

**Universidade de Évora – Escola de Ciências e Tecnologia**

**Mestrado em Engenharia Mecatrónica**

Relatório de Estágio

**Estudo Estatístico da Qualidade de Cravamentos**

**Pedro Salvador Teixeira Fonseca**

Orientador(es) / João Manuel Figueiredo

Rui Manuel da Silva Nunes

Évora 2023

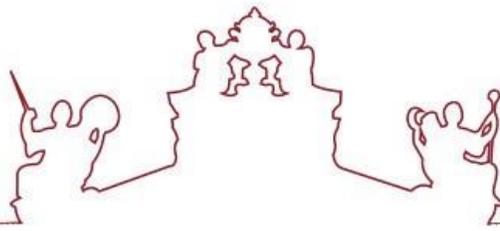
---

---

---

---

---



**Universidade de Évora – Escola de Ciências e Tecnologia**

**Mestrado em Engenharia Mecatrónica**

Relatório de Estágio

**Estudo Estatístico da Qualidade de Cravamentos**

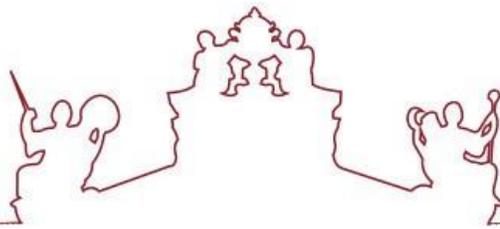
**Pedro Salvador Teixeira Fonseca**

Orientador(es) / João Manuel Figueiredo

Rui Manuel da Silva Nunes

Évora 2023





O relatório de estágio foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora)

Vogais | Frederico José Grilo (Universidade de Évora) (Arguente)  
João Manuel Figueiredo (Universidade de Évora) (Orientador)

Évora 2023



## Agradecimentos

A realização desta tese representou uma jornada desafiadora e gratificante, e não teria sido possível sem o apoio e contribuição de várias pessoas e instituições. Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me ajudaram ao longo deste caminho. Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores internos Marco Bonito e Rui Nunes, pela orientação sábia, incentivo constante e conhecimento compartilhado e também ao meu orientador João Figueiredo por ter aceite ser meu orientador deste projeto e por estar sempre disponível para qualquer esclarecimento e orientação.

Gostaria de agradecer a todos os membros da equipa de processo, pelas discussões estimulantes, apoio mútuo e pela atmosfera de colaboração que tornaram essa experiência enriquecedora

À minha família e amigos, meu profundo agradecimento pelo apoio incondicional, encorajamento e paciência ao longo desta jornada. O vosso apoio emocional e motivação foram essenciais para superar os desafios enfrentados durante a pesquisa.

Não posso deixar de agradecer a KEMET ELECTRONICS PORTUGAL, S.A. e Universidade de Évora pelo suporte e acesso aos recursos necessários para realizar esta pesquisa. A contribuição foi fundamental para a conclusão bem-sucedida deste trabalho.

## **Estudo Estatístico da Qualidade de Cravamentos**

### **1. Resumo**

Ao longo dos anos a indústria automóvel tem vindo a ficar cada vez mais especializada e automatizada, cada vez mais os processos apresentam uma complexidade e precisão mais exata. Nos sistemas automóveis mais atuais destaca-se a utilização de componentes eletrônicos no auxílio de alguns mecanismos.

De entre todos os componentes elétricos temos os condensadores, que por possuírem características como o armazenamento de cargas elétricas sob a forma de um campo eletrostático (Capacidade) e por passarem sinais de corrente alternada mas bloquearem corrente contínua, são um componente elétrico bastante utilizado para separar circuitos corrente alternada - corrente contínua (Circuito AC-DC).

Existem vários tipos de condensadores, no âmbito deste trabalho destacam-se os condensadores eletrolíticos. Os condensadores eletrolíticos baseiam o seu princípio de funcionamento na criação de um dielétrico de espessura micrométrica directamente na superfície de contacto entre dois materiais condutores (ânodo e cátodo) que se encontram ligados aos terminais (negativo e positivo) por ligas de alumínio que se encontram cravadas directamente nos materiais.

O cravamento das ligas de alumínio nos materiais é o processo alvo do estudo que tem como objetivo retirar um teste destrutivo dos procedimentos que garantem a qualidade das peças produzidas, reduzindo assim o desperdício de peças e custos associados.

Palavras-chave: Condensadores, Cravamento, Ânodo, Cátodo, Testes de Tração, Testes Elétricos

## **Statistical Study of Crimping Quality**

### **1. Abstract**

Over the years, the automotive industry has become increasingly specialized and automated, with increasingly more complex and accurate processes. In the most current automotive systems, the use of electrical components to control mechanical systems stands out.

Among all the electrical components we have capacitors, which, due to their characteristics such as the storage of electrical charges in the form of an electrostatic field (Capacity) and because they pass alternating current signals but block direct current, are an electrical component widely used to separate AC-circuits from DC-circuits.

There are several types of capacitors, in the scope of this work the electrolytic capacitors stand out. Electrolytic capacitors base their operating principle on the creation of a dielectric of micrometric thickness directly on the contact surface between two conductive materials (anode and cathode) that are connected to the terminals (negative and positive) by aluminum alloys that are crimped directly on the materials.

The crimping of aluminum alloys in the materials is the object of this study, which aims to remove a destructive test from the procedures that guarantee the quality of the produced parts, thus reducing the waste of parts and associated costs.

Keywords: Capacitors, Crimping, Anode, Cathode, Tensile Tests, Electrical Tests

# 1 Índice

2	Introdução.....	13
2.1	Motivação.....	13
2.2	Objetivos.....	13
2.3	Metodologia .....	14
2.4	Estrutura .....	15
3	Produto .....	16
3.1	Informação geral .....	16
3.2	Aplicações.....	16
3.3	Caraterísticas .....	16
3.4	Dimensões .....	17
3.5	Fabricação.....	18
3.5.1	Corte do material .....	18
3.5.2	Bobinagem.....	18
3.5.3	Montagem .....	18
3.5.4	Processo de regeneração (Aging).....	19
3.5.5	Testes elétricos.....	19
4	Máquina de Enrolamento - AVE 0392K.....	21
4.1	Equipamento .....	21
4.2	Sistema de monitorização ( <b>Kistler</b> ).....	22
4.2.1	Hardware .....	22
4.2.2	Dimensões.....	23
4.2.3	Softwares .....	24
5	Testes realizados .....	27
5.1	Definição dos testes .....	27
5.1.1	Testes de tração .....	29
5.2	Análise dos testes do cátodo .....	31
5.2.1	Análise dos testes do catodo – 1900 [N/m <sup>2</sup> ] .....	31
5.2.2	Análise dos testes do catodo – 2000 [N/m <sup>2</sup> ] .....	33
5.2.3	Análise dos testes do catodo – 2100 [N/m <sup>2</sup> ] .....	35
5.2.4	Análise dos testes do catodo – 2300 [N/m <sup>2</sup> ] .....	37
5.2.5	Análise dos testes do catodo – 2400 [N/m <sup>2</sup> ] .....	39

5.2.6	Análise dos testes do cátodo – 2500 [N/m <sup>2</sup> ] .....	41
5.2.7	Análise completa dos testes do cátodo .....	43
5.3	Análise dos testes do ânodo .....	44
5.3.1	Análise dos testes do ânodo – 1400 [N/m <sup>2</sup> ] .....	44
5.3.2	Análise dos testes do ânodo – 1500 [N/m <sup>2</sup> ] .....	46
5.3.3	Análise dos testes do ânodo – 1600 [N/m <sup>2</sup> ] .....	48
5.3.4	Análise dos testes do ânodo – 1900 [N/m <sup>2</sup> ] .....	50
5.3.5	Análise dos testes do ânodo – 2000 [N/m <sup>2</sup> ] .....	52
5.3.6	Análise dos testes do ânodo – 2100 [N/m <sup>2</sup> ] .....	54
5.3.7	Análise completa dos testes do ânodo .....	56
5.4	Definição dos testes elétricos .....	57
5.4.1	Testes elétricos.....	58
5.4.2	Teste elétrico - Surge Eletrical Test .....	58
5.4.3	Teste elétrico - Endurance DC Test .....	61
6	Conclusão .....	64
7	Trabalhos Futuros .....	65
8	Referências Bibliográficas .....	66

## Lista de Imagens

Imagem 3.1. Desenho do condensador PEG .....	17
Imagem 3.2. Tabela de dimensões de condensadores PEG .....	18
Imagem 3.3. Construção de condensador axial .....	18
Imagem 3.4. Imagem de protocolo - Aging .....	19
Imagem 3.4. Imagem de protocolo elétrico – Corrente de fuga.....	19
Imagem 3.6. Imagem de protocolo elétrico – Capacidade.....	20
Imagem 3.7. Imagem de protocolo elétrico – Resistência em serie equivalente (ESR) .....	20
Imagem 3.8. Imagem de protocolo elétrico – Tangente - delta .....	20
Imagem 4.1. Equipamento de Bobinagem – AVE 0392 .....	21
Imagem 4.2. Sistema de monitorização - <b>Kistler</b> .....	22
Imagem 4.3. Imagem ilustrativa de conexões do sistema de monitorização (source: Manual <b>kistler</b> ) .....	23
Imagem 4.4. Imagem de desenho do sistema de monitorização(source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	23
Imagem 4.5. Menu inicial do sistema de monitorização(source: Manual <b>kistler</b> ).....	24
Imagem 4.6. Menus do sistema de monitorização(source: Manual <b>Kistler</b> ).....	25
Imagem 4.7. Informação da interface do software <b>maXYmos PC</b> (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	26
Imagem 5.1. Curvas de cravamento do Ânodo.....	27
Imagem 5.2. Curvas de cravamento do Cátodo.....	28
Imagem 5.3. Pinça e suporte de teste de tração .....	29
Imagem 5.4. Dinamómetro.....	30
Imagem 5.5./Imagem 5.6. Exemplo de análise visual do material/ liga de alumínio.....	30
Imagem 5.7. Curvas de cravamento do cátodo a 1900[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	31
Imagem 5.8. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 1900[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> ) .	32
Imagem 5.9. Curvas de cravamento do cátodo a 2000[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	33
Imagem 5.10. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 2000[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	34
Imagem 5.11. Curvas de cravamento do cátodo a 2100[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	35
Imagem 5.12. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 2100[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	36
Imagem 5.13. Curvas de cravamento do cátodo a 2300[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	37
Imagem 5.14. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 2300[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	38
Imagem 5.15. Curvas de cravamento do cátodo a 2400[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	39
Imagem 5.16. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 2400[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	40
Imagem 5.17. Curvas de cravamento do cátodo a 2500[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	41
Imagem 5.18. Análise estatística das curvas de cravamento do cátodo a 2500[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	42
Imagem 5.19./Imagem 5.20. Imagem de cátodo após teste de tração OK/NOK.....	43
Imagem 5.21. Curvas de cravamento do ânodo a 1400[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	44
Imagem 5.22. Análise estatística das curvas de cravamento do ânodo a 1400[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	45
Imagem 5.23. Curvas de cravamento do ânodo a 1500[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	46
Imagem 5.24. Análise estatística das curvas de cravamento do ânodo a 1500[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	47
Imagem 5.25. Curvas de cravamento do ânodo a 1600[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	48
Imagem 5.26. Análise estatística das curvas de cravamento do ânodo a 1600[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	49
Imagem 5.27. Curvas de cravamento do ânodo a 1900[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	50
Imagem 5.28. Análise estatística das curvas de cravamento do ânodo a 1900[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	51
Imagem 5.29. Curvas de cravamento do ânodo a 2000[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	52
Imagem 5.30. Análise estatística das curvas de cravamento do ânodo a 2000[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	53

Imagem 5.31. Curvas de cravamento do ânodo a 2100[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	54
Imagem 5.32. Analise estatistica das curvas de cravamento do ânodo a 2100[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>Minitab</b> )	55
Imagem 5.33/Imagem 5.34./Imagem 5.35./Imagem 5.36. Analise visual do material/ ligas do ânodo ....	55
Imagem 5.37. Curvas de cravamento do cátodo para testes elétricos a 2000[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ).....	57
Imagem 5.38./Imagem 5.39. Curvas de cravamento do ânodo para testes elétricos a 1600[N/m <sup>2</sup> ]/1900[N/m <sup>2</sup> ] (source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	57
Imagem 6.1. Curvas do cátodo com janela final (Source: <b>maXYmos PC</b> ) .....	65
Imagem 6.2. Curvas do ânodo com janela final (Source: <b>maXYmos PC</b> ).....	65

## Lista de Gráficos

Gráfico 5.2.1./Gráfico 5.2.2. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 1900[N/m <sup>2</sup> ] .....	31
Gráfico 5.2.3. Valores dos testes de tração do cátodo a 1900 N/m <sup>2</sup> .....	32
Gráfico 5.2.4./Gráfico 5.2.5. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2000[N/m <sup>2</sup> ] .....	33
Gráfico 5.2.6. Valores dos testes de tração do cátodo a 2000 N/m <sup>2</sup> .....	34
Gráfico 5.2.7./Gráfico 5.2.8. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2100[N/m <sup>2</sup> ] .....	35
Gráfico 5.2.9. Valores dos testes de tração do cátodo a 2100 N/m <sup>2</sup> .....	36
Gráfico 5.2.10./Gráfico 5.2.11. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2300[N/m <sup>2</sup> ] .....	37
Gráfico 5.2.12. Valores dos testes de tração do cátodo a 2300 N/m <sup>2</sup> .....	38
Gráfico 5.2.13./Gráfico 5.2.14. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2400[N/m <sup>2</sup> ] .....	39
Gráfico 5.2.15. Valores dos testes de tração do cátodo a 2400 N/m <sup>2</sup> .....	40
Gráfico 5.2.16./Gráfico 5.2.17. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2500[N/m <sup>2</sup> ] .....	41
Gráfico 5.2.18. Valores dos testes de tração do cátodo a 2500 N/m <sup>2</sup> .....	42
Gráfico 5.2.19. Gráfico dos valores individuais do cravamento do cátodo (source: ).....	43
Gráfico 5.3.1./Gráfico 5.3.2. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 1400[N/m <sup>2</sup> ] .....	44
Gráfico 5.3.3. Valores dos testes de tração do ânodo a 1400 N/m <sup>2</sup> .....	45
Gráfico 5.3.4./Gráfico 5.3.5. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 1500[N/m <sup>2</sup> ] .....	46
Gráfico 5.3.6. Valores dos testes de tração do ânodo a 1500 N/m <sup>2</sup> .....	47
Gráfico 5.3.7./Gráfico 5.3.8. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 1600[N/m <sup>2</sup> ] .....	48
Gráfico 5.3.9. Valores dos testes de tração do ânodo a 1600 N/m <sup>2</sup> .....	49
Gráfico 5.3.10./Gráfico 5.3.11. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 1900[N/m <sup>2</sup> ] .....	50
Gráfico 5.3.12. Valores dos testes de tração do ânodo a 1900 N/m <sup>2</sup> .....	51
Gráfico 5.3.13./Gráfico 5.3.14. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2000[N/m <sup>2</sup> ] .....	52
Gráfico 5.3.15. Valores dos testes de tração do ânodo a 2000 N/m <sup>2</sup> .....	53
Gráfico 5.3.16./Gráfico 5.3.17. Análise qualitativa do estado do material/ligas para cravamento a 2100[N/m <sup>2</sup> ] .....	54
Gráfico 5.3.18. Valores dos testes de tração do ânodo a 2100 N/m <sup>2</sup> .....	55
Gráfico 5.3.19. Gráfico dos valores individuais do cravamento do ânodo (source: MiniTab).....	56
Gráfico 5.4.1. Gráfico da capacidade – teste elétrico <b>surge</b> .....	58
Gráfico 5.4.2. Gráfico da tangente – teste elétrico <b>surge</b> .....	59
Gráfico 5.4.3. Gráfico da ESR 100kHz – teste elétrico <b>surge</b> .....	59
Gráfico 5.4.4. Gráfico da ESR 100Hz – teste elétrico <b>surge</b> .....	60
Gráfico 5.4.5. Gráfico da capacidade – teste elétrico <b>endurance</b> .....	61

Gráfico 5.4.6. Gráfico da ESR – teste elétrico <b>endurance</b> .....	62
Gráfico 5.4.7. Gráfico da tangente – teste elétrico <b>endurance</b> .....	62
Gráfico 5.4.8. Gráfico evolução dos peso das peças ao longo do tempo – teste elétrico <b>endurance</b> .....	63

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Tabela das características e performance do produto .....	16
Tabela 3.2. Tabela de dimensões do produto.....	17
Tabela 5.1. Tabela indicativa dos testes a serem realizados .....	28
Tabela 5.2. Tabela de valores do teste elétrico <b>surge</b> .....	60
Tabela 5.3. Tabela dos valores da capacidade do teste elétrico <b>endurance</b> .....	61
Tabela 5.4. Tabela dos valores de ESR do teste elétrico <b>endurance</b> .....	62
Tabela 5.5. Tabela dos valores de tangente do teste elétrico <b>endurance</b> .....	62
Tabela 5.6. Tabela dos valores da evolução do peso das peças .....	63

## 2 Introdução

### 2.1 Motivação

Com a indústria automóvel a ficar cada vez mais especializada [7] e com os seus processos cada vez mais automatizados a monitorização dos processos de fabrico mais críticos é cada vez mais fundamental e vital para qualquer fábrica.

No âmbito deste trabalho o processo do cravamento das ligas de alumínio nos materiais é um dos mais importantes uma vez que é um processo totalmente automatizado, preciso e complexo pois caso este apresente algum tipo de anomalia no seu decorrer e o cravamento não se apresente estável pode originar num elevado número de peças para desperdício, uma vez que se a conexão dos materiais condutores com os terminais não estiver dentro do esperado o condensador pode vir a ter uma eficiência, tempo de vida e desempenho bastante abaixo do esperado ou pode até nunca chegar a desempenhar o seu papel.

É assim vital que todos os cravamentos do processo estejam otimizados para que seja possível tirar o máximo partido do condensador sem restrições para o qual o seu objetivo foi desenvolvido, podendo assim de forma fiável desempenhar as suas funções.

### 2.2 Objetivos

O presente trabalho tem diversos objetivos todos eles focando-se na otimização e melhoria do processo, deteção ainda mais antecipada de erros ou deformidades nas peças produzidas.

Numa primeira abordagem neste desafio, dada a conhecer a carta de controlo que é feita na produção de cada lote (1ª peça OK), o objetivo é que seja retirado o ponto destrutivo onde é necessário que seja aberta a peça para se verificar visualmente o estado do cravamento.

Um dos objetivos deste trabalho foi perceber e entender todos os mecanismos que estão associados ao processo de cravamento das ligas de alumínio. O que implicou além de uma pesquisa teórica perceber ao detalhe o funcionamento de todo o mecanismo de onde faz parte o processo de cravamento.

Ainda dentro dos objetivos específicos destaca-se o sistema de monitorização que apenas se encontra instalado fisicamente na máquina e na qual o objetivo do estudo é, após recolher todos os dados necessários, dar ao sistema de monitorização as condições para que consiga distinguir um bom cravamento de mau cravamento, sucutando assim a peça com defeito no cravamento ou até alertar que o punção de cravamento se encontra com um nível de desgaste bastante avançado, para ser substituído afim de que seja garantido a qualidade do cravamento no material.

Outro objetivo deste estudo será a análise dos dados recolhidos em todos os testes elaborados para assim definir no sistema de monitorizações limites de valores para os quais o cravamento é considerado conforme e não conforme, e procurar qual o intervalo ideal para um cravamento das ligas de alumínio nos materiais.

A todos os intervalos onde são realizados os testes de cravamento irá ser realizado um estudo de capacidade do processo ( $C_{pk}$ ). O índice de capacidade de processo ( $C_{pk}$ ) é uma ferramenta estatística,

para medir a capacidade de um processo produzir resultados dentro dos limites de especificação do cliente. Em palavras simples, mede a capacidade do produtor de produzir um produto dentro da faixa de tolerância do cliente. O Cpk é usado para estimar o quão próximo se está de um determinado alvo e o quão consistente se é em torno do desempenho médio. Também pode estimar o desempenho futuro do processo, assumindo que o desempenho é consistente ao longo do tempo.

### 2.3 Metodologia

Este projeto foi dividido em várias fases para que ao longo do tempo o estudo fosse realizado de maneira pragmática de modo a cumprir os objetivos propostos.

#### **1ª fase – Perceber/entender o equipamento**

Nesta primeira abordagem ao desafio perceber como funciona o equipamento é uma parte fulcral uma vez que o cravamento das ligas de alumínio é realizado na máquina onde ocorre o enrolamento dos materiais metálicos e isolantes (ânodo, cátodo e papel). Entender o funcionamento da máquina seria o primeiro objetivo, a complementar este primeiro objetivo junta-se o desafio de conhecer e entender o equipamento de monitorização dos cravamentos (kistler) que virá ser de onde a maioria dos dados deste estudo seriam retirados (gráficos das curvas, valores das forças de cravamento, estatísticas, etc... )

#### **2ª fase – Reproduzir peças com diferentes valores de cravamento**

Após entender o funcionamento da máquina a seguinte fase do desafio viria a ser a reprodução de vários testes com diferentes valores de cravamentos, cada teste seria composto por 30 peças que continham 4 ligas de alumínio por peça, 2 ligas por material condutor, num total de 60 cravamentos por teste.

#### **3ª fase – Recolha de dados para o estudo**

Com os testes realizados o próximo passo viria a ser a recolha dos valores dos testes de tração realizados a cada peça de cada teste bem como a recolha dos dados do sistema de monitorização dos cravamentos afim de identificar qual/quais os testes que melhor se enquadram no standard de qualidade para que sejam replicados novamente para a realização de testes elétricos com o objetivo de identificar qual a melhor janela de valores de cravamento admissível afim de tirar o máximo partido dos condensadores produzidos.

#### **4ª fase – Definição da janela de parâmetros ideal**

Nesta fase após a realização de todos os testes, análise dos dados recolhidos e testes elétricos, segue-se a implementação dos limites para deteção de peças não conformes afim de que não seja mais necessário a realização do teste destrutivo na qual se realiza a inspeção visual da peça.

## 2.4 Estrutura

Por forma a enquadrar o trabalho realizado este relatório é constituído por 5 capítulos principais. No primeiro capítulo são apresentados os objetivos deste desafio, bem como a metodologia usada.

