	336	336	335
T14	335	338	338	339	340	339	339	339	338	339	339	339	338	339	338	338	338	338	338	338
T15	338	339	339	339	339	339	338	339	338	338	339	338	339	338	338	339	337	338	337	337
T16	340	341	340	340	340	340	340	338	340	338	339	338	338	338	338	338	338	338	339	338
T17	342	343	342	341	341	341	340	341	341	341	342	341	341	341	341	341	340	341	340	341
T18	343	343	343	343	343	344	343	343	342	342	343	341	342	341	341	341	341	341	342	341
T19	343	342	343	343	342	343	341	342	340	342	340	341	340	341	340	341	340	341	340	340
T20	343	341	343	341	341	341	341	340	341	340	340	340	339	339	339	339	339	339	339	339
T21	341	343	341	342	341	341	340	341	340	341	340	340	340	340	340	339	340	339	340	340
T22	343	342	341	343	341	341	342	342	341	342	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341
T23	341	341	341	341	341	340	342	341	341	340	340	340	339	339	339	340	339	339	339	340
T24	341	341	341	340	341	340	341	340	339	339	339	340	340	339	339	339	339	339	339	340
T25	341	341	341	341	341	341	341	341	340	340	340	340	339	340	339	339	339	339	339	340
T26	340	340	339	339	339	339	339	339	339	339	340	339	340	339	339	340	340	340	340	340
T27	340	338	339	338	339	339	339	340	340	340	340	340	341	341	340	340	340	341	340	340
T28	340	339	339	340	339	340	340	340	340	340	340	341	340	340	340	341	341	340	341	341
T29	335	335	337	336	337	336	336	336	337	336	335	336	336	336	337	337	336	336	336	336
T30	333	334	335	334	335	334	334	334	334	333	334	332	333	333	332	330	330	328	328	328

Fonte: Elaboração própria.