

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DAS EXATAS E ENGENHARIA**

**NESTOR DE BONA JUNIOR**

**PROJETO CONCEITUAL DE EQUIPAMENTO PARA CURA POR RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA APLICADO AO SETOR CALÇADISTA UTILIZANDO LED-UV**

**CAXIAS DO SUL  
2019**

**NESTOR DE BONA JUNIOR**

**PROJETO CONCEITUAL DE EQUIPAMENTO PARA CURA POR RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA APLICADO AO SETOR CALÇADISTA UTILIZANDO LED-UV**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de conhecimento: 3.05.04.05-8  
Máquinas, Motores e Equipamentos.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Ronaldo Farias  
Soares

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**NESTOR DE BONA JUNIOR**

**PROJETO CONCEITUAL DE EQUIPAMENTO PARA CURA POR RADIAÇÃO  
ULTRAVIOLETA APLICADO AO SETOR CALÇADISTA UTILIZANDO LED-UV**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de conhecimento: 3.05.04.05-8  
Máquinas, Motores e Equipamentos.

**Aprovado em:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Márcio Ronaldo Farias Soares

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. María Cristina Moré Farias

Universidade de Caxias do Sul – UCS

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, meus pais que me deram uma educação e base perfeita, para concretizar o meu saber, e também a minha esposa e filha, que pacientes e atenciosas, sempre me apoiaram quando necessário, tornando mais fácil esta trajetória e fazendo com que eu chegasse até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que me deu energia, saúde e força para superar as dificuldades, e por ter proporcionado que chegasse até aqui.

Aos meus familiares por toda dedicação, paciência e apoio incondicional ao longo do curso, que me incentivaram todos os anos que estivesse na faculdade.

A esta universidade e todo seu corpo docente que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado em especial ao Prof. Dr. Márcio, orientador deste trabalho pela oportunidade que me foi dada, pelos seus conhecimentos, sua atenção e sua boa vontade.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do projeto de um equipamento aplicado ao setor calçadista, nas fases de projeto informacional e conceitual. A principal função deste equipamento é a preparação de superfícies por meio da cura de tintas, vernizes, adesivos entre outros via radiação ultravioleta. Tais materiais são tipicamente utilizados para a colagem de injetados, termoformados e laminados como solas e entressolas de EVA, e também para pintura de peças de calçados. A principal inovação deste equipamento é a utilização de lâmpadas de LED-UV como alternativa às tradicionais lâmpadas de vapor de mercúrio. A aplicação de lâmpadas LED-UV já é amplamente utilizada nos setores gráfico (serigrafia e impressão) e alimentício (esterilização), entre outros, porém ainda não testado no setor ao qual está sendo proposto. Os benefícios do LED em comparação com a lâmpada convencional UV são principalmente: a partida instantânea atingindo a potência total em milissegundos enquanto as lâmpadas convencionais precisam de vários minutos, baixo consumo de energia, menor geração de calor e maior vida útil. Neste trabalho foram avaliadas por ATR-FTIR e perda de cor, amostras-padrão recobertas por tinta UV comercial e expostas por 16 minutos à 3 lâmpadas comerciais de LED-UV de distintos comprimentos de onda: 385, 405 e 415 nm respectivamente. Verificou-se por ATR-FTIR que a cura das amostras realizadas pela lâmpada de LED de 415 nm, foi a que apresentou a maior semelhança com a cura das amostras por meio da lâmpada de mercúrio, por sua vez, estas as amostras apresentaram uma maior alteração de cor frente as demais. Estas análises juntamente com a execução das fases do projeto informacional e conceitual facilitaram a tomada decisão e a dar rumo ao projeto possibilitando seguir para a próxima fase de projeto preliminar.