O segundo capítulo virá a apresentar o produto realizado, as suas características, componentes e processos desde o corte dos materiais até ao produto final.

No terceiro capítulo vai ser explicado como funciona a máquina na qual os materiais são enrolados, uma breve explicação dos controlos da máquina, principais dificuldades em operar com a máquina, como foram realizados os testes. Este capítulo vai ainda dar a conhecer o sistema de monitorização que se encontra acoplado na máquina.

No quarto capítulo é explicado ao detalhe como foram realizados os testes de tração, análise das curvas retiradas do sistema de monitorização e realizados os estudos estatísticos para cada tipo de material condutor, também irá ser realizada uma breve análise aos resultados dos testes elétricos.

Por fim, no quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões que foram possíveis de obter com o estudo efetuado, melhorias e algumas ideias e sugestões para trabalhos futuros.

### 3 Produto

Neste capítulo é apresentado o produto [8], vão ser dadas a conhecer algumas informações como a informação da datasheet, aplicações, dimensões, processos de fabricação, entre outros.

#### 3.1 Informação geral

Kemet PEG226 é um condensador eletrolítico com um excelente desempenho elétrico. O dispositivo possui um design totalmente soldado e polarizado, os terminais na forma de fio condutor de mistura cobre-estanho. O seu enrolamento está inserido numa lata cilíndrica de alumínio de alta pureza com uma junta de borracha de alta qualidade. Graças à sua robustez mecânica, o PEG226 é adequado para uso em instalações móveis e aeronáuticas, com operação até +150°C. Este condensador atende ainda aos requisitos de qualificação AEC-Q200 segundo o Automotive Electronics Council.

#### 3.2 Aplicações

O Kemet PEG226 é projetado para aplicações automotivas com demandas extremamente altas.

#### 3.3 Características

Tabela 3.1

Item	Performance Characteristics		
Capacitance Range	250 – 4,700 $\mu$ F		
Rated Voltage	25 – 80 VDC		
Operating Temperature	-40 to +150°C		
Capacitance Tolerance	-10/+30%, ( $\pm$ 20% select values) at 100 Hz/+20°C		
Operational Lifetime	D (mm)	Rated voltage, +125°C (hours)	Rated voltage, +150°C (hours)
	16	6,300	1,500
	18 and 20	8,400	2,000
Shelf Life	5,000 hours at +105°C or 10 years at +40°C 0 VDC		
Leakage Current	$I = 0.003 CV + 4.0 (\mu A)$		
	C = rated capacitance ( $\mu$ F), V = rated voltage (VDC). Voltage applied for 5 minutes at +20°C.		
Vibration Test Specifications	Procedure		Requirements
	1.5 mm displacement amplitude or 20 g maximum acceleration. Vibration applied for three 22-hour sessions at 10 – 2,000 Hz (capacitor clamped by body).		No leakage of electrolyte or other visible damage. Deviations in capacitance from initial measurements must not exceed: $\Delta C/C < 5\%$
Standards	IEC 60384-4 long life grade 40/125/56, AEC-Q200		

### 3.4 Dimensões

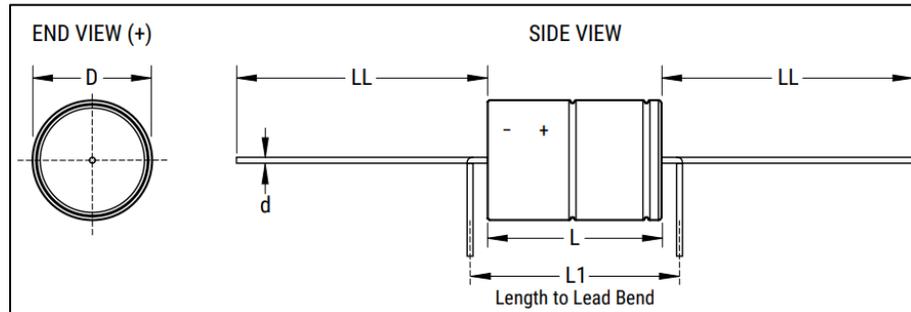


Imagem 3.1

Tabela 3.2

Size Code	Dimensions in mm					Approximate Weight Grams
	D	L	L1	d	LL	
	±0.5	±1	Minimum	±0.03	b ±2 Box	
F	16.2	26.7	33	1.0	40	8
G	16.2	34.7	41	1.0	40	11
M	18.2	26.7	33	1.0	40	11
N	18.2	34.7	41	1.0	40	14
V	18.2	38.7	45	1.0	40	16
H	20.2	26.7	33	1.0	40	13
J	20.2	34.7	41	1.0	40	20
L	20.2	42.7	49	1.0	40	24

Note: L1 is KEMET's recommendation for minimum distance between symmetrical lead bend. Available only for customer specific part numbers. Lead bend dimensions must be specified and confirmed per article.

Na Imagem 3.1 podemos ver o produto com a vista de topo e lateral e na Tabela 3.2 podemos ver as dimensões de todos os Kemet PEG226, no caso deste trabalho o condensador usado tem o *size code* - M.

### 3.5 Fabricação

#### 3.5.1 Corte do material

Antes de ser colocado no equipamento a matéria prima (ânodo, cátodo e papel) necessita ser trabalhada no processo de corte (**slitting**) onde é cortado segundo a especificação de cada produto a ser fabricado.

#### 3.5.2 Bobinagem

O processo de enrolamento inicia-se pela colocação dos rolos de matéria-prima na máquina. Neste processo o ânodo e o cátodo ficam separados pelo material isolante, neste caso papel, e é neste mesmo processo que aos materiais condutores lhes são anexadas as ligas de alumínio para que mais tarde na montagem sejam cravadas aos respetivos terminais.

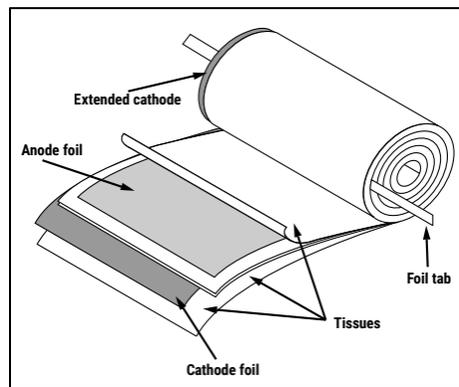


Imagem 3.2

#### 3.5.3 Montagem

No processo de montagem ocorre o cravamento das ligas de alumínio a ambos os terminais, a liga de alumínio cravada no cátodo vai ser cravada por um outro processo de cravamento a frio na lata de alumínio ficando assim o enrolamento em contato com o terminal negativo, a liga de alumínio que se encontra cravada no ânodo vai ser cravada a uma tampa de alumínio que contém o terminal positivo por um processo de cravamento por ultrassons.

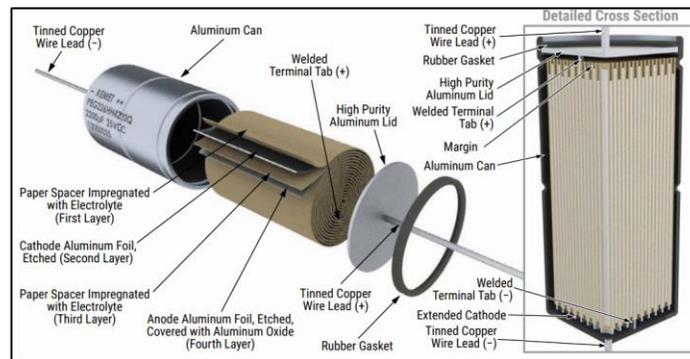


Imagem 3.3

### 3.5.4 Processo de regeneração (Aging)

Após a montagem, cada condensador passa pelo processo de regeneração onde ganha “vida”, neste processo os condensadores são colocados em fornos onde é aplicada, a uma temperatura elevada, uma tensão enquanto se controla cuidadosamente a corrente de alimentação, este processo pode levar entre 2 a 20 horas dependendo do valor da especificação da tensão dos condensadores.

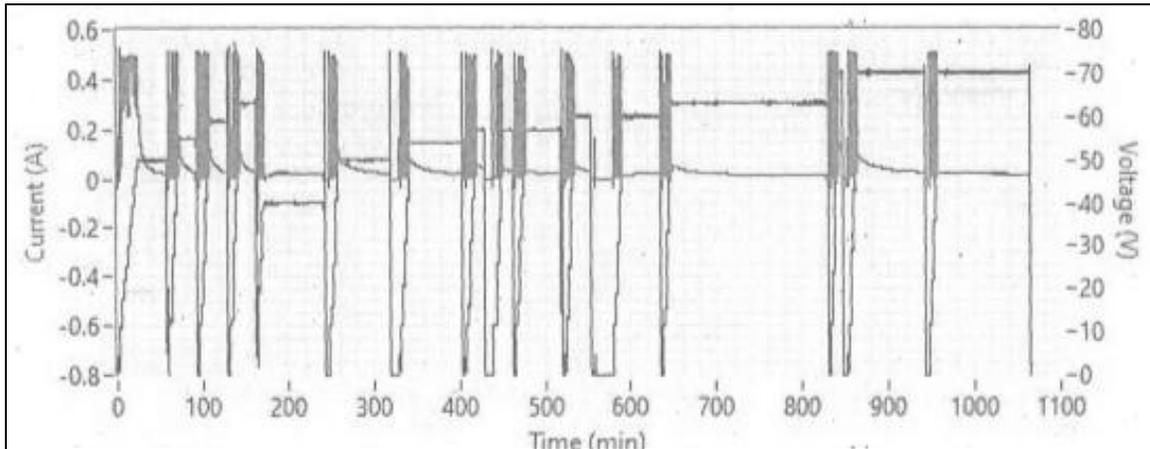


Imagem 3.4

### 3.5.5 Testes elétricos

De seguida os condensadores ao serem retirados dos fornos serão testados eletricamente através dos seguintes testes eletricos:

- Corrente de fuga (LC): Indica o fluxo de corrente anormal num circuito elétrico devido a uma fuga (geralmente um curto-circuito ou um caminho anormal de baixa resistência).

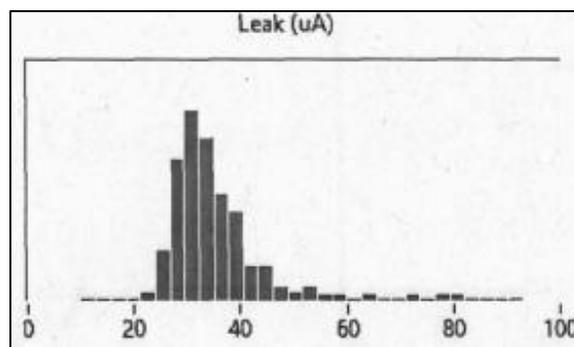


Imagem 3.5

- Capacidade (CAP): Capacidade de armazenamento de eletricidade.

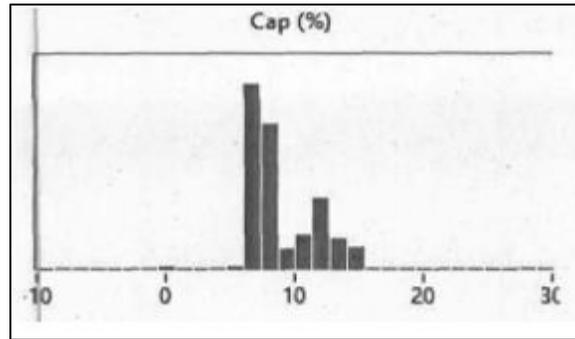


Imagem 3.6

- Resistência equivalente em série (ESR): É o sumatório de todo o tipo de resistência do condensador. Analogia a tubos de água: Se os tubos tiverem ferrugem, calcário, curvas, etc, a resistência para a água passar será muito maior do que um tubo limpo a direito. Ou seja, é o valor que vai impedir a corrente passar pelo condensador.

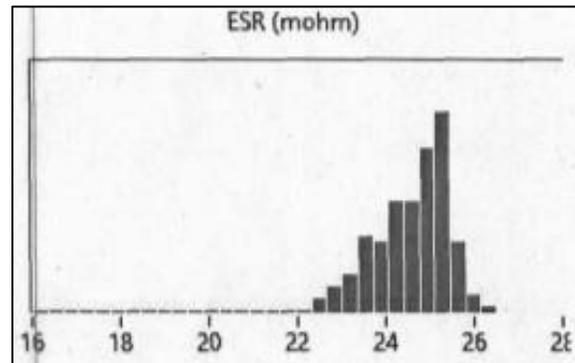


Imagem 3.7

-Tangente (TG): Também chamado de factor de dissipação. É valor, dependendo do material, em absorver energia quando um sinal (tensão) é aplicado. Ou seja, é a percentagem de sinal (tensão) que perde devido ao tipo de material.

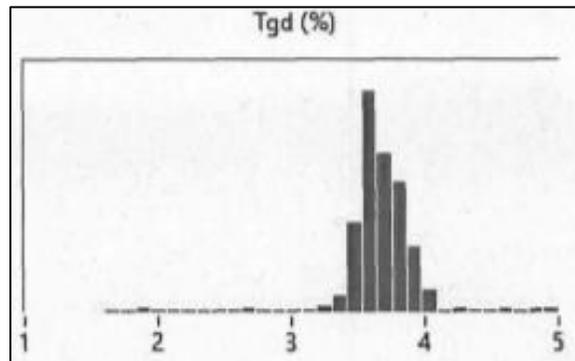


Imagem 3.8

## 4 Máquina de Enrolamento - AVE 0392K

Neste terceiro capítulo vai ser dado a conhecer o equipamento e também o sistema de monitorização.

### 4.1 Equipamento

O equipamento utilizado para a fabricação dos teste, AVE 0392K, é um equipamento especializado para o enrolamento dos materiais que constituem o produto Kemet PEG226, é constituído por sensores de alinhamento de materiais que garantem que os materiais se encontram alinhados desde o desenrolar dos rolos até ao enrolar do materiais, sensores de junções que realizam a deteção das junções que possam vir nos rolos provenientes do processo de corte de material, do fornecedor, ou até mesmo caso os materiais partam durante o processo de enrolamento, sucutando assim as peças que possam ter as junções, o equipamento tem também sensores que detetam o posicionamento das ligas de alumínio nos materiais condutores depois do cravamento e antes do enrolamento dos materiais. Este equipamento tem também toda uma complexidade de conexões pneumáticas, elétricas e mecânicas.



*Imagem 4.1*

## 4.2 Sistema de monitorização (**Kistler**)

O sistema de monitorização [4] que se encontra acoplado na máquina é constituído por dois monitores (um dos monitores para o ânodo e outro monitor para o cátodo) e avalia curvas em X e em Y de duas grandezas que se possam relacionar entres si, neste caso força de cravamento e tempo.

Essas curvas surgem em aplicações como:

- Testes de cravamento (como os realizados nestes estudo)
- Prensa de materiais
- Testes de torque
- Processos de dobra de materiais
- Ajuste de pressão de componentes como rolamentos, pinos, tampas...



Imagem 4.2

O **maXYmo BL** pode ser usado para registrar, monitorar e exibir a inter-relação de basicamente quaisquer mensurandos que podem ser medidos com sensores piezoelétricos, extensômetros e potenciométricos.

### 4.2.1 Hardware

- Capa para mesa/parede para uma versão de painel frontal e versão de mesa/parede e kit de montagem
- Fonte de alimentação 90 - 264 VAC / 24 VDC 5781B5 50-60 Hz, máx. 90 W (3,75A), , cabo configurável para cada região
- Conjunto de conectores, versão extensômetro, dig. IO e alimentação (1 conjunto nos acessórios incluídos)
- Conjunto de conectores, versão piezoelétrica para sensores, dig. IO e alimentação (1 conjunto nos acessórios incluídos)

- Cabo adaptador para conectar através de sensor de deslocamento, potenciométrico ou sensor de ângulo a vários maXYmos

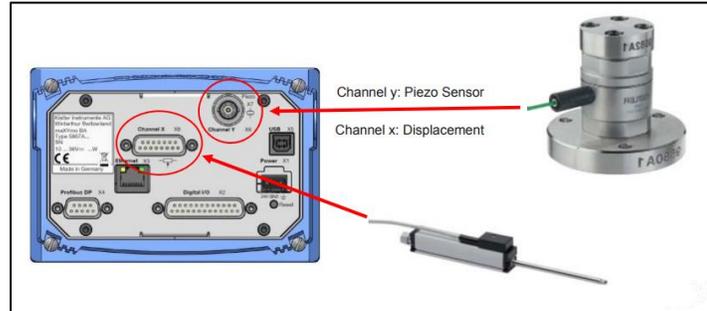


Imagem 4.3

#### 4.2.2 Dimensões

Versão de painel frontal acoplado na máquina de bobinagem

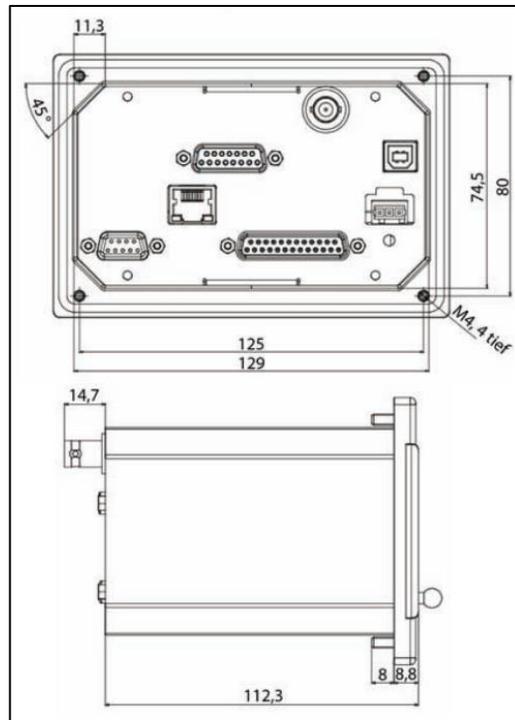


Imagem 4.4

### 4.2.3 Softwares

Relativamente ao uso dos softwares não foram registadas dificuldades durante o processo, quer no software do sistema de monitorização **maXYmos BL** quer no software **maXYmos PC**.

#### 4.2.3.1 MaXYmos BL

O software **maXYmos BL** é o software incorporado nos sistemas de monitorização **kistler**, é neste software que os valores das janelas para parametrização das curvas são alterados, fornece também várias informações como o resultado da avaliação da curva em tempo real, um contador das curvas OK e NOK entre outras informações como demonstrado nas imagens 4.5 e 4.6.

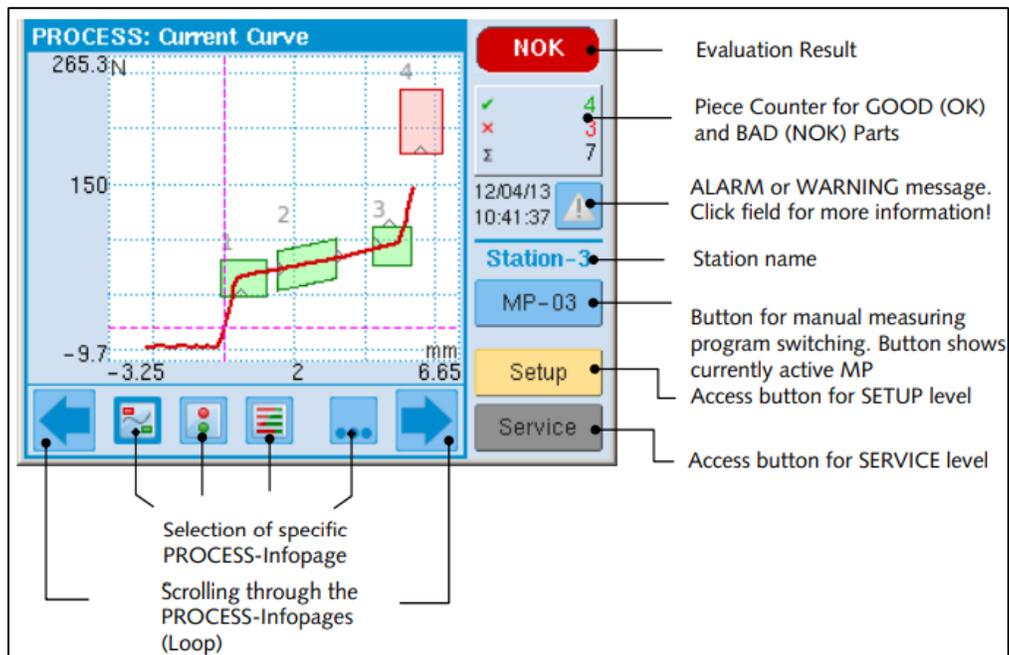


Imagem 4.5

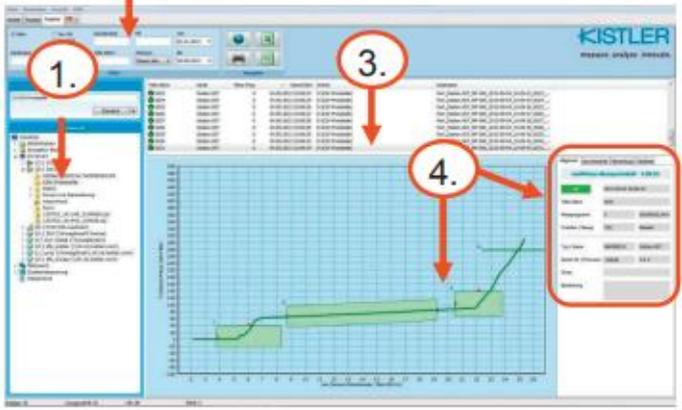


#### 4.2.3.2 MaXYmos PC

O software *maXYmos PC* [5] permite a transferência direta do registro de testes para o computador e oferece muitas funções para visualização, medição e análise de curvas de medição e valores de processo, bem como para avaliação da capacidade do processo.

**Procedure**

1. Select the export folder (source folder).
2. If necessary, activate the filter function ("Activ" checkbox) and apply the specific filter.
3. The log files are listed. Select the log file you would like to be displayed.
4. The curve graph as well as the curve and process values are displayed.



Display curve and I/O-related process values and results.

Algemein	Kurvenwerte	Bewertung	Analyse
<b>maXYmos Messprotokoll - 2.00.01</b>			
19	2013-09-04 10:00:54		
Teil-Ident	0031		
Messprogramm	0	55059928_Nr.k	
Funktion / Bezug	Y(Y)	Absolut	
Typ / Name	5867600.10	Station.007	
Serial-Nr. / Firmware	134638	2.0.3	
Firma			
Bemerkung			

Algemein	Kurvenwerte	Bewertung	Analyse
Block X / Y	25.3 mm	200 N	
Spitze-Spitze X / Y	23.2 mm	200 N	
Referenzwert X / Y	2.1 mm		
XMin X / Y	2.1 mm	0 N	
XMax X / Y	25.3 mm	200 N	
YMin X / Y	2.1 mm	0 N	
YMax X / Y	25.3 mm	200 N	

Algemein	Kurvenwerte	Bewertung	Analyse
<b>EO-1</b>			
Ein- / Austritt	0 N	6.3 mm	
XMin (X / Y)			
XMax (X / Y)	6.5 mm	55 N	
YMin (X / Y)	-4.2 mm	0 N	
YMax (X / Y)			
Typ / Referenz	Unibox	Absolut	
XMin / XMax	3.8 mm	8.3 mm	
YMin / YMax	-23 N	26 N	
Ein- / Austritt	links	Oben	
Catchzone X / Y	50.0 %	50.0 %	

Imagem 4.7

## 5 Testes realizados

### 5.1 Definição dos testes

Numa primeira abordagem na parte mais prática deste projeto foram definidos os valores do cravamento das ligas de alumínio do ânodo e do cátodo juntamente com o engenheiro de processo /manutenção responsável pela linha de produção do produto Kemet PEG226.

Embora não tivesse existido nenhuns estudos, desta dimensão, realizados anteriormente os kistlers já se encontravam com janelas parametrizadas para os valores máximos e mínimos do cravamento, estas janelas de valores foram colocadas através do critério visual de alguns testes feitos anteriormente nesta máquina e na qual se verificou que o desempenho elétrico do produto era satisfatório.

Após uma breve análise das janelas já existentes verificou-se em 1000 curvas para cada material, ou seja, 500 enrolamentos que a máquina realizou os valores registados pelo programa.

Para o ânodo, das 1000 curvas guardadas foram retiradas as seguintes informações:

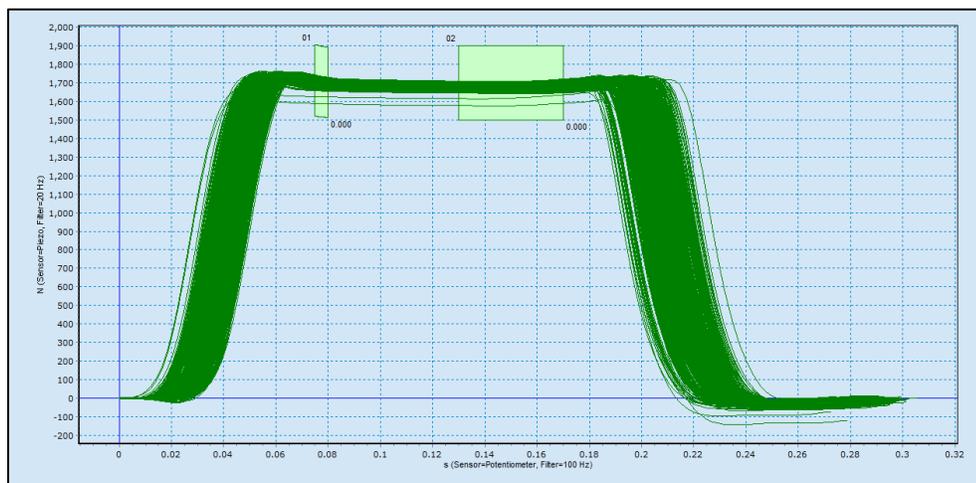


Imagem 5.1

Envelope:

Entrada		Saida	
Valor mais alto	1,793.614	Valor mais alto	1,727.960
Valor mais baixo	1,587.229	Valor mais baixo	1,585.361
Diferença	206.39	Diferença	142.60

Uniboxe:

Entrada		Saida	
Valor mais alto	1,718.615	Valor mais alto	1,719.567
Valor mais baixo	1,576.179	Valor mais baixo	1,575.602
Diferença	142.44	Diferença	143.97

Para o cátodo, das 1000 curvas guardadas foram retiradas as seguintes informações:

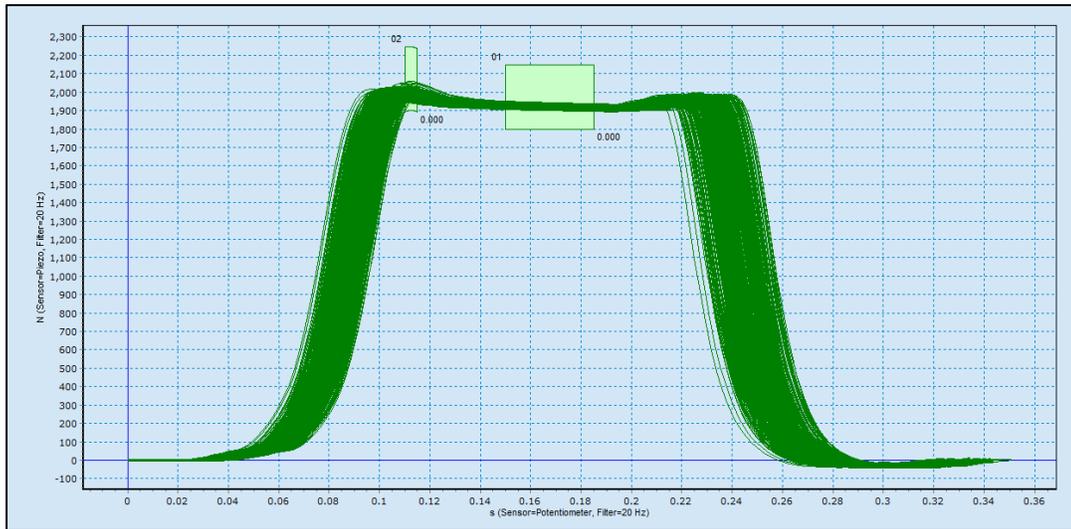


Imagem 5.2

Envelope:

Uniboxe:

Entrada		Saída	
Valor mais alto	2.184.156	Valor mais alto	2.058.300
Valor mais baixo	1.895.031	Valor mais baixo	1.927.209
Diferença	289.13	Diferença	131.09

Entrada		Saída	
Valor mais alto	2.028.845	Valor mais alto	1.963.415
Valor mais baixo	1.904.960	Valor mais baixo	1.894.288
Diferença	123.89	Diferença	69.13

Foram então definidos os seguintes testes a serem realizados:

Tabela 5.1

	Ânodo	Cátodo
Valores de cravamento baixos	F=1400 [N/m <sup>2</sup> ]	F=1900 [N/m <sup>2</sup> ]
	F=1500 [N/m <sup>2</sup> ]	F=2000 [N/m <sup>2</sup> ]
	F=1600 [N/m <sup>2</sup> ]	F=2100 [N/m <sup>2</sup> ]
Valores de cravamento elevados	F=1900 [N/m <sup>2</sup> ]	F=2300 [N/m <sup>2</sup> ]
	F=2000 [N/m <sup>2</sup> ]	F=2400 [N/m <sup>2</sup> ]
	F=2100 [N/m <sup>2</sup> ]	F=2500 [N/m <sup>2</sup> ]

Os testes realizados foram definidos em dois tipos de testes, testes cujo valor de cravamento se encontrava abaixo do valor estabelecido como nominal e testes cujo o valor se encontrava acima do valor nominal. O critério para a escolha destes valores foi o de simular situações críticas, no caso dos extremos dos valores da Tabela 5.1.1 e progressivamente, com uma diferença/passos de 100 N/m<sup>2</sup> aproximar-se dos valores definidos como nominais resultando assim em um total de 6 pares de situações onde cada par produzido tinha uma amostra de 30 peças.

No total foram registados e analisados 720 cravamentos aos quais foram realizados os testes de tração.

### 5.1.1 Testes de tração

Segundo Garcia, Spim e Santos (2008), os testes dos materiais classificam-se de duas maneiras, através da velocidade da aplicação de carga durante os ensaios ou quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente. Os autores ainda declaram que a principal finalidade dos testes são: controlar se o produto se encontra dentro dos padrões e obter novas informações sobre materiais. Os testes de tração, consistem em aplicação de uma carga que vai sendo elevada de forma contínua e crescente até o momento em que ocorre a ruptura do corpo de prova. São bastante utilizadas na indústria mecânica, uma vez que fornece as características dos materiais, como limites de resistência a tração, limites de escoamento, módulo de elasticidade, entre outros [1]

Os testes realizados consistiam na colocação da liga de alumínio presa a uma garra que estava conectada pela outra extremidade a um dinamometro, e com o material pressionado por um pisador.



*Imagem 5.3*

Há medida que a pinça se deslocava na vertical e até que a liga de alumínio se soltava completamente do material o valor do teste de tração era registado no dinamometro era apontado num ficheiro excel para se proceder mais tarde a análise dos dados.

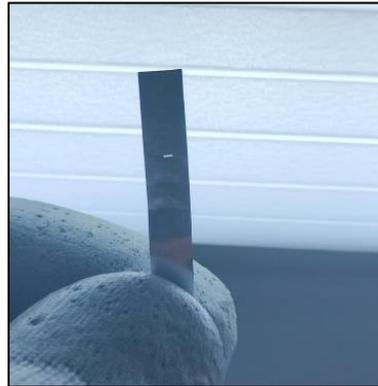


*Imagem 5.4*

Este valor de tração do estado da liga de alumínio e dos materiais foi registado numa folha excel, para que posteriormente fosse realizada a análise de quais os testes com os melhores valores



*Imagem 5.5*



*Imagem 5.6*

## 5.2 Análise dos testes do cátodo

### 5.2.1 Análise dos testes do catodo – 1900 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 1900 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

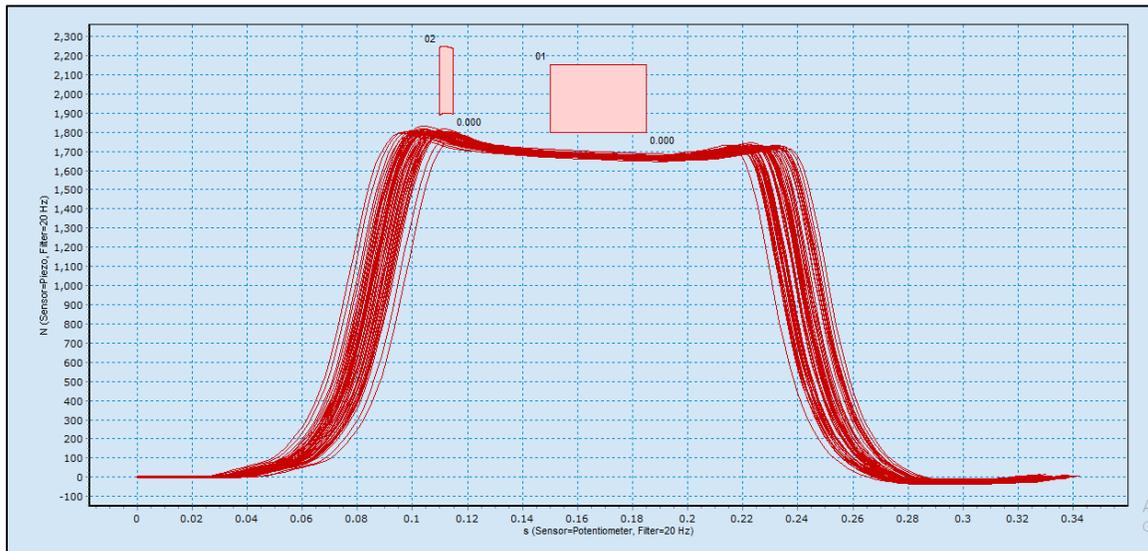


Imagem 5.7

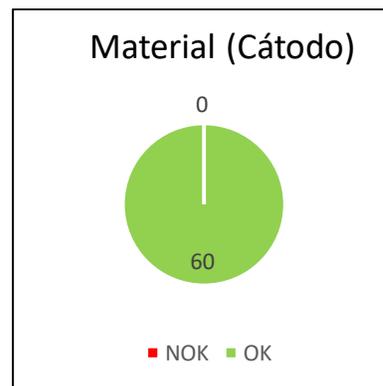
As curvas da imagem 4.3.1 estão vermelhas uma vez que não passam nas janelas definidas, o que quer dizer que o programa avaliou todas as curvas como curvas que não se encontram em conformidade (Curvas NOK).

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.1



Gráfico 5.2.2



Da análise visual das ligas de alumínio e do material não foi registada nenhuma liga danificada pelos punções de cravamento nem material rasgado pelo cravamento.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.3

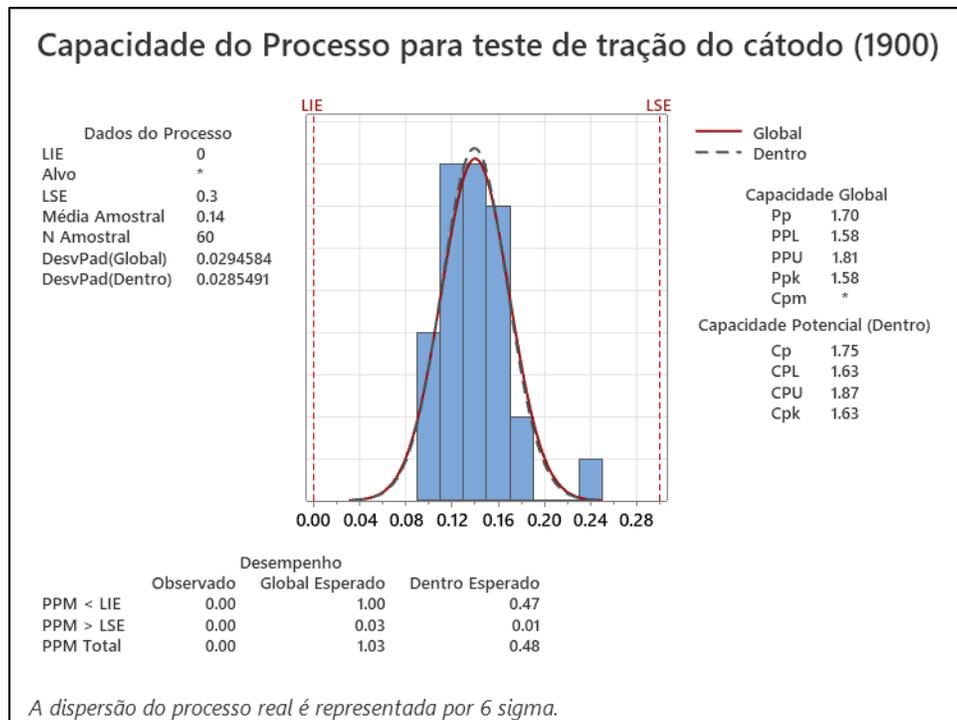
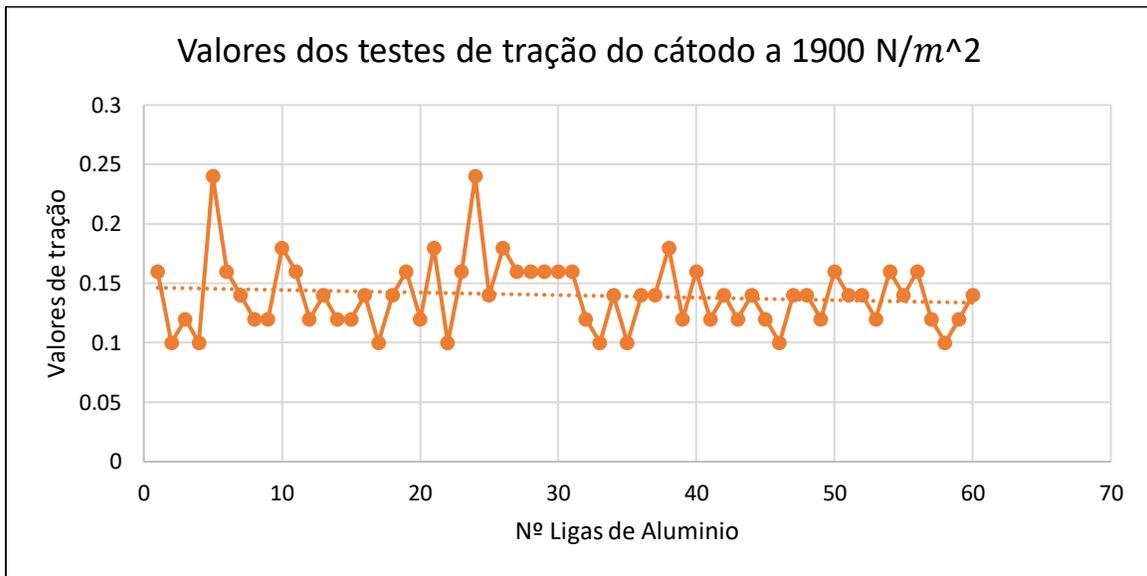


Imagem 5.8

Na indústria, a meta de Cpk para um processo é normalmente fixada em 1,67 [2], com um Cpk de 1,63. é considerado um muito bom indicador da capacidade do processo uma vez que as amostras seguem uma distribuição normal e encontram-se dentro dos limites.

### 5.2.2 Análise dos testes do cátodo – 2000 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2000 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

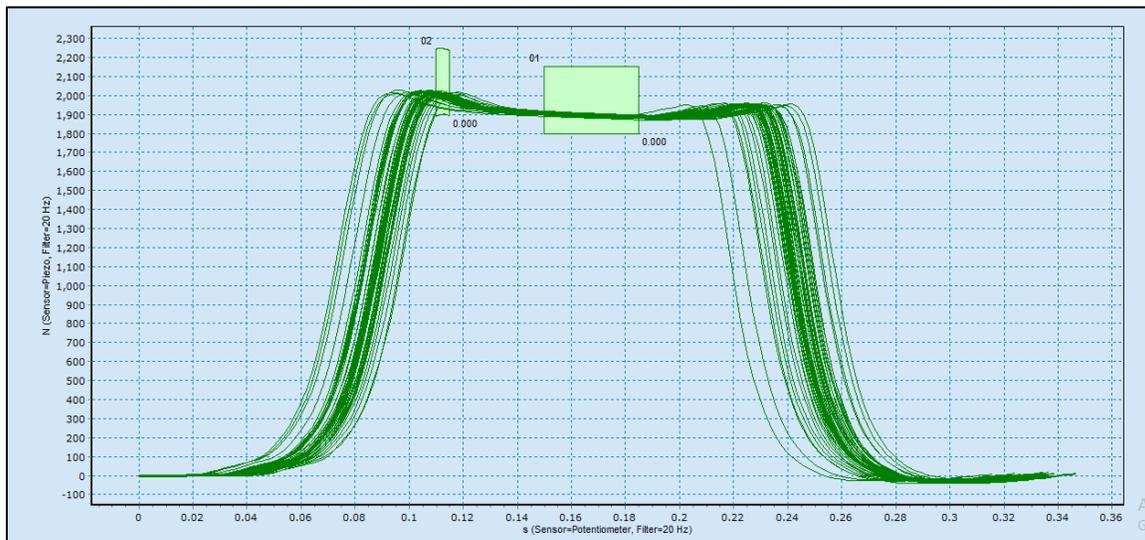


Imagem 5.9

As curvas da imagem 4.3.2.1 estão verdes uma vez que passam nas janelas definidas, o que quer dizer que o programa avaliou todas as curvas como curvas que se encontram em conformidade (Curvas OK).