**Palavras-chaves:** Lâmpadas de LED UV. Cura de tinta UV. Equipamento para cura UV.

## ABSTRACT

The present work aims to evaluate the feasibility of designing equipment applied to the footwear sector, in the informational and conceptual design phases. The main function of this equipment is the preparation of surfaces by curing paints, varnishes, adhesives and others via ultraviolet radiation. Such materials are typically used for gluing injected, thermoformed and laminated as EVA soles and midsoles, and also for painting shoe parts. The main innovation of this equipment is the use of LED-UV lamps as an alternative to traditional mercury vapor lamps. The application of LED-UV lamps is already widely used in the graphic (screen printing and printing) and food (sterilization) sectors, among others, but not yet tested in the sector to which it is being proposed. The benefits of LED compared to conventional UV lamps are mainly: instant startup reaching full power in milliseconds while conventional lamps need several minutes, lower power consumption, lower heat generation and longer life. In this work were evaluated by ATR-FTIR and color loss, standard samples coated with commercial UV ink and exposed for 16 minutes to 3 commercial LED-UV lamps of different wavelengths: 385, 405 and 415 nm respectively. It was verified by ATR-FTIR that the curing of the samples made by the 415 nm LED lamp was the one that showed the most similarity to the curing of the samples by means of the mercury lamp. color change in front of the others. These analyzes together with the execution of the informational and conceptual design phases facilitated decision making and the direction of the project enabling the next preliminary design phase to proceed.

**Keywords:** UV LED Lamps. UV ink cure. UV curing equipment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Etapas da cura UV.....	15
Figura 2-Espectro eletromagnético com as variações de UV .....	17
Figura 3-Exemplar da primeira geração de LEDs com padrão na cor vermelha.....	17
Figura 4-Túneis comerciais para a cura ultravioleta usados no setor calçadista .....	20
Figura 5-Partes de um calçado esportivo utilizados no processo de colagem.....	20
Figura 6-Tela e rodo para aplicação de tinta UV .....	21
Figura 7-Modelo de referência do PDP, segundo Rozenfeld et al. (2006).....	22
Figura 8-Modelo de referência do PDP, segundo Back et al. (2008).....	22
Figura 9-Fluxograma da fase de planejamento do projeto .....	23
Figura 10-Fluxograma da fase de projeto informacional.....	24
Figura 11-QFD (Desdobramento da Função Qualidade).....	25
Figura 12-Fluxograma da fase de projeto conceitual.....	26
Figura 13-Estrutura de Funções.....	27
Figura 14-Matriz Morfológica.....	27
Figura 15-Resultados da Matriz Morfológica.....	28
Figura 16-Fluxograma da fase de projeto preliminar .....	29
Figura 17-Fluxograma da fase de projeto detalhado .....	30
Figura 18- Espectro de emissão do LED UV (linha preenchida) comparada a emissão da lâmpada de vapor de mercúrio .....	31
Figura 19-Refletores para lâmpada de vapor de mercúrio.....	32
Figura 20-Unidade de refrigeração de túnel UV convencional .....	33
Figura 21-Transformadores usados em um túnel UV.....	34
Figura 22-Comparação dos recipientes pintados .....	35
Figura 23-Tela e rodo utilizado para aplicação da tinta UV .....	40
Figura 24-Placas de LEDs de 385, 405 e 415 nm e dissipador de calor.....	41
Figura 25- Suporte para as placas de LEDs e dissipador.....	41
Figura 26-Sistema montado, suporte, placa de LEDs, dissipador e amostra.....	44
Figura 27-Óculos com filtro de UV.....	45
Figura 28- Espectros de FTIR obtidos para amostras curadas pela lâmpada de vapor de mercúrio e LEDs UV (385, 405 e 415 nm).....	46
Figura 29- Representação esquemática do sistema de cor CIE .....	47



Figura 30- Profundidade de cura em função com comprimento de onda UV .....	48
Figura 31- Padrão de intensidade de radiação emitida do LED em função do ângulo de abertura .....	48
Figura 32- Ilustração do uso de microlentes em LEDs e sua irradiação em função da distância. ....	49
Figura 33- Estrutura de funções propostas para o equipamento .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Levantamento de custos .....	42
Tabela 2-Resultados dos testes de cor .....	47
Tabela 3-Fragmento da matriz QFD.....	51
Tabela 4-Matriz Morfológica .....	52
Tabela 5-Matriz de soluções.....	53
Tabela 6-Matriz de decisão.....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Informações obtidas.....	50
-----------------------------------	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

LED Light Emitting Diode

UV Ultravioleta

EVA ethylene-vinyl acetate

TPU Thermoplastic polyurethane

PVC poly(vinyl chloride)