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.4

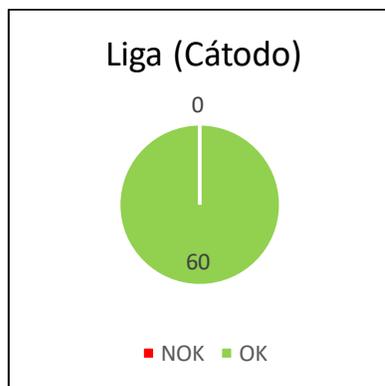
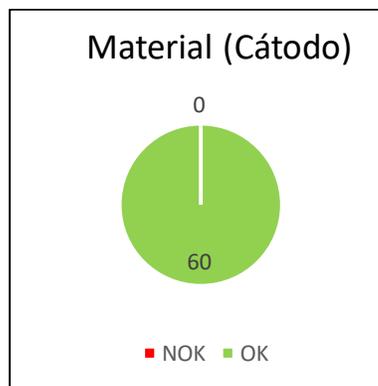


Gráfico 5.2.5



Da análise visual das ligas de alumínio e do material não foi registada nenhuma liga danificada pelos punções de cravamento nem material rasgado pelo cravamento.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.6

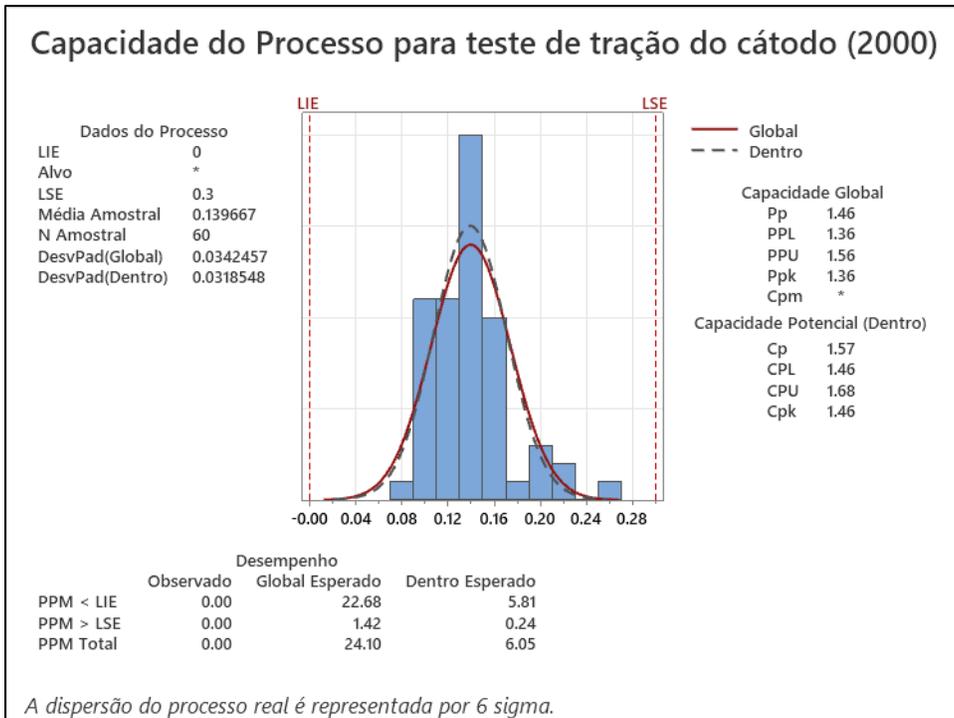
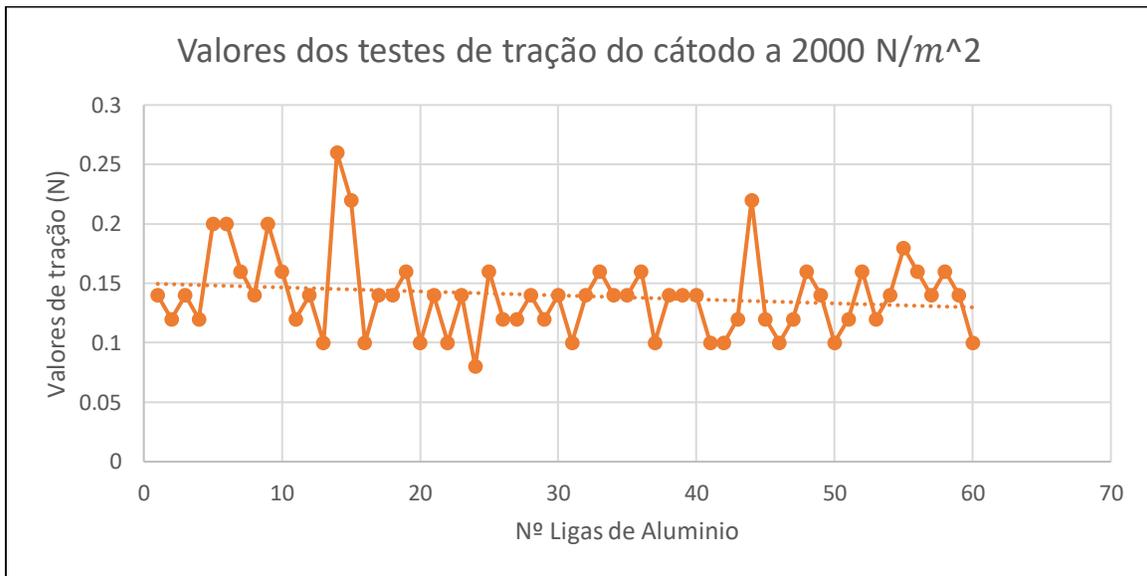


Imagem 5.10

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 2000 N/m<sup>2</sup> é de 1.46 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação embora não se encontre perto dos 1.67 enquadra-se uma vez que está acima de 1.33, os valores seguem uma distribuição normal e encontram-se dentro dos limites

### 5.2.3 Análise dos testes do catodo – 2100 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de aluminio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2100 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

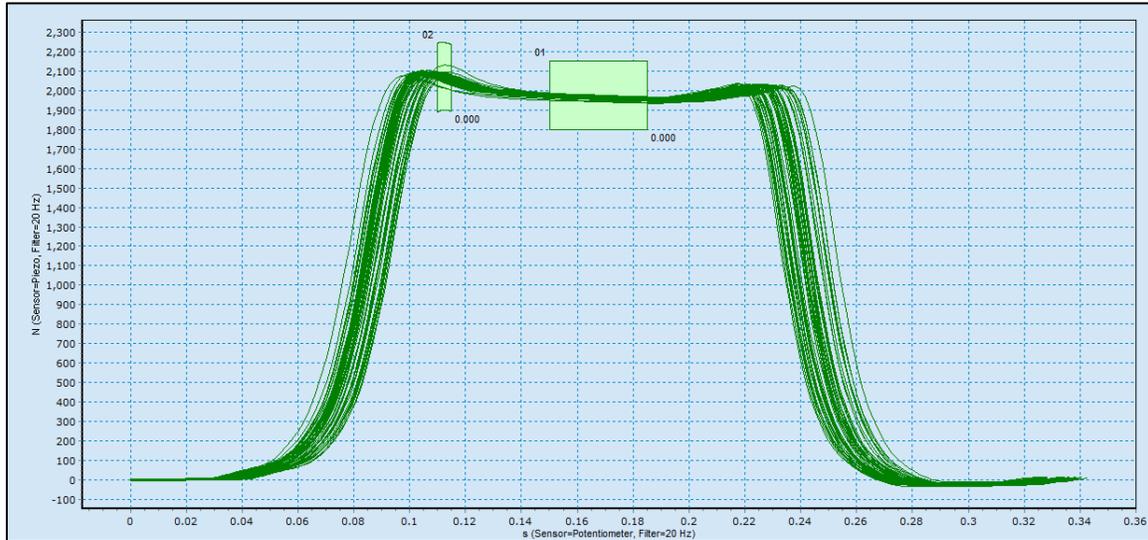


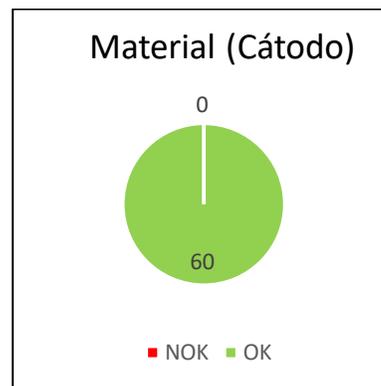
Imagem 5.11

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.7



Gráfico 5.2.8



Da análise visual das ligas de aluminio e do material nao foi registada nenhuma liga danificada pelos punções de cravamento nem material rasgado pelo cravamento.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.9

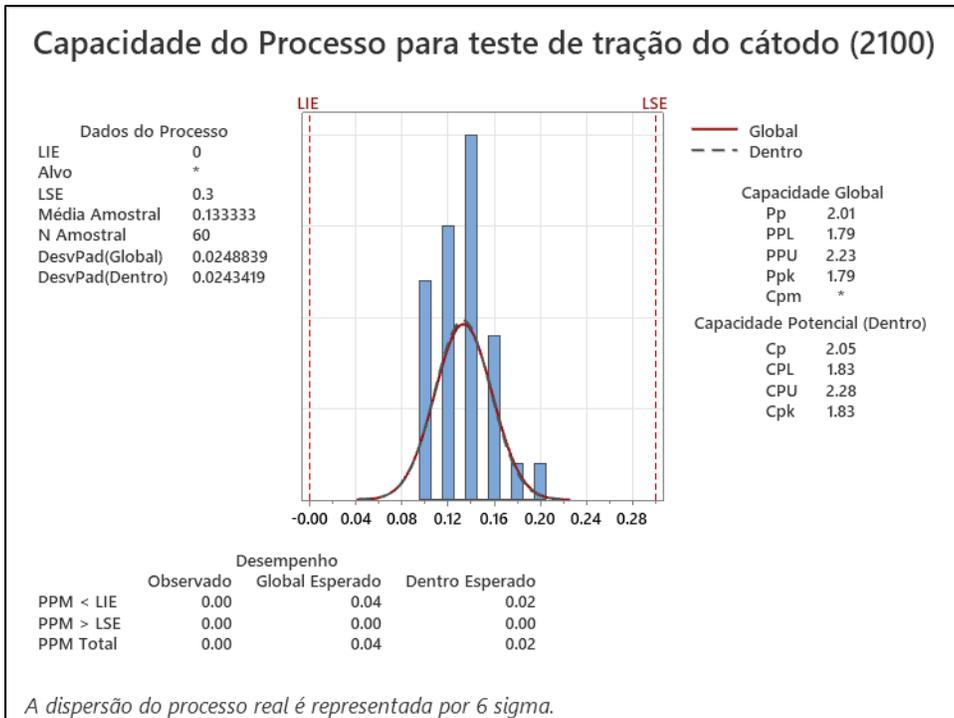
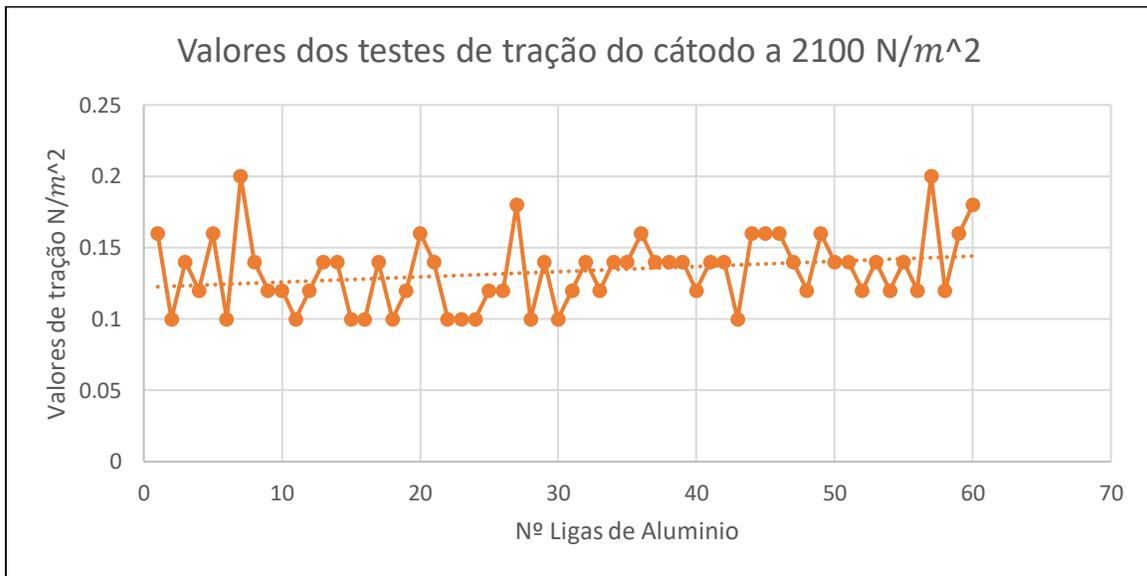


Imagem 5.12

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 2100 N/m<sup>2</sup> é de 1.83 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação, os valores seguem uma distribuição normal e encontram-se dentro dos limites.

#### 5.2.4 Análise dos testes do cátodo – 2300 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2300 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

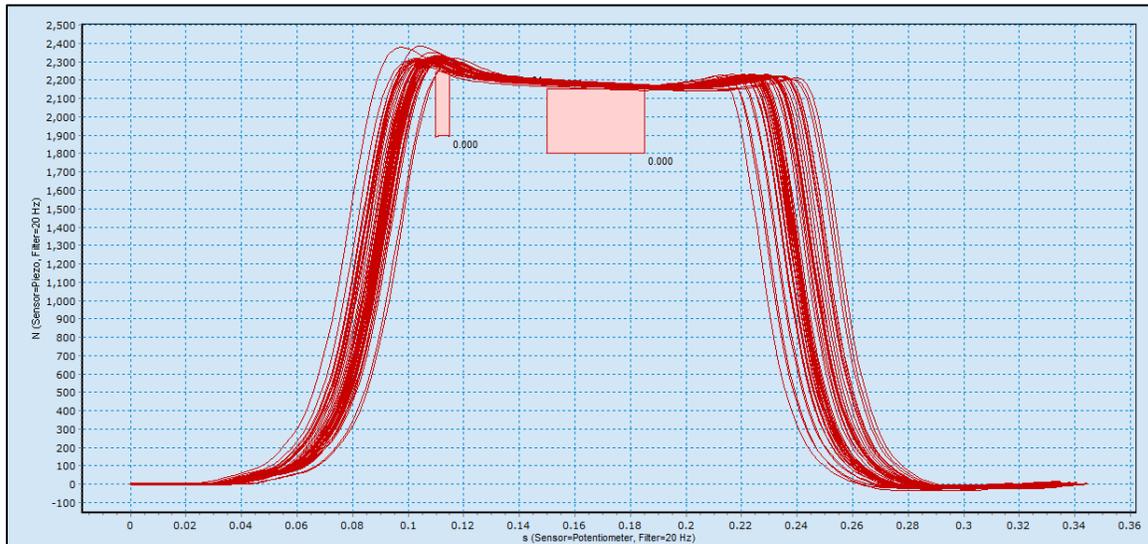


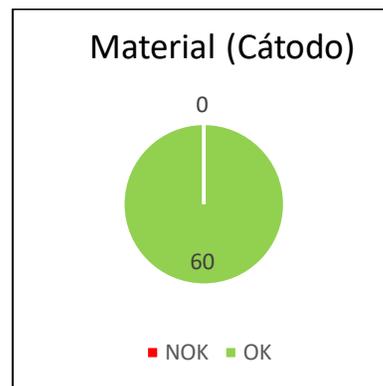
Imagem 5.13

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.10



Gráfico 5.2.11



Da análise visual das ligas de alumínio e do material não foi registada nenhuma liga danificada pelos punções de cravamento nem material rasgado pelo cravamento.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.12

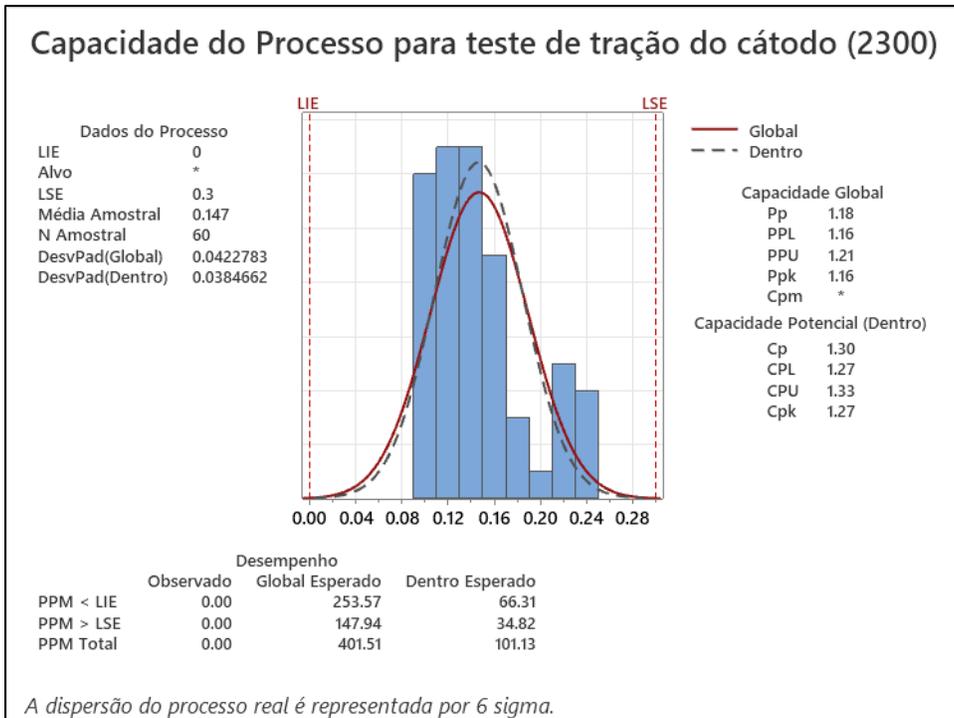
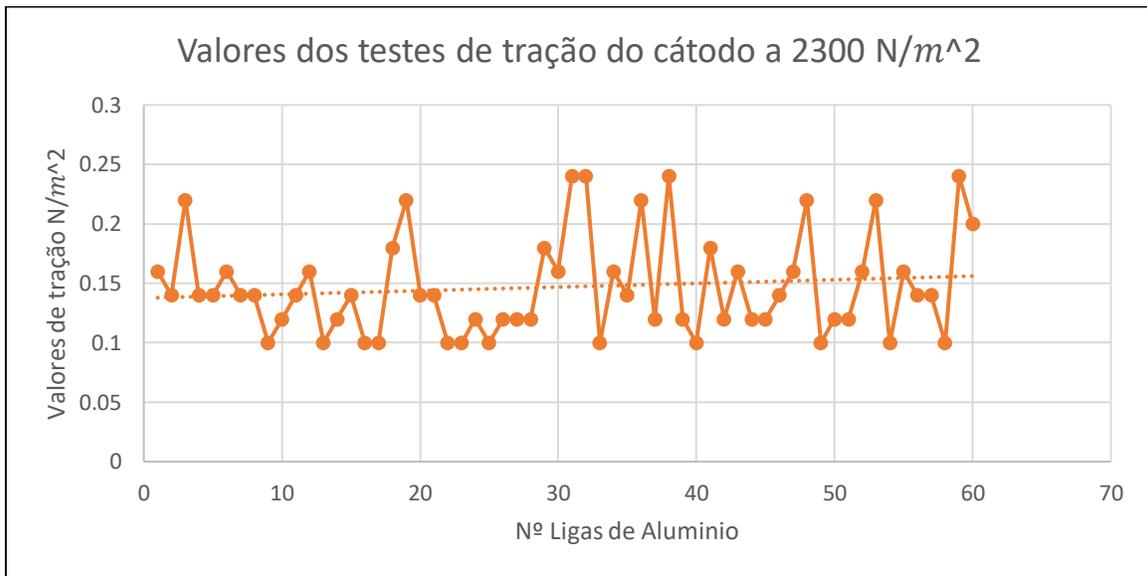


Imagem 5.14

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 2300 N/m<sup>2</sup> é de 1.27 o processo considera-se dentro de especificação embora esteja abaixo de 1.33, os valores nao seguem uma distribuição normal mas encontram-se dentro dos limites.

### 5.2.5 Análise dos testes do cátodo – 2400 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2400 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

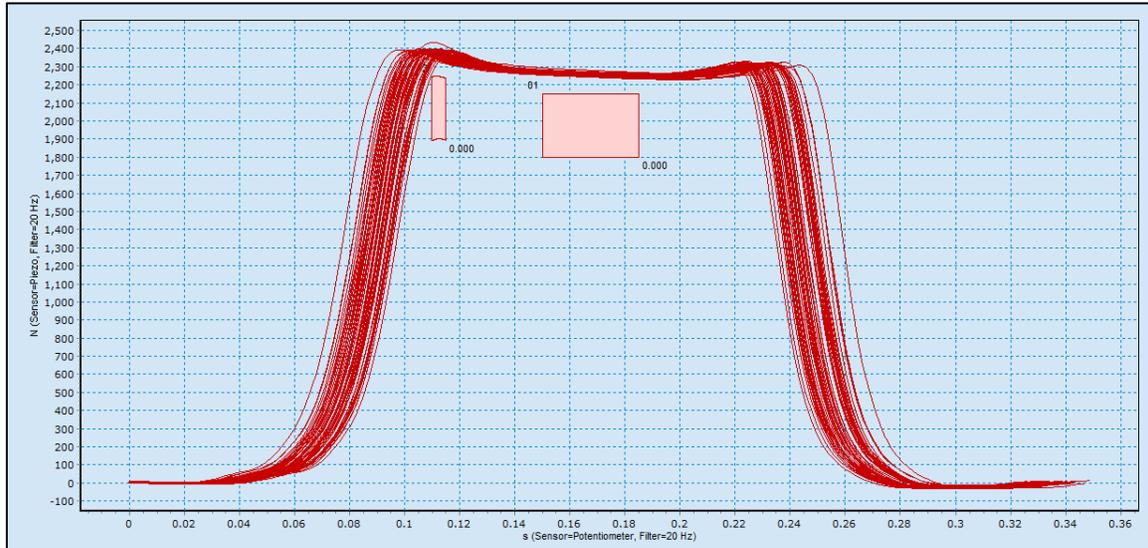


Imagem 5.15

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.13

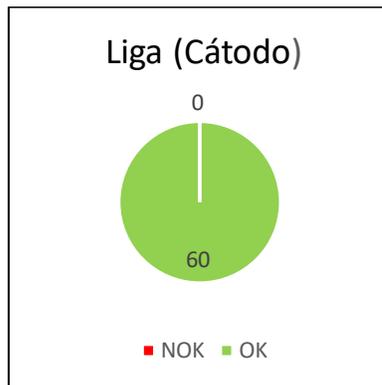
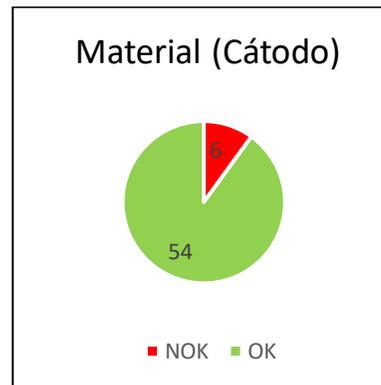


Gráfico 5.2.14



Nesta análise visual foram registados 6 rasgos no cátodo ao realizar os testes de tração, relativamente as ligas nenhuma liga apresentava perfurações.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.15

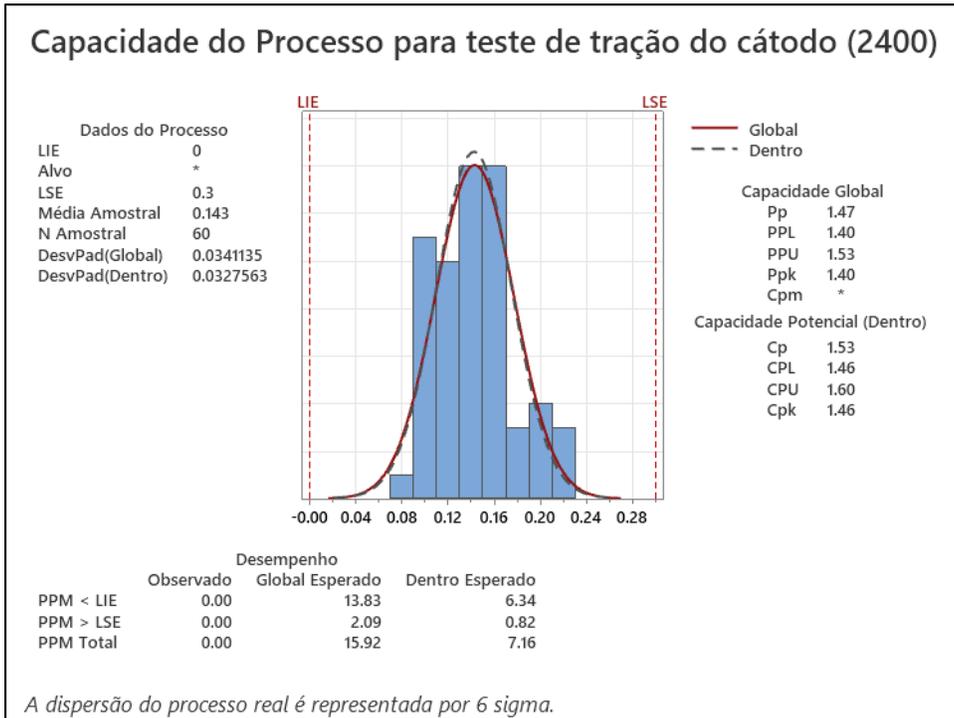
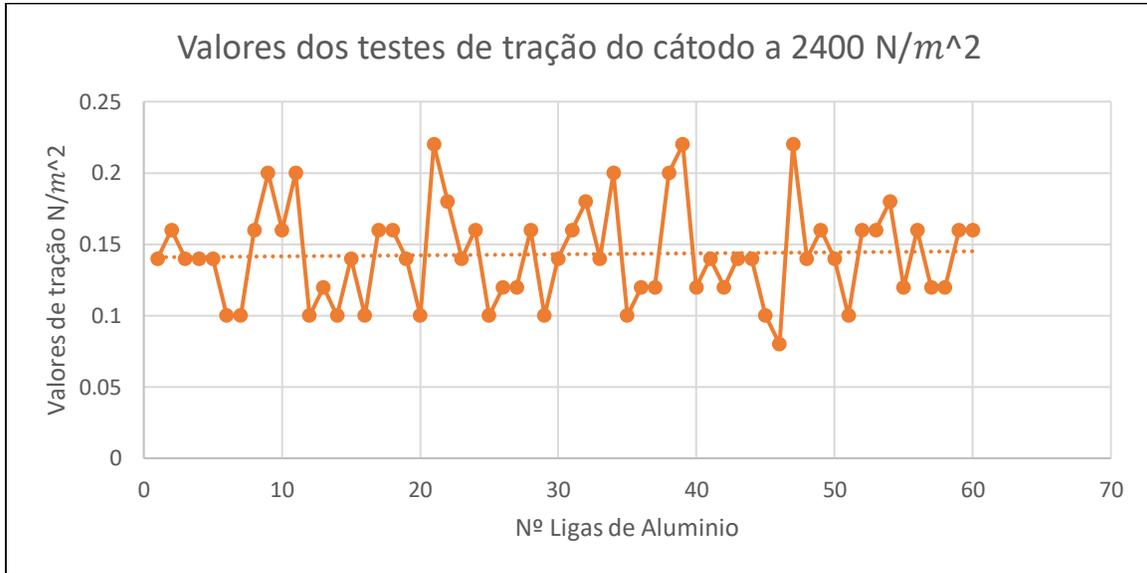


Imagem 5.16

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 2000 N/m<sup>2</sup> é de 1.46 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação, embora não se

encontre perto dos 1.67, enquadra-se uma vez que está acima de 1.33, os valores seguem uma distribuição normal e encontram-se dentro dos limites

### 5.2.6 Análise dos testes do cátodo – 2500 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2500 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

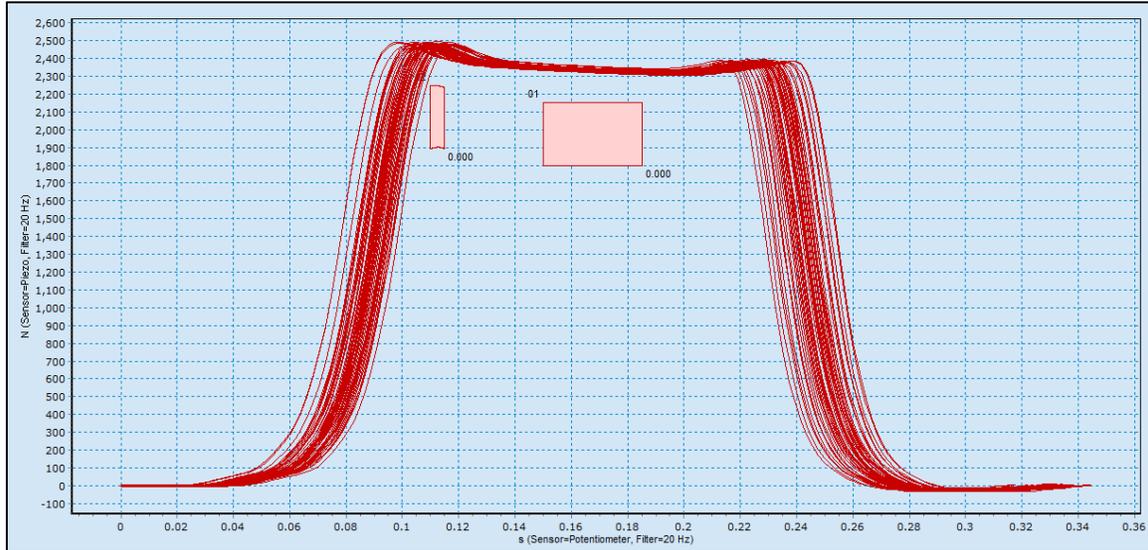


Imagem 5.17

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.2.16

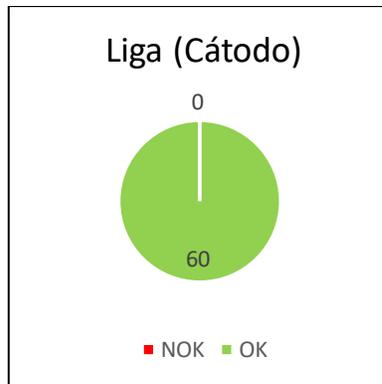
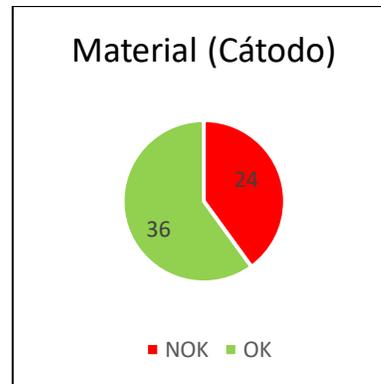


Gráfico 5.2.17



Nesta análise visual foram registados 24 rasgos no cátodo ao realizar os testes de tração, relativamente as ligas nenhuma liga apresentava perfurações.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.2.18

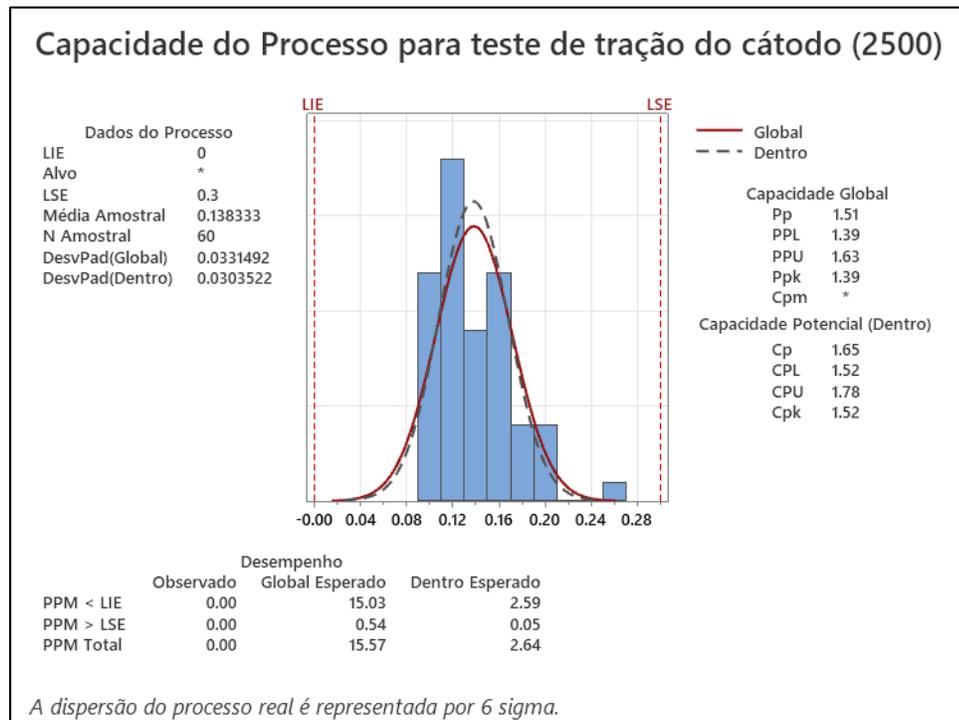
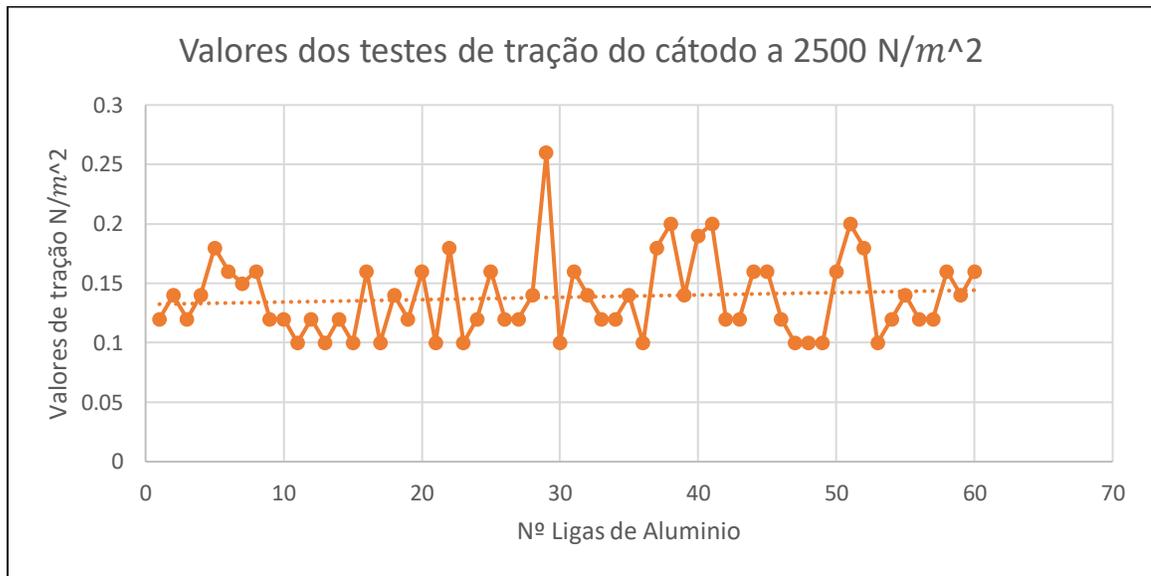


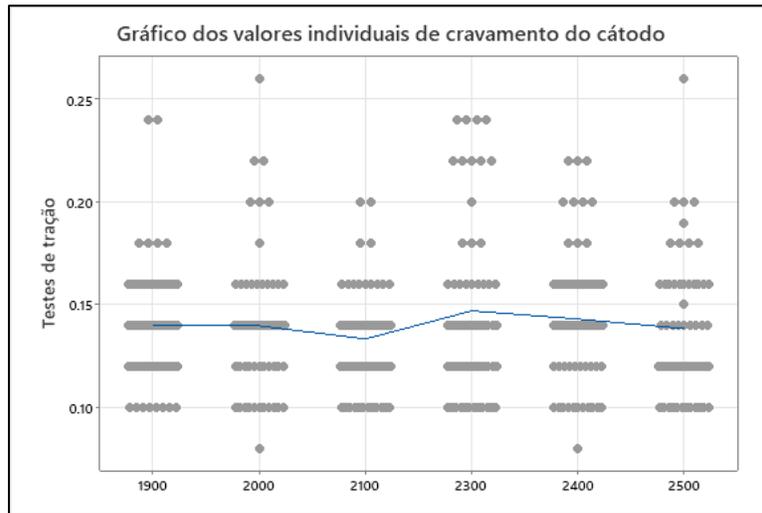
Imagem 5.18

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 2400 N/m<sup>2</sup> é de 1.52 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação, uma vez que está acima de 1.33, os valores seguem uma distribuição normal e encontram-se dentro dos limites

### 5.2.7 Análise completa dos testes do cátodo

Dos testes de tração realizados no cátodo foi possível chegar a conclusão que, a partir do gráfico 5.2.7.1, independentemente do valor do cravamento, os valores dos testes de tração não variavam e encontram-se sempre por volta dos 0.14 N.

Gráfico 5.2.19



O facto dos valores dos testes de tração se manterem sempre por volta dos 0.14 N pode ser explicado pela natureza do material que constitui o cátodo (que é bastante semelhante a de uma folha de alumínio) é um material dúctil e frágil que não apresenta características para gerar mais resistência ao teste de tração ficando então este valor a rondar, em média os 0.14N.

Relativamente a análise visual verificou-se visualmente, que a partir de valores de cravamento acima dos 2400N/m<sup>2</sup> inclusive, o material começou a apresentar alguns defeitos após o teste de tração, tal como material a rasgar a medida que o teste de tração decorria (Imagem 5.2.7.2)

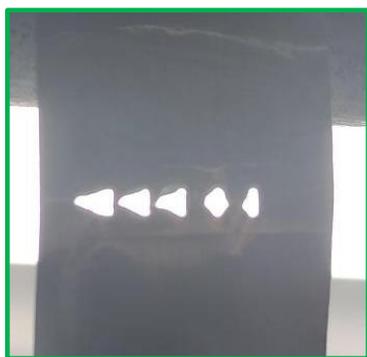


Imagem 5.19



Imagem 5.20

### 5.3 Análise dos testes do ânodo

#### 5.3.1 Análise dos testes do ânodo – 1400 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 1400 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

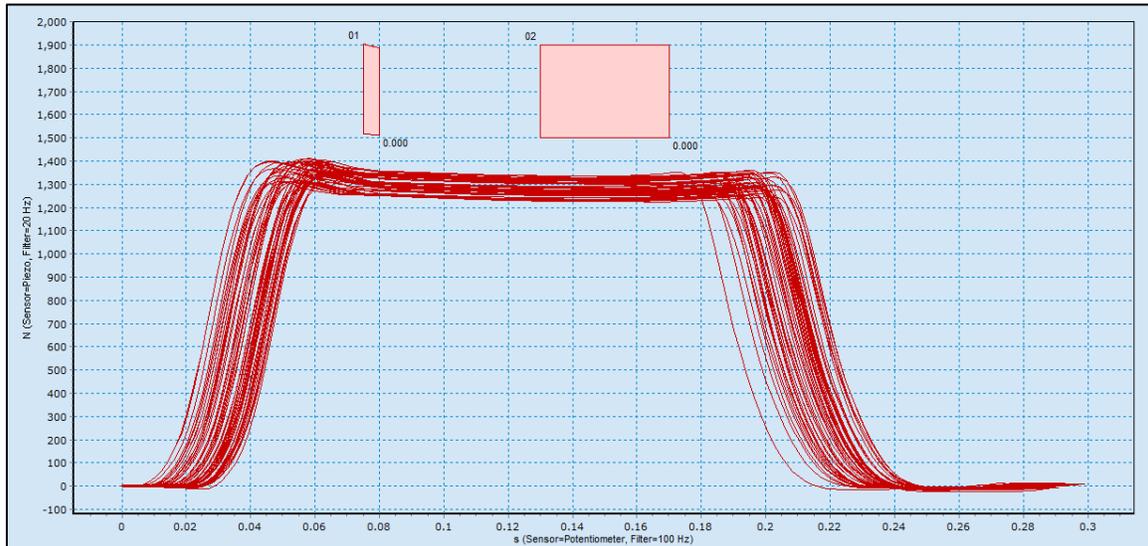


Imagem 5.21

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.1

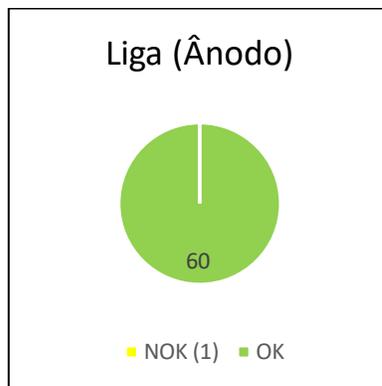
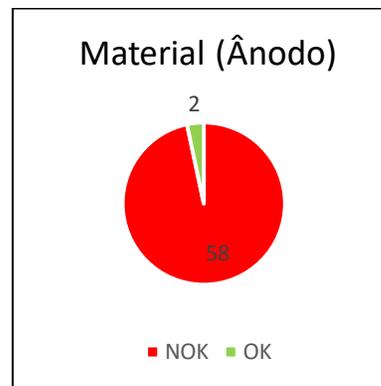


Gráfico 5.3.2



Nesta análise visual foi verificado que a maioria do material não apresentava o cravamento em conformidade devido a baixa força de cravamento.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.3

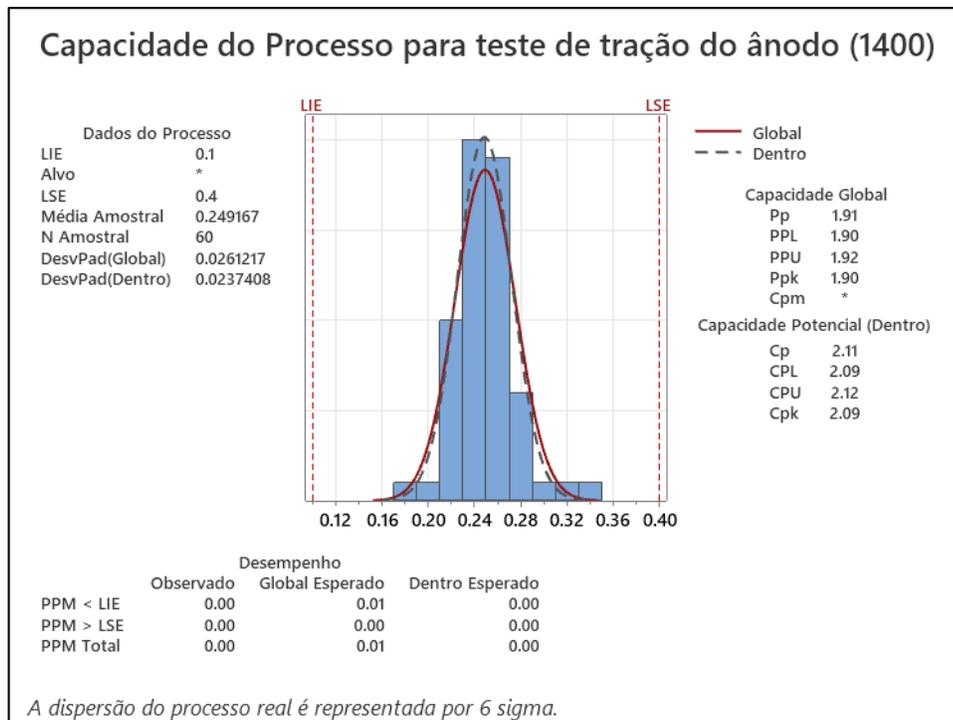
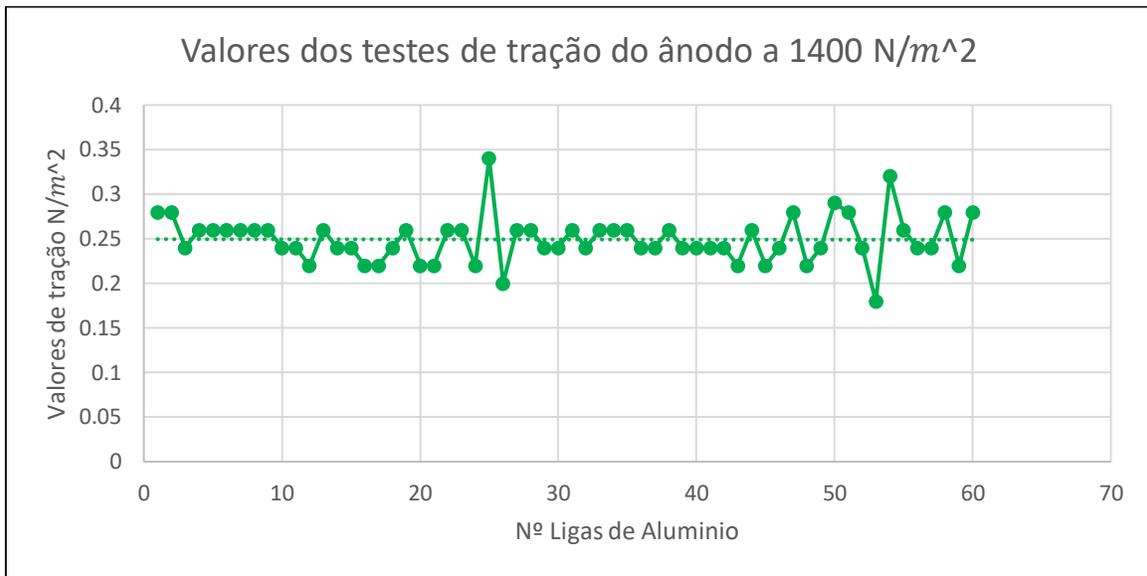


Imagem 5.22

O Cpk retirado para os testes de tração do ânodo com uma força de cravamento de 1400 N/m<sup>2</sup> é de 2.09 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação.