W Watts

FTIR Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier

ATR Refletância total atenuada

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2.	OBJETIVOS .....	13
<b>1.2.1.</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2.2.</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1.	CURA POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....	14
<b>2.1.1.</b>	<b>Mecanismo da cura UV</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.2.</b>	<b>Tipos de radiação UV</b> .....	<b>16</b>
2.2.	HISTÓRIA DO LED .....	17
<b>2.2.1.</b>	<b>Tecnologia led aplicada a cura por UV</b> .....	<b>18</b>
2.3.	PROCESSO E APLICAÇÃO DA CURA UV NO SETOR CALÇADISTA.....	19
2.4.	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO .....	21
<b>2.4.1.</b>	<b>Fases do Projeto</b> .....	<b>23</b>
2.4.1.1.	Planejamento do Projeto .....	23
2.4.1.2.	Projeto Informacional .....	24
2.4.1.3.	Projeto Conceitual.....	25
2.4.1.4.	Projeto Preliminar .....	28
2.4.1.5.	Projeto Detalhado.....	29
2.5.	ELEMENTOS DE UM EQUIPAMENTO DE CURA UV .....	31
2.6.	EXEMPLO DE EXPERIMENTOS NA ÁREA DE CURA UV LED. ....	34
<b>3.</b>	<b>MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1.	LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES .....	36
3.2.	EXECUÇÃO DA FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO.....	36
3.3.	COMPARAÇÕES E TESTES UTILIZANDO AMOSTRA PADRÃO.....	37
3.4.	EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO INFORMACIONAL .....	37
<b>3.4.1.</b>	<b>Elaboração da matriz QFD</b> .....	<b>37</b>
3.5.	EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL .....	38

3.5.1.	Elaboração da Estrutura de Funções.....	38
3.5.2.	Elaboração da Matriz Morfológica .....	38
3.5.3.	Elaboração da Matriz de Decisão .....	39
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.</b> .....	<b>40</b>
4.1.	LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES.....	40
4.2.	EXECUÇÃO DA FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO.....	42
4.3.	COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES DOS TESTES UTILIZANDO AMOSTRA PADRÃO .....	43
4.4.	EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO INFORMACIONAL .....	49
4.4.1.	Matriz QFD .....	50
4.5.	EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL .....	51
4.5.1.	Elaboração da Estrutura de Funções.....	52
4.5.2.	Elaboração da Matriz Morfológica .....	52
4.5.3.	Elaboração da Matriz de Decisão.....	53
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>57</b>
	REFERÊNCIA .....	58

## 1. INTRODUÇÃO

O tênis surgiu no século XIX entre as décadas de 1860 e 1870, utilizados para a prática do ciclismo como uma espécie de sapatilha de couro fechada por meio de cadarços. Se popularizou entre os jovens na década de 1950, e se tornou um dos símbolos da juventude rebelde. A partir dos anos de 1980 com a valorização dos esportes o tênis ganhou as ruas e recebeu ainda mais prestígio. Desde a sua criação, o tênis sofreu diversas modificações de design e materiais, deixando de ser um calçado de borracha e tecido e se tornando um agregado de tecnologia e estilo (LUCENA, 2009).

Uma das partes mais importantes na construção do calçado é o solado, que confere as características de leveza, conforto, flexibilidade, proteção contra impactos, além de fazer o contato com o solo e prevenir problemas ortopédicos e lesões (MELO e SANTOS, 2017).

Os materiais mais utilizados hoje em dia em solados e entressolas de calçados esportivos são os termoplásticos, como o TPU (poliuretano termoplástico), TR (borracha termoplástica), EVA (acetato-vinilo de etileno) e PVC (policloreto de vinila) que possuem diversas vantagens em relação a borracha vulcanizada utilizada anteriormente. Vantagens como: baixo custo de processamento, uso de equipamentos menos complexos para a fabricação da sola, baixos níveis de perdas devido a capacidade de reciclagem dos materiais, versatilidade no design e redução de peso (SANTOS e SILVA, 2009).

O EVA em particular, cuja sola ou entressola para ser colada no cabedal, necessita de lavagem e uma preparação para ter uma maior adesão a cola e não vir a soltar com o tempo de uso. Esta preparação inicial é ainda feita até hoje em fabricas menores por lixamento ou fresamento da superfície a ser colada. Este processo é artesanal e emprega muita mão de obra, além de se tomar os devidos cuidados para não deformar a sola e deixar sulcos que podem vir a causar problemas na colagem. Uma alternativa muito mais produtiva é a utilização de um *Primer* para EVA com cura UV (e posterior passagem por um túnel de cura UV), tornando o processo mais padronizado e de melhor qualidade, além de baixar os custos operacionais.