### 5.3.2 Análise dos testes do ânodo – 1500 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 1500 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

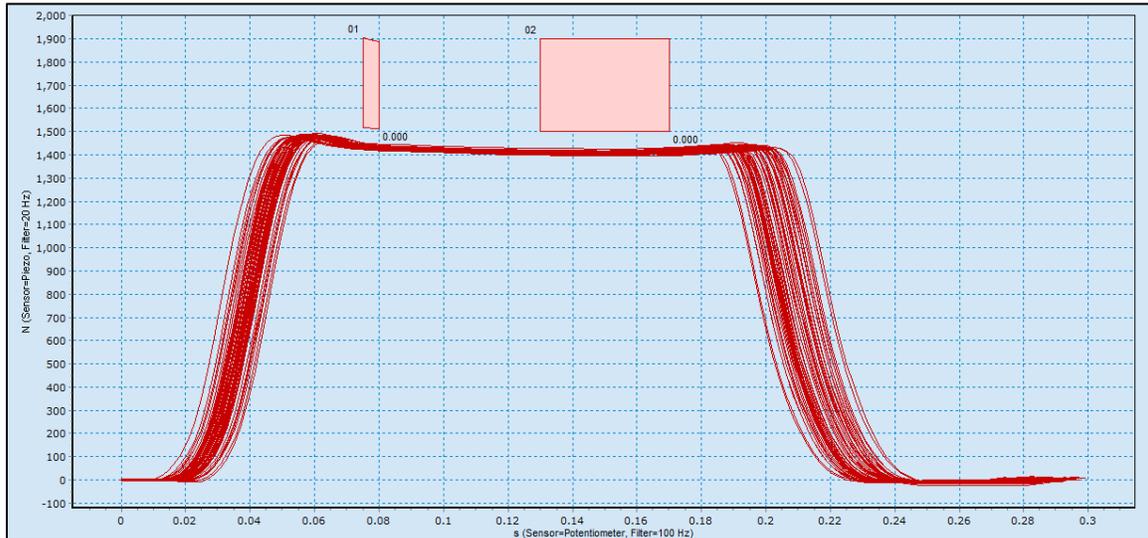


Imagem 5.23

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.4

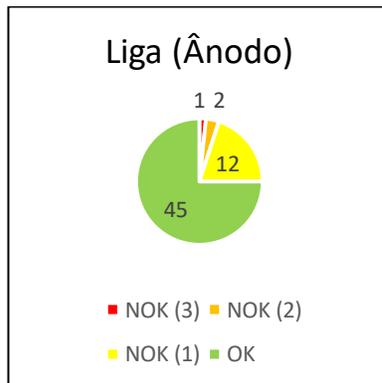
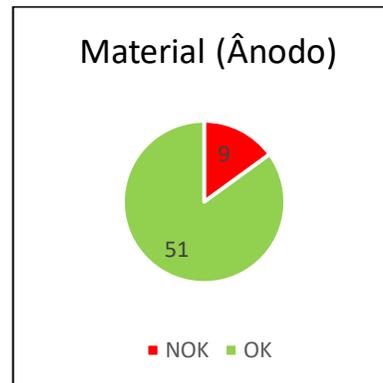


Gráfico 5.3.5



Nesta análise visual o cravamento no material melhorou significativamente fase ao teste anterior embora ainda tenham sido identificados alguns cravamento deficientes, foram também registadas algumas ligas perfuradas pelos punções.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.6

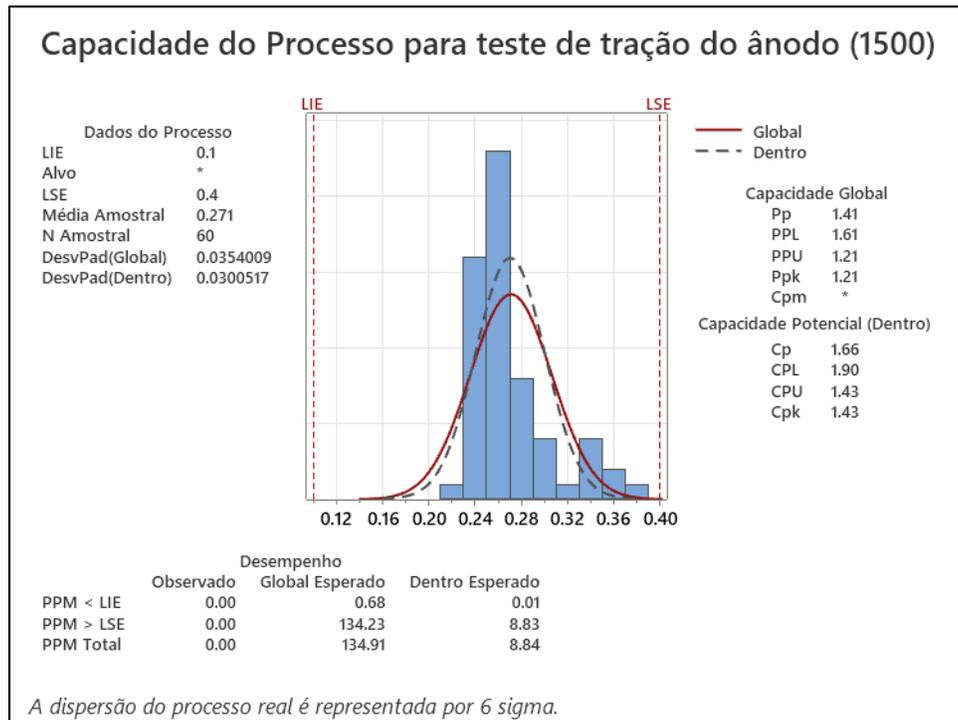
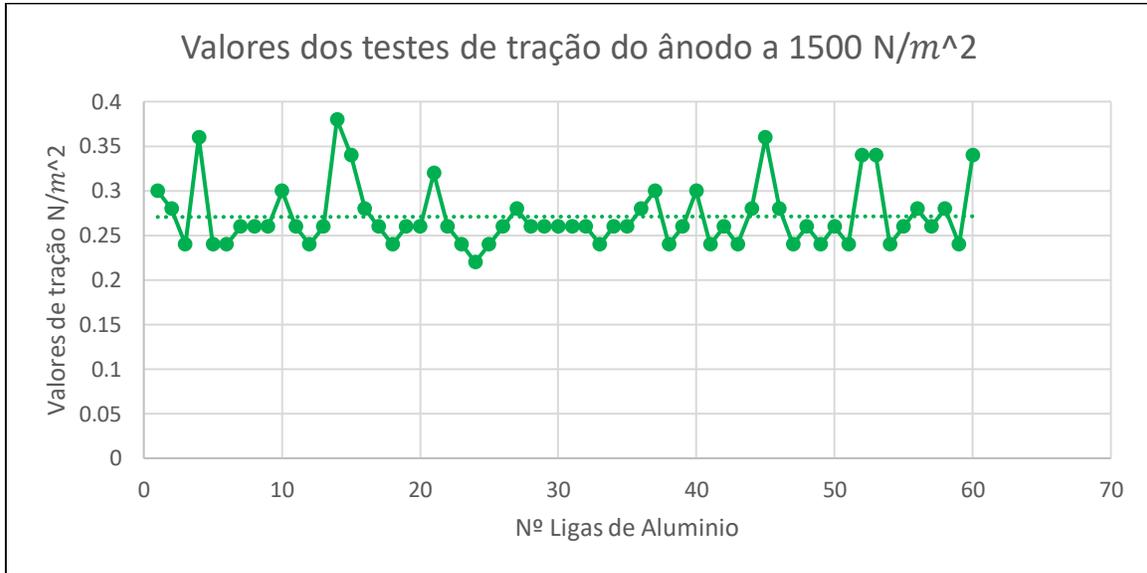


Imagem 5.24

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 1500 N/m<sup>2</sup> é de 2.09 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação.

### 5.3.3 Análise dos testes do ânodo – 1600 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 1600 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

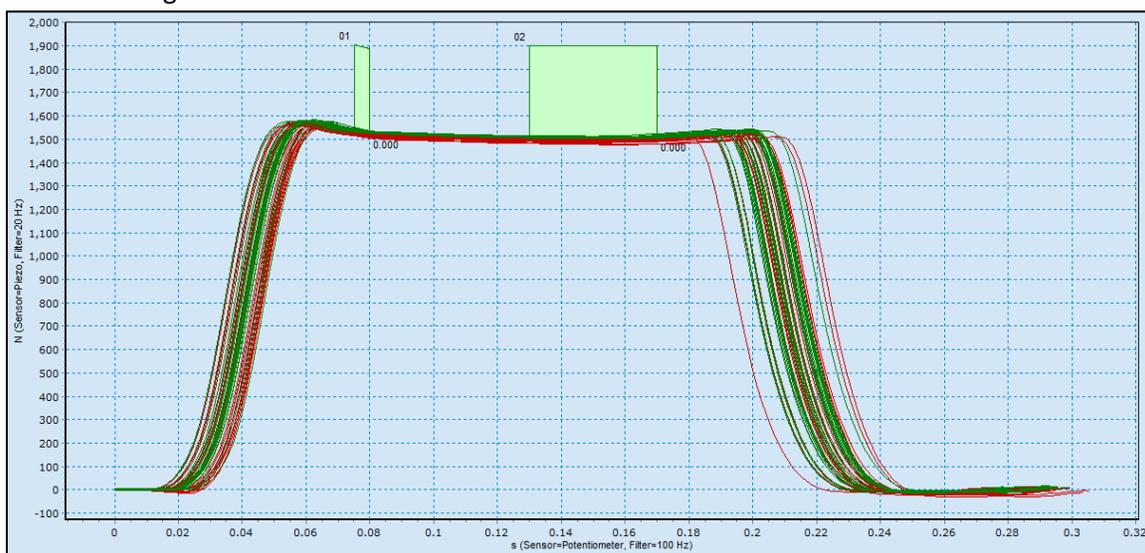


Imagem 5.25

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.7

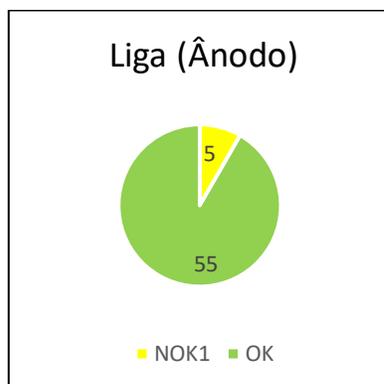
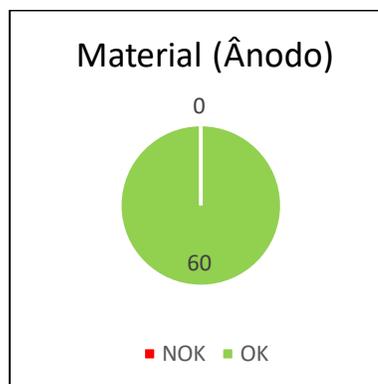


Gráfico 5.3.8



Nesta análise visual foi obtido o melhor valor tanto da análise do material como das ligas, os cravamentos no material a não apresentarem nem falta nem excesso de cravamento, relativamente as ligas nesta análise foram identificadas 5 ligas com uma pequena perfuração dos punções

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.9

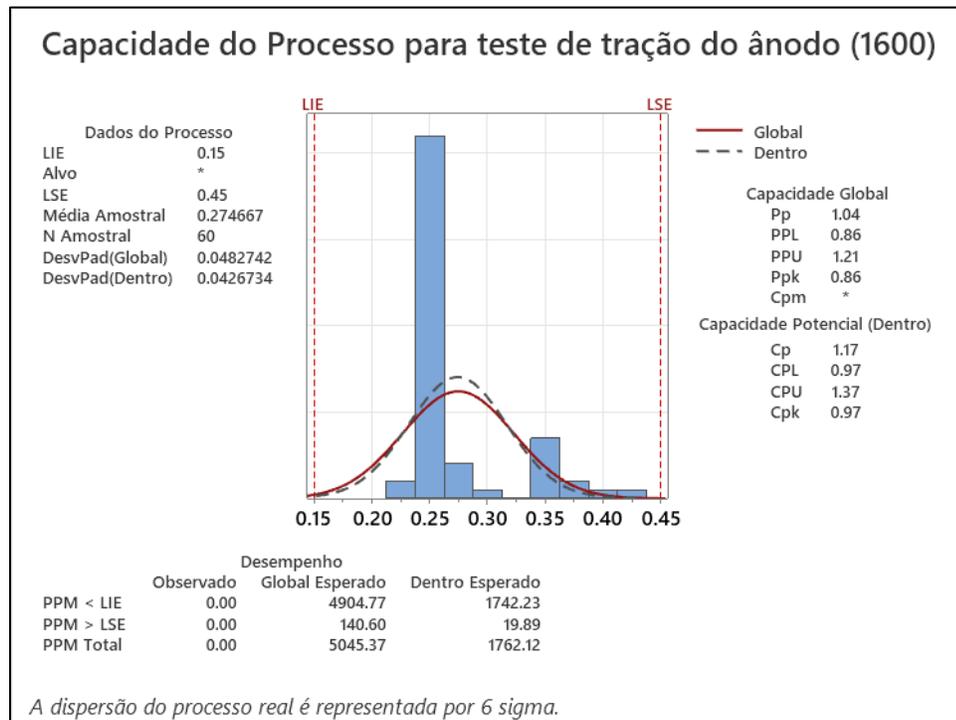
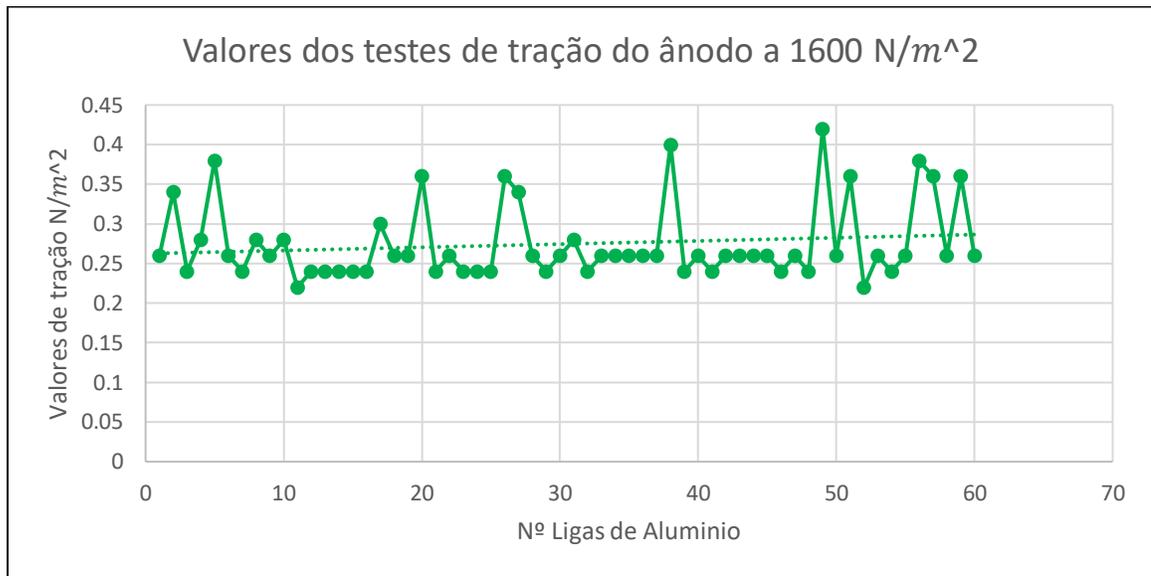


Imagem 5.26

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 1600 N/m<sup>2</sup> é de 0.97 o que não é o ideal, podendo este valor ser explicado pela grande variedade de resultados dentro dos limites estabelecidos.

### 5.3.4 Análise dos testes do ânodo – 1900 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 1900 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

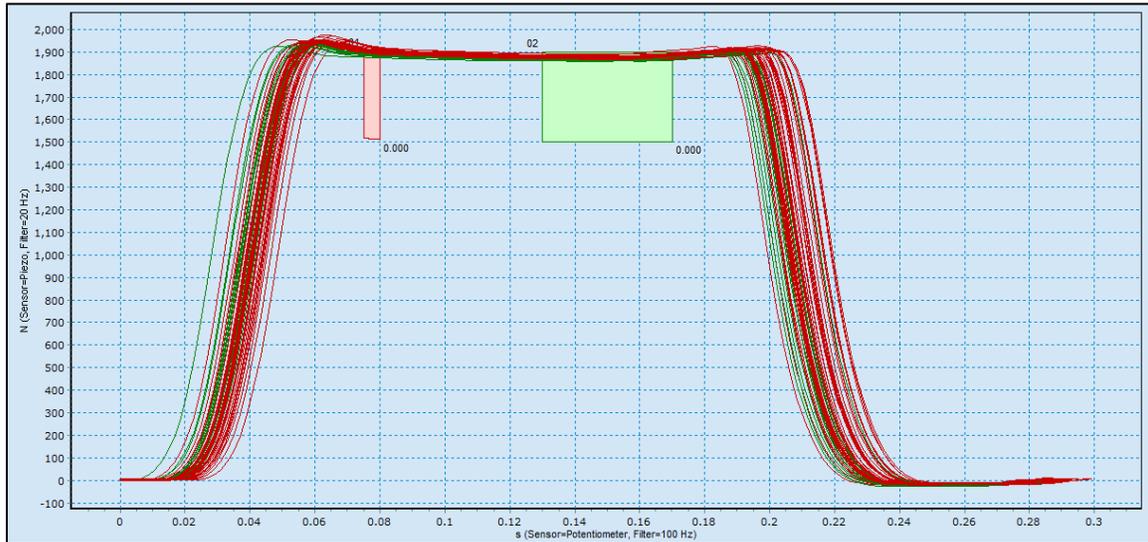


Imagem 5.27

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.10

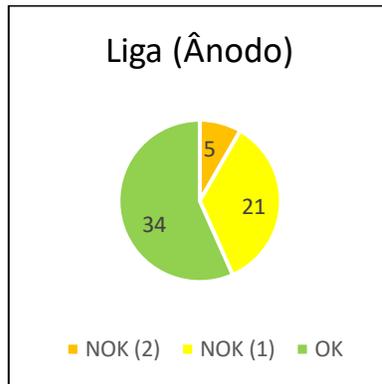
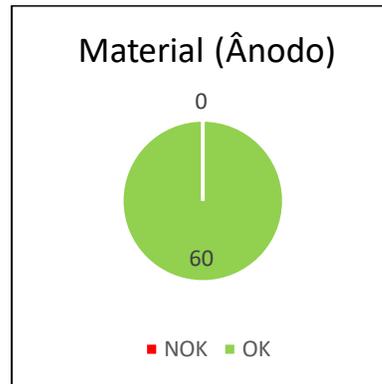


Gráfico 5.3.11



Nesta análise visual não foi registado material com cravamento não conforme embora tenham sido registadas 21 ligas com uma perfuração do punção e outras 5 com 2 perfurações.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.12

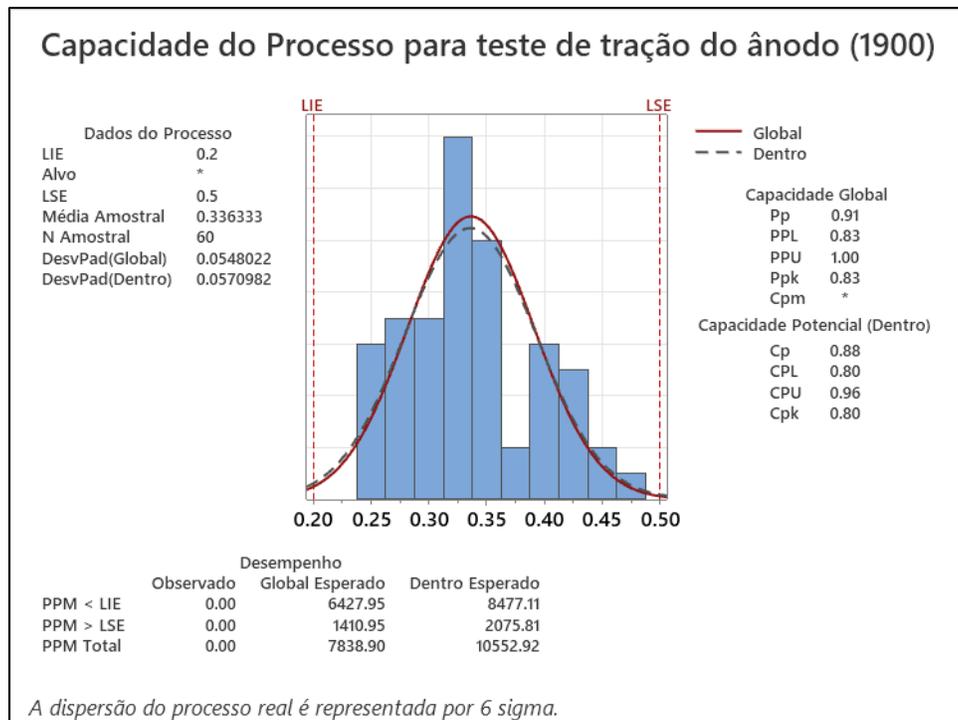
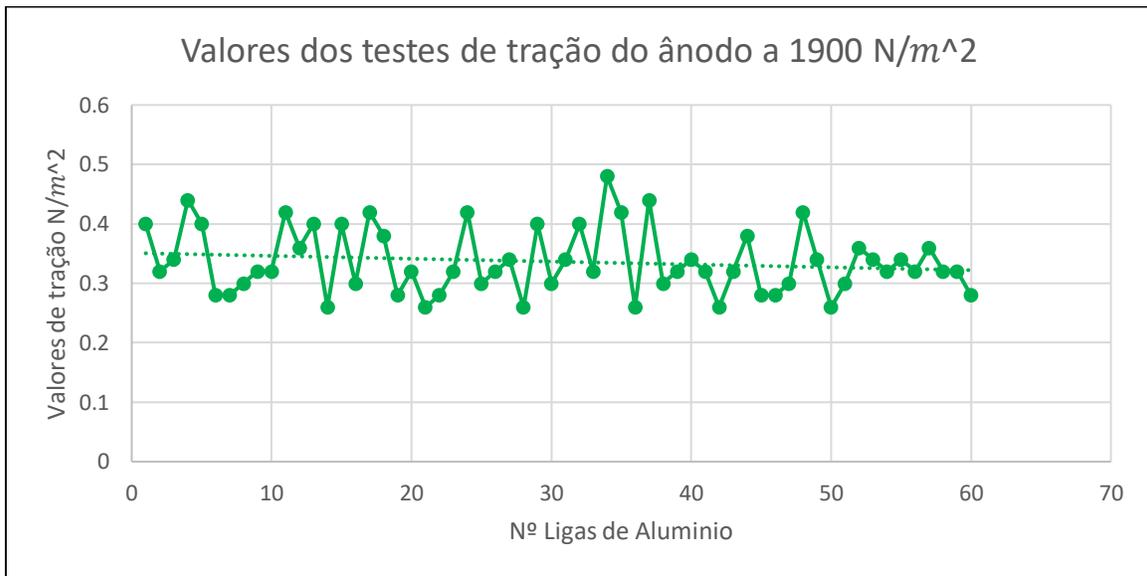


Imagem 5.28

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de 1900 N/m<sup>2</sup> é de 0.80 o que não é o ideal para um valor de Cpk pois na amostra dos 60 valores existiu muita variabilidade, embora todos os valores se encontrem dentro dos limites.