A radiação UV vem sendo utilizada em vários processos de cura nos mais variados segmentos do mercado. Porém, a tecnologia LED chegou para poucos desses segmentos como no setor calçadista (mesmo possuindo inúmeras vantagens em comparação as lâmpadas UV convencionais), onde ainda há hesitação de uso pois o processo de fabricação do calçado já está bem estabelecido e qualquer mudança deve ser devidamente testada e analisada. No entanto já é conhecido de outros segmentos que a cura por LED-UV é melhor na sua profundidade, tem

uma intensidade de cura mais controlada, menor consumo de energia e menor temperatura, aquecendo menos o material e o equipamento (Santos, Oliva, 2014).

Neste contexto, a proposta de desenvolvimento de um equipamento utilizando a tecnologia LED, frente aos baseados em lâmpadas convencionais para cura UV, para a fabricação de calçados esportivos trará um produto inédito para o mercado com características bem atrativas para a indústria. A fim de comparação, um dos principais problemas do equipamento convencional é a alto consumo de energia, uma vez que possui uma potência elevada devido à baixa eficiência das lâmpadas UV, neste caso em específico irradiando em uma faixa maior de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, como na região do infravermelho.

### 1.1. JUSTIFICATIVA.

A sustentabilidade energética é a principal motivação para o desenvolvimento deste projeto de equipamento. Devido à baixa eficiência das lâmpadas de vapor de mercúrio, atribuída a sua alta emissão na região do infravermelho, equipamentos que as utilizam como fonte UV necessitam de uma unidade de ar-condicionado para refrigerar, além das lâmpadas, o interior do equipamento, com o objetivo de não deformar as solas de EVA durante o processo de cura.

Ao usar lâmpadas de LED-UV, por possuírem melhor eficiência de emissão e portanto baixo consumo, uma ventilação forçada já seria o suficiente para remover por convecção o calor produzido pelo seu uso, o que eliminaria a necessidade da unidade de ar-condicionado. promovendo assim uma redução do consumo elétrico além de possibilitar uma redução de tamanho do equipamento.

Outro fator também associado a sustentabilidade está na melhoria da eficiência operacional do equipamento, pois lâmpadas de vapor de mercúrio demoram a atingir a máxima emissão de UV, contribuindo para o consumo de energia sem estar em produção efetiva. Além do que, se for desligado o equipamento só poderá entrar em operação após o devido resfriamento destas lâmpadas.

Tais fatores fazem com que a grande maioria das fábricas de calçados deixem seus equipamentos ligados durante intervalos de trabalho, acarretando um maior consumo energético além de promover redução da vida útil destas lâmpadas, que já é aproximadamente dez vezes menor que a vida útil das lâmpadas LED-UV.



## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade do projeto de um equipamento novo voltado ao setor calçadista para a preparação de superfícies via cura de tinta por irradiação ultravioleta, a fim de substituir lâmpadas convencionais UV de vapor de mercúrio por lâmpadas de LED-UV.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Em complementação ao objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar a aplicabilidade e a viabilidade da substituição da lâmpada convencional por LED-UV, por caracterização da cura de tinta ou *primer* UV pela técnica ATR-FTIR e análise de perda de cor;
- b) definir as etapas de planejamento do projeto, nas fases de projeto informacional e conceitual do equipamento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. CURA POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Essencialmente um *primer*, verniz ou tinta de cura por ultravioleta são compostos líquidos com uma composição quase similar a qualquer outro com cura por evaporação. A diferença está na adição de um fotoiniciador que, ao ser exposto à radiação ultravioleta, desencadeia a cura. Esse processo de cura usa luz ultravioleta para começar uma reação fotoquímica que gera uma rede reticulada de cadeias poliméricas. Considerado um processo mais rápido e com temperatura mais baixa em comparação a outras tecnologias de cura, permite taxas mais rápidas de produção na indústria. Não utiliza solventes pois a cura ocorre por polimerização direta, ou seja, sem emissão de compostos orgânicos voláteis. (STOWE, RICHARD W., 1996).

A cura por radiação ultravioleta está presente nos mais variados segmentos do mercado, dentre eles os que mais se sobressaem são:

- a) na indústria moveleira para a cura de vernizes com maior produção;
- b) na serigrafia para a cura acelerada da tinta após a impressão;
- c) em um processo específico do setor calçadista para curar o *primer* que prepara as solas em EVA de calçados esportivos para a colagem, também usado com outros materiais além da cura de tinta UV na pintura das peças do calçado;
- d) na odontologia para a cura da resina em restaurações dentárias;
- e) no setor de reparo de pinturas automotivas para a cura após a aplicação do fundo, tinta e verniz, reduzindo muito o tempo do reparo;
- f) na estética para acelerar a cura de esmaltes e unhas de gel, entre outros