### 5.3.5 Análise dos testes do ânodo – 2000 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2000 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas :

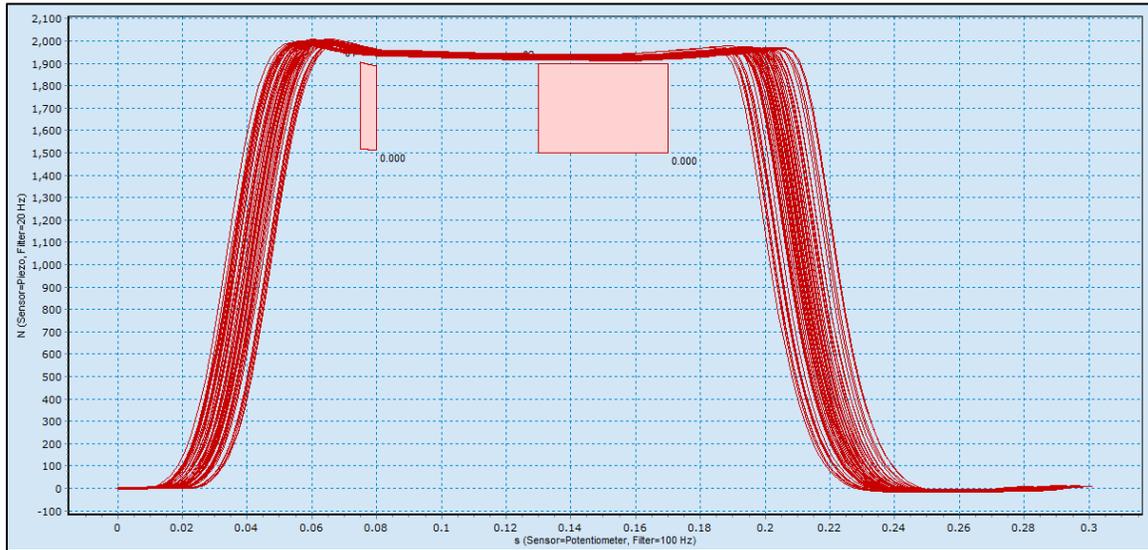


Imagem 5.29

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.13

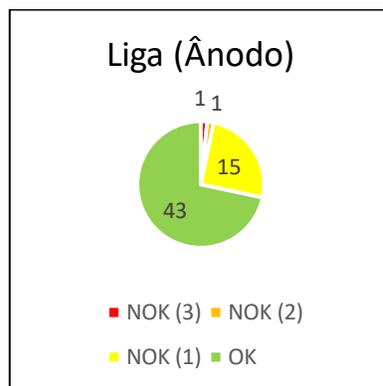
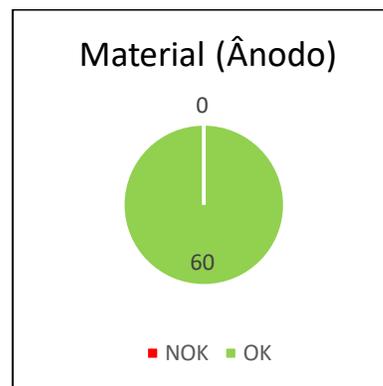


Gráfico 5.3.14



Nesta análise visual foi registada numa das ligas de alumínio 3 perfurações provocadas pelo punção, outra com 2 perfurações e 15 com uma perfuração, relativamente ao material nao foi identificado nenhum cravamento fora de conformidade

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.15

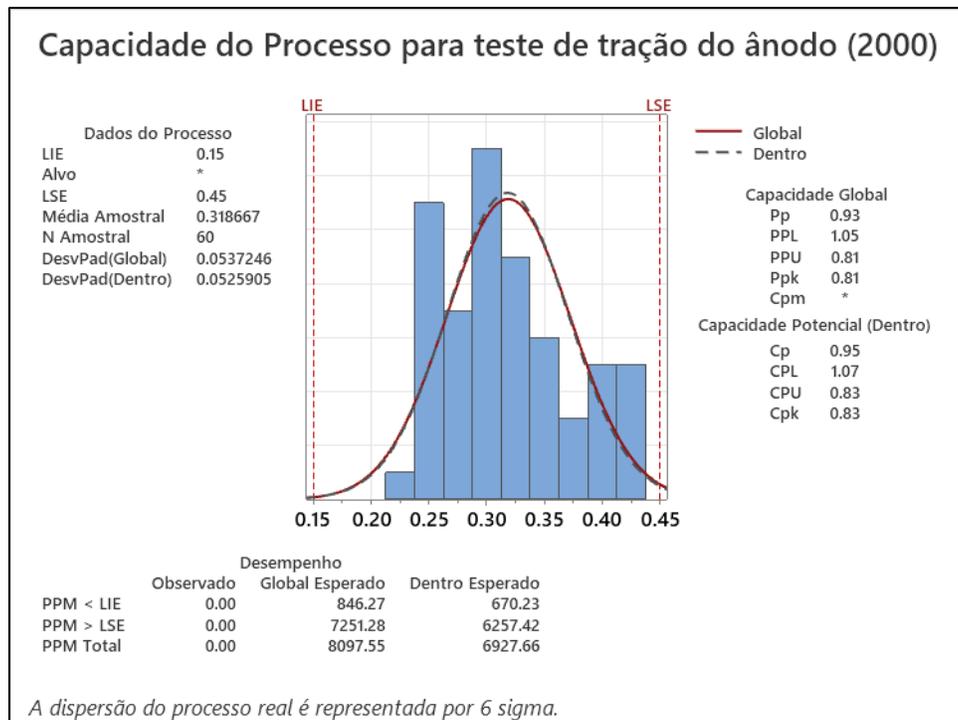
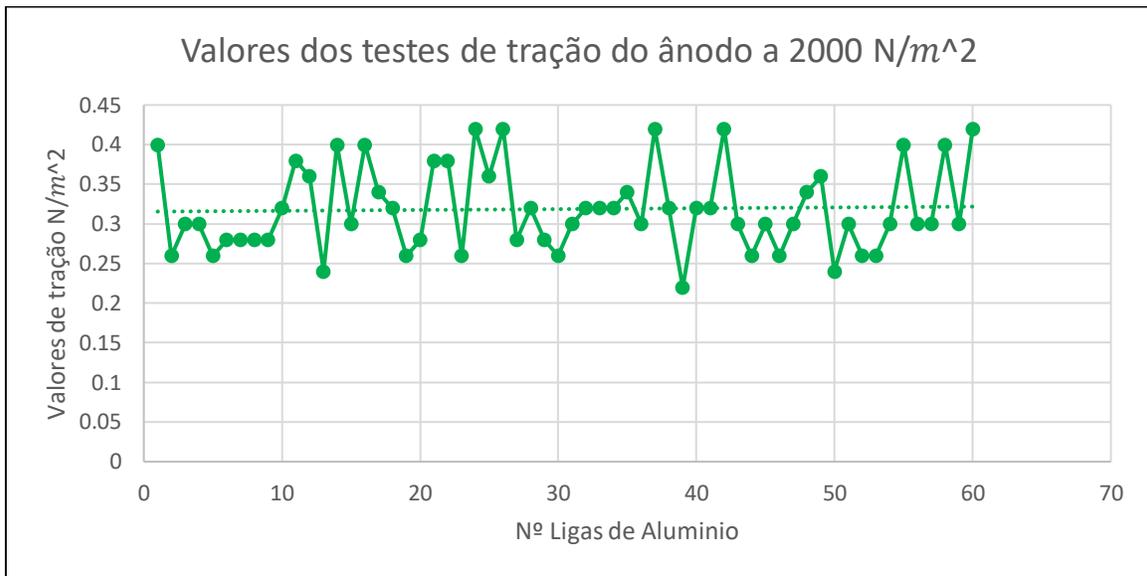


Imagem 5.30

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de  $2000 \text{ N/m}^2$  é de 0.83, mais uma vez Cpk abaixo de 1 uma vez que o valores divergiram bastante nesta amostra, embora se encontrem dentro dos limites definidos.

### 5.3.6 Análise dos testes do ânodo – 2100 [N/m<sup>2</sup>]

Foram obtidos os seguintes resultados da análise do cravamento das ligas de alumínio ao cátodo com uma força de cravamento a rondar os 2100 [N/m<sup>2</sup>]:

Curvas registadas : 4

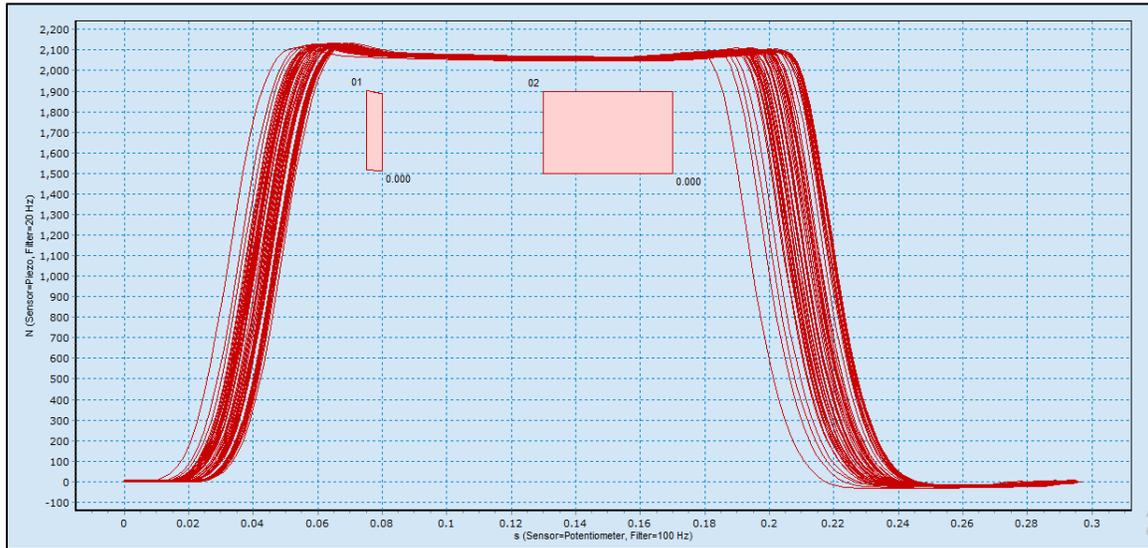


Imagem 5.31

Análise visual do estado das ligas e do material:

Gráfico 5.3.16

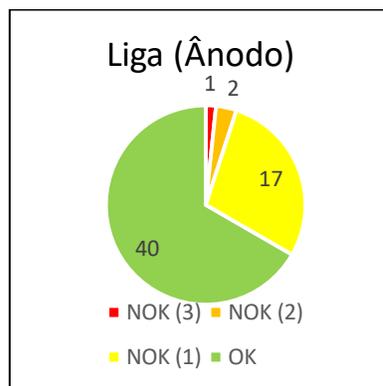
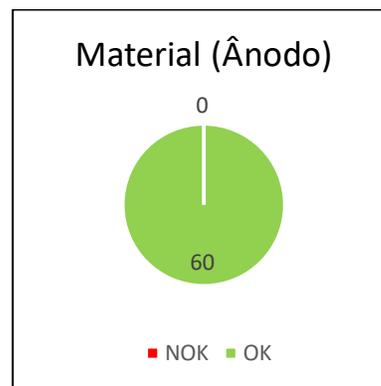


Gráfico 5.3.17



Nesta análise visual foi registada numa das ligas de alumínio 3 perfurações provocadas pelo punção, outras duas com 2 perfurações e 17 com uma perfuração, relativamente ao material não foi identificado nenhum cravamento fora de conformidade.

Da análise dos testes de tração foram obtidos os seguintes valores:

Gráfico 5.3.18

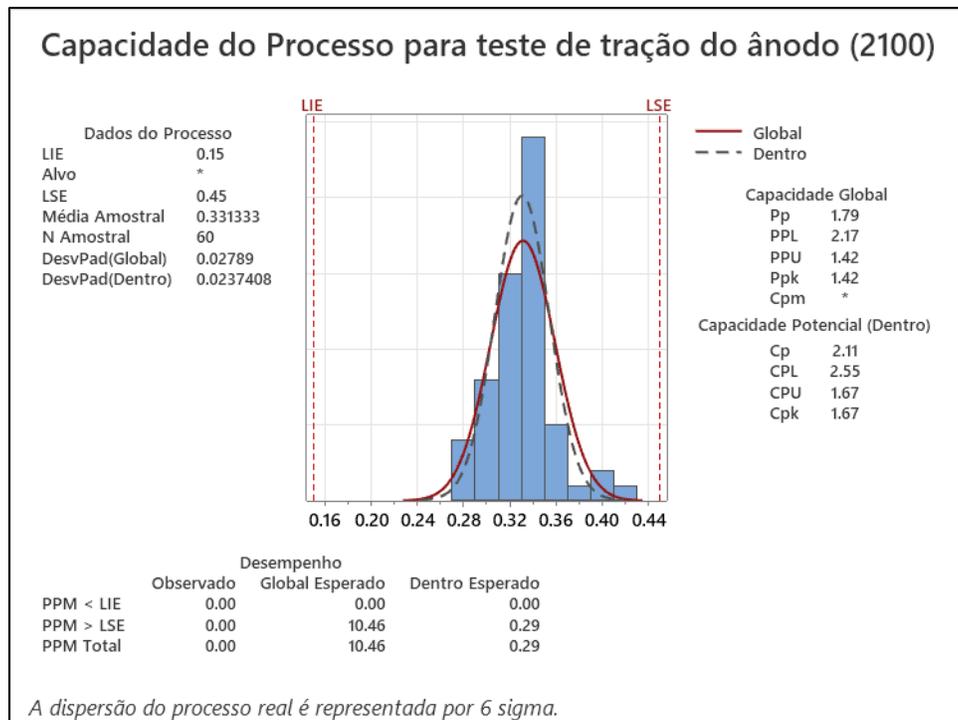
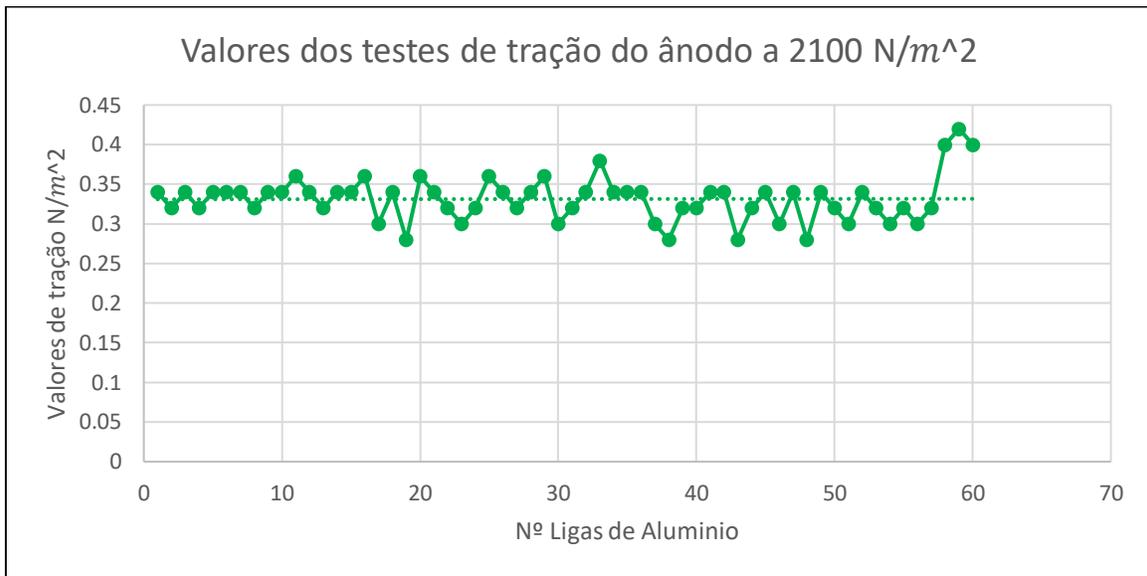


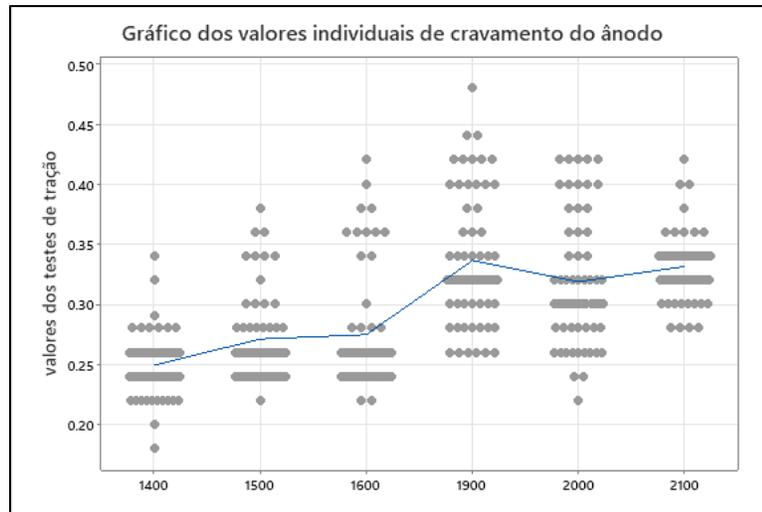
Imagem 5.32

O Cpk retirado para os testes de tração do cátodo com uma força de cravamento de  $1400 \text{ N/m}^2$  é de 1.67 o que indica que o processo se encontra dentro de especificação, a maioria dos valores encontram-se dentro da normal e também dentro dos limites.

### 5.3.7 Análise completa dos testes do ânodo

Dos testes de tração realizados no ânodo é possível observar que a medida que os valores de cravamento aumentam os valores dos testes de cravamento também apresentam um aumento, uma vez que as ligas ficam cravadas no material com valores cada vez mais elevados e a natureza do material, que ao contrário do cátodo, é menos maleável mas mais quebradiço, oferece uma maior resistência as ligas quando são puxadas pela pinça a medida que a força de cravamento aumenta.

Gráfico 5.3.19



É possível observar, pelo gráfico 4.4.7.1, que os valores dos testes de tração rondam os 0.27N em média nos testes com uma força de cravamento mais baixa e que nos testes com uma força de cravamento mais alta os valores aumentam para cerca dos 0.34N em média.

Relativamente a análise visual verificou-se que nos testes com força de cravamento mais baixa o material não apresentava pelo menos 75% dos punções marcados no material (este valor é o valor definido para se avaliar visualmente que o cravamento está em conformidade, dos 5 pelo menos 3 castelos do punção devem marcar na sua totalidade de área o material), relativamente as ligas verificou-se que nos testes a  $2000 \text{ N/m}^2$  e  $2100 \text{ N/m}^2$  existiam ligas que apresentavam até 3 perfurações do punção.



Imagem 5.33



Imagem 5.34



Imagem 5.35



Imagem 5.36

#### 5.4 Definição dos testes elétricos

Após a análise completa dos resultados obtidos procedeu-se a análise de quais testes se voltariam a repetir [3] para serem iniciados os testes elétricos uma vez que todas as peças produzidas foram destruídas para serem realizadas as análises visuais e de tração.

Da análise dos valores obtidos no cátodo rápido se chegou a conclusão que só após os valores de cravamento iguais ou acima de  $2400 \text{ N/m}^2$  eram registadas em algumas amostras na qual o cátodo rasgava após o teste de tração, e que em nenhum dos testes foram observados danos nas ligas de alumínio, ficou então definido voltar a realizar os testes com os valores dentro dos já previamente definidos para o cátodo, por volta dos  $2000 \text{ N/m}^2$ .

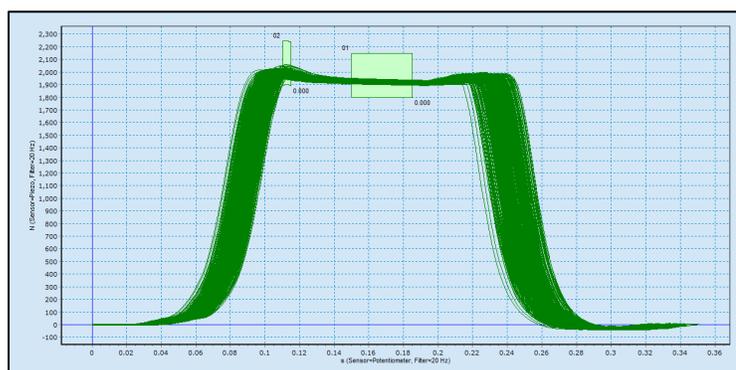


Imagem 5.37

Relativamente a análise dos testes do ânodo, os testes na qual foram obtidos os melhores resultados tanto da análise visual do material como das ligas foram os testes com os valores de cravamento de  $1600 \text{ N/m}^2$  e  $1900 \text{ N/m}^2$ , foi então definido realizar-se um teste para  $1600 \text{ N/m}^2$  e outro teste para  $1900 \text{ N/m}^2$ .



Imagem 5.38

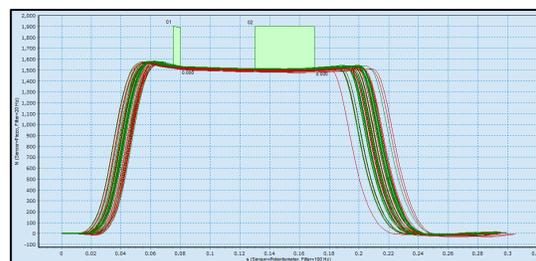


Imagem 5.39

A realização de dois testes com o mesmo valor de cravamento para o cátodo ( $2000 \text{ N/m}^2$ ) e com diferentes valores de cravamento para ânodo ( $1600 \text{ N/m}^2$  e  $1900 \text{ N/m}^2$ ) tinha como objetivo analisar se a nível elétrico poderia, ou não, existir uma vantagem significativa em serem realizados os testes com valores mais próximos aos  $1600 \text{ N/m}^2$  ou aos  $1900 \text{ N/m}^2$ .

#### 5.4.1 Testes elétricos

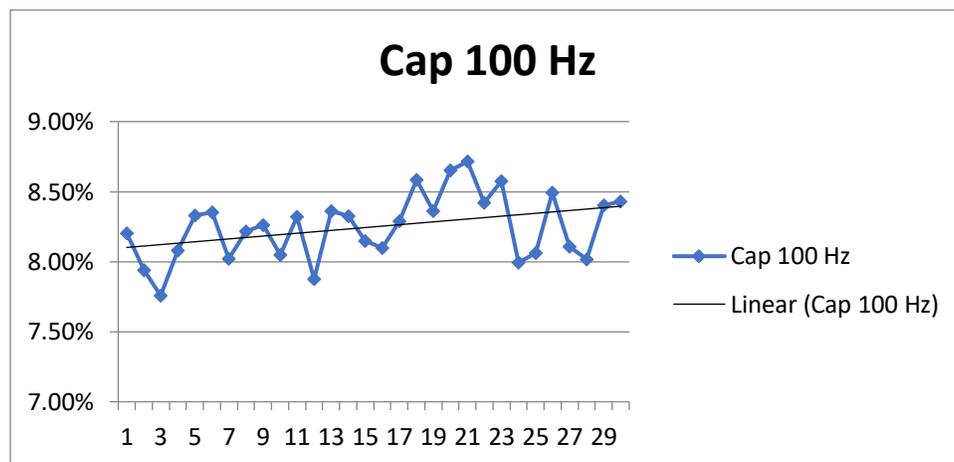
Ficou definido que as amostras que iriam voltar a ser reproduzidas seriam sujeitas a dois tipos de testes elétricos. Um teste elétrico mais agressivo denominado por **Surge Eletrical Test** e um outro tipo de teste menos agressivo mas que pelas carateristicas do mesmo levava mais tempo a ser concluido, esse teste é denominado por **Endurance DC Test**.

Foram produzidas as primeiras 15 amostras com um valor de cravamento de  $1600 \text{ N/m}^2$  e outras 15 com um valor de cravamento de  $1900 \text{ N/m}^2$ . Estas 30 peças passariam assim por todos os processos mencionados no capítulo 2.5 até realizarem os testes elétricos.

#### 5.4.2 Teste elétrico - Surge Eletrical Test

O teste de Surge eletrical é um procedimento realizado em componentes eletrônicos para avaliar a capacidade de suportarem sobretensões reansitórias ou picos de tensão repentinos. O objetivo do teste é verificar se o componente é capaz de suportar sobretensões sem sofrer falhas ou danos permantes. No teste são monotorizados os parametros da capacidade (Cap) [6], resistencia em serie equivalente (ESR) [6], fator de perda (Tan-d) [6],

Gráfico 5.4.1



Para testar a capacidade dos condensadores eletricamente, foi utilizado um circuito RC, na qual é conectada uma resistencia em serie com o condensador e é aplicada uma tensão conhecida. É assim possivel calcular a capacidade dos condensadores através da seguinte formula:

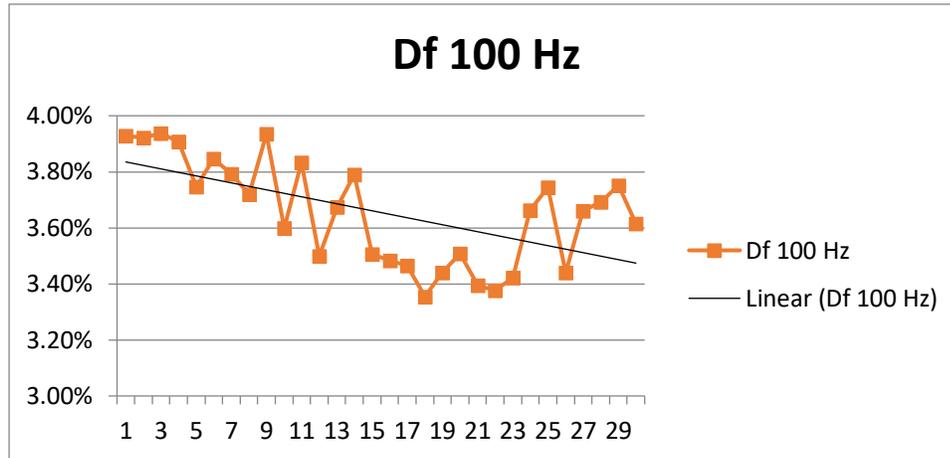
$$\tau = R \times C \quad [1]$$

Onde  $\tau$  é o tempo necessário para que a tensão atinja aproximadamente 63% do valor final, R a resistencia e C a capacidade do condensador. Resolvendo a formula [1] em função da capacidade obtemos:

$$C = \frac{\tau}{R} \quad [2]$$

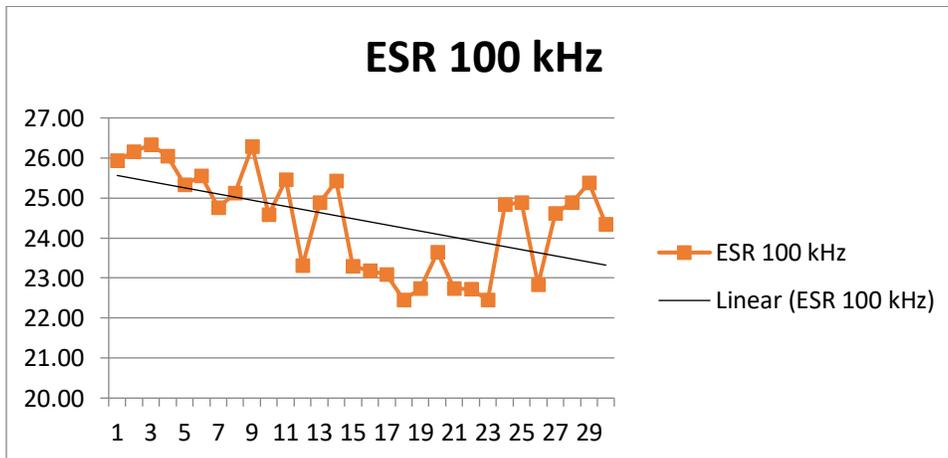
No gráfico 5.4.1 é possível observar que a capacidade se mantém estável em ambos os testes.

Gráfico 5.4.2



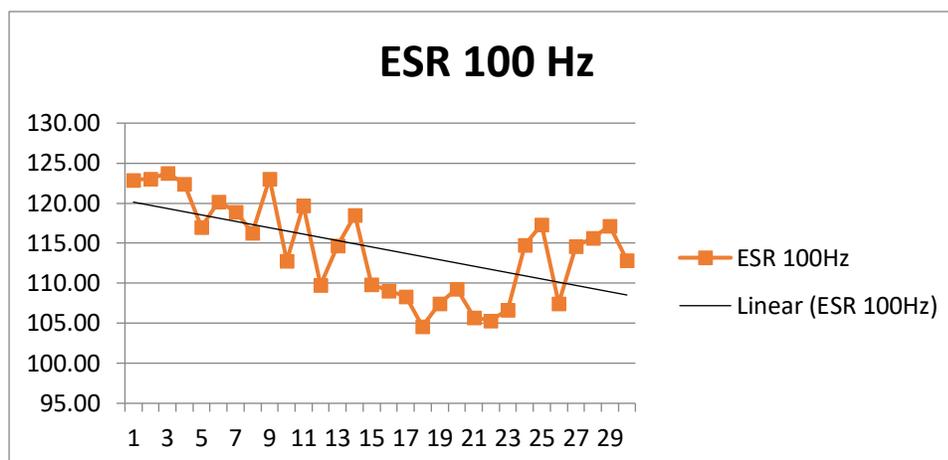
O valor do DF indica o nível de perdas dielétricas do condensador em relação à sua capacidade de armazenar energia neste caso com o valor de dissipação medido em 100 HZ não foram registados valores fora dos especificados para o produto.

Gráfico 5.4.3



O ESR é a medida da resistência efetiva presente no interior do condensador, é bastante importante uma vez que pode afetar o seu desempenho e eficiência

Gráfico 5.4.4



O ESR é a medida da resistência efetiva presente no interior do condensador, é bastante importante uma vez que pode afetar o seu desempenho e eficiência. Para o cálculo do ESR foram utilizados equipamentos que aplicaram um sinal de teste de 100KHz e 100Hz respectivamente. O ESR é então obtido através da seguinte formula:

$$ESR = Z - X_c \quad [3]$$

Onde Z é a impedância total medida pelo equipamento e  $X_c$  é a reatância capacitiva calculada como  $1/2\pi fC$  onde f é a frequência e C a capacidade do condensador

Tabela 5.2

Testes	Capacidade	ESR 100 KHz	ESR 100Hz	DF
Média	508.85	24.38	114.03	3.65
Máximo	510.96	26.34	123.75	3.94
Mínimo	506.46	22.45	104.62	3.35
Desvio-padrão	1.0425	1.1694	5.5409	0.1732

### 5.4.3 Teste elétrico - Endurance DC Test

No teste de Endurance DC os condensadores são submetidos a uma tensão contínua constante, por um período prolongado de tempo, neste caso 2000 horas com o objetivo de simular condições de operação reais e verificar o comportamento do condensador sob carga constante.

Este teste é um teste importante porque os condensadores podem estar sujeitos a stresses elétricos contínuos em certas aplicações, tais como fontes de alimentação ou circuitos de filtragem.

Durante o teste foram também monitorizados vários parâmetros do condensador como a alteração da capacidade, a variação do ESR, o fator de perda (Tan-d) e a evolução do peso dos condensadores

Gráfico 5.4.5

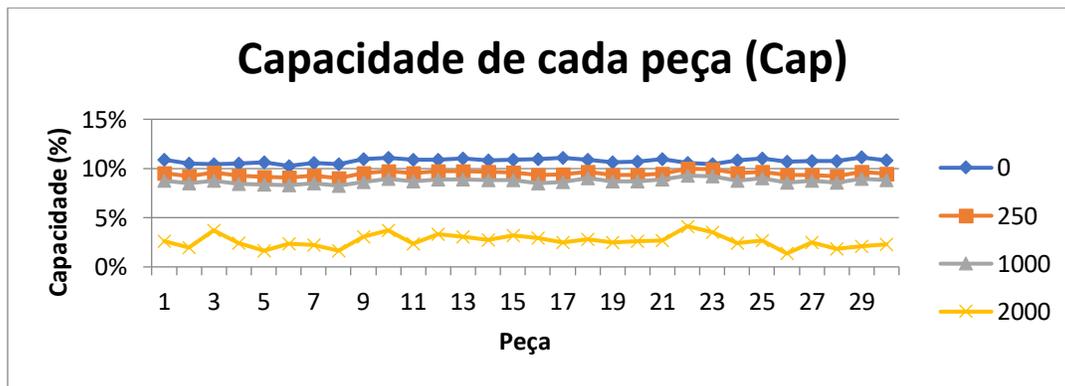


Tabela 5.3

Instante (h)	0(h)	250(h)	1000(h)	2000(h)
Máximo	11.12%	9.98%	9.28%	4.13%
Mínimo	10.26%	9.01%	8.25%	1.36%
Média	10.76%	9.48%	8.73%	2.63%
Desvio-padrão	0.23%	0.24%	0.25%	0.65%

Gráfico 5.4.6

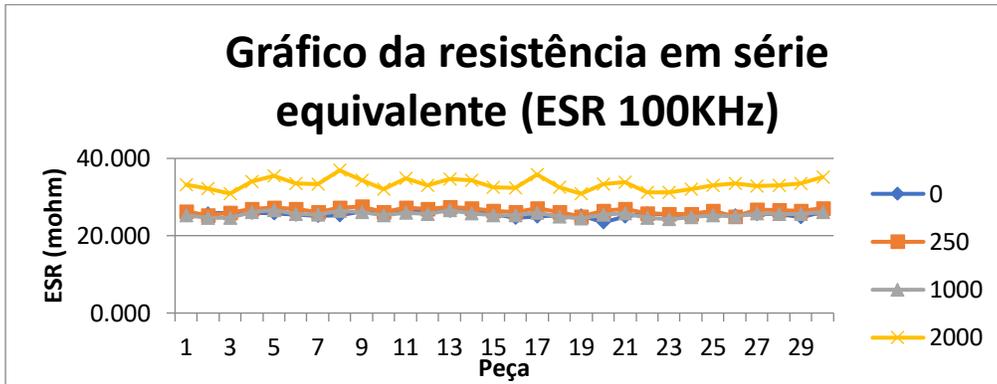


Tabela 5.4

Instante (h)	0(h)	250(h)	1000(h)	2000(h)
Máximo	26.4417	27.5338	26.6762	36.9096
Mínimo	23.4426	24.9691	24.2903	30.8609
Média	25.49158	26.47285	25.4657	33.33836
Desvio-padrão	0.607413	0.700814	0.625432	1.471856

Gráfico 5.4.7

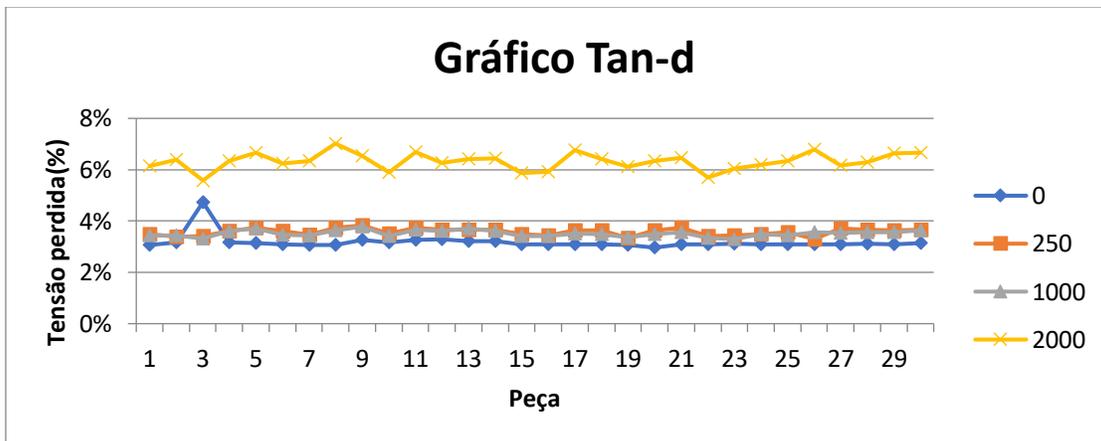


Tabela 5.5

Instante (h)	0(h)	250(h)	1000(h)	2000(h)
Máximo	4.74%	3.83%	3.78%	7.02%
Mínimo	2.96%	3.30%	3.29%	5.58%
Média	3.18%	3.58%	3.52%	6.32%
Desvio-padrão	0.30%	0.13%	0.12%	0.33%

Gráfico 5.4.8

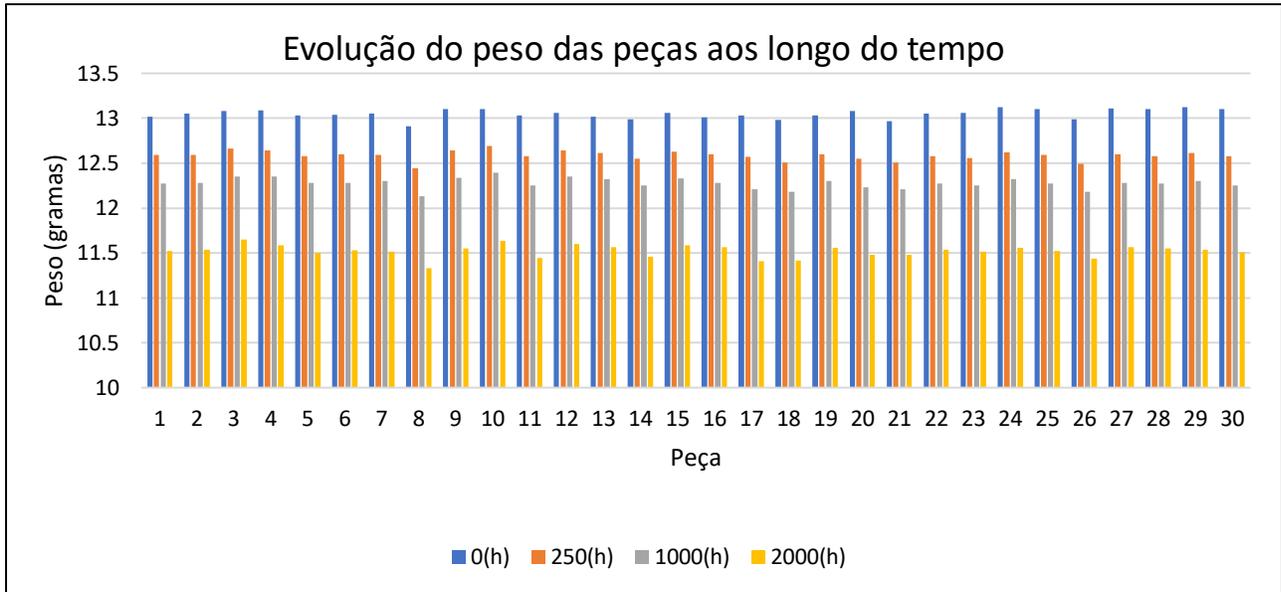


Tabela 5.6

Instante (h)	0(h)	250(h)	1000(h)	2000(h)
Máximo	13.12	12.69	12.39	11.646
Mínimo	12.91	12.44	12.13	11.333
Média	13.04933	12.586	12.27567	11.52153
Desvio-padrão	0.050099	0.051166	0.057397	0.068412

## 6 Conclusão

*Este estudo tinha como objetivo obter a janela de cravamento ótima para o material do produto PEG226, tentar perceber a partir de quais forças de cravamento se iniciava a detetar defeitos físicos nas peças e a partir de quais forças o cravamento não ocorria.*

*Pela análise dos testes elétricos ficou verificado que as características elétricas das peças não divergem dos valores de referência tanto para as amostras com um cravamento de  $1600 \text{ N/m}^2$  como para as amostras com um cravamento de  $1900 \text{ N/m}^2$ .*

Analisando mais ao detalhe os dados dos testes:

- Para o cátodo, a partir de valores de cravamento acima dos  $2400 \text{ N/m}^2$  inclusive, o material começou a apresentar alguns defeitos após o teste de tração
- Para o ânodo, verificou-se que nos testes com força de cravamento mais baixa o material não apresentava pelo menos 75% dos punções marcados no material, nos testes a  $2000 \text{ N/m}^2$  e  $2100 \text{ N/m}^2$  existiam ligas que apresentavam cravamento excessivo
- Com o tempo, a quantidade de eletrólito no condensador diminuiu (Gráfico 5.4.3.4), reduzindo a área de superfície funcional entre o ânodo e o cátodo, causando um aumento na resistência interna (ESR) (Gráfico 5.4.3.2).
- A redução da área de superfície funcional entre o ânodo e o cátodo devido à evaporação de eletrólito causa um aumento no valor da tensão perdida (Gráfico 5.4.3.3) e diminuição da capacidade do condensador (Gráfico 5.4.3.1)
- Da análise dos dados da capacidade dos condensadores nos dois testes elétricos (Gráfico 5.4.2.1 e Gráfico 5.4.3.1) verifica-se que tanto as amostras com um cravamento de  $1600 \text{ N/m}^2$  como para as amostras com um cravamento de  $1900 \text{ N/m}^2$  estão dentro das tolerâncias da datasheet (Tabela 3.5.1.1).
- Relativamente aos dados do ESR para ambos os testes verificou-se que as peças tiveram uma performance similar ao longo do tempo, realçando o facto de que nenhuma peça ter falhas elétricas reportadas

Com todos os dados recolhidos e analisados o estudo originou as seguintes conclusões a relativamente a janela de parametrização:

- Para a definição da janela de cravamento do cátodo os valores estabelecidos inicialmente satisfazem os critérios definidos neste estudo.

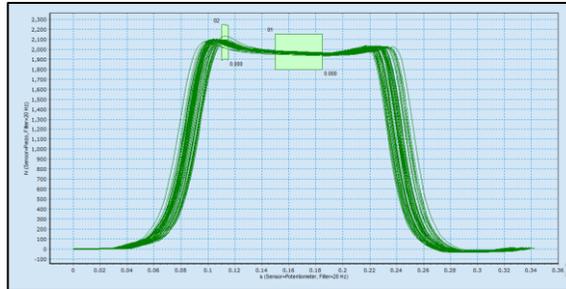


Imagem 6.1

- Relativamente á definição da janela de cravamento para ânodo esta teve de ser ajustada, uma vez que para satisfazer os dados visuais, estatísticos e elétricos as janelas de cravamento foram alteradas para o intervalo de cravamento de 1600 N/m<sup>2</sup> a 1900 N/m<sup>2</sup>.

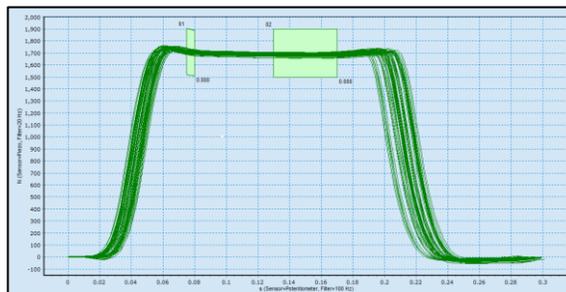


Imagem 6.2

## 7 Trabalhos Futuros

Uma vez que os ensaios deste trabalho não requerem um grande investimento é ainda possível melhorar o processo de produção do Kemet 226 através de estudos no processo de fabricação deste produto bastante semelhantes ao presente.

Para otimizar ainda mais o estudo seria necessário analisar o estado dos punções de cravamento ao longo do tempo, ou seja, após a definição da janela de cravamento definida no estudo o seguinte a fazer seria acompanhar a evolução da curva de cravamento, que á medida que os punções se vão desgastando, irá diminuir uma vez que os castelos dos punções ao ficarem mais pequenos iriam exigir uma maior força de cravamento para cravar as ligas de alumínio no material, com o estudo seria possível definir com exatidão o período de troca de punções e controlar a curva de cravamento das ligas aos materiais.

Tal como o presente estudo analisa o cravamento e janela de parametrização ideal das ligas de alumínio para o ânodo e para o cátodo ainda existe a possibilidade de ser analisado ao detalhe o cravamento das ligas de alumínio na lata, também ela de alumínio. O estudo seria bastante parecido ao

presente, constituído por amostras, definição de testes para testes elétricos e análise dos mesmos. De realçar que os aparelhos de medição (Kystlers), já se encontram equipados na estação de cravamento das ligas na lata.

## 8 Referências Bibliográficas

- [1] GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. Ensaaios dos materiais. Rio de Janeiro: Ltc, 2008
- [2] Minitab, Inc. Meet Minitab 15. s.l. : Minitab, Inc., 2007.
- [3] AIAG. (2010). Measurement Systems Analysis, 4 a Edição. Chrysler Group LLC.
- [4] Instruction Manual – maXYmos BL Type 5867b
- [5] Instruction Manual - Windows-Software maXYmos PC
- [6] General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors – Nichicon Corporation
- [7] Gurav, A., Xu, X., Freeman, Y., Reed, E. (2016). KEMET Electronics: Breakthroughs in Capacitor Technology. In: Madsen, L., Svedberg, E. (eds) Materials Research for Manufacturing. Springer Series in Materials Science, vol 224. Springer, Cham. Acedido em abril de 2022 em : [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23419-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23419-9_4)
- [8] KEMET Electronics Corporation, [www.kemet.com](http://www.kemet.com), Acedido em Maio de 2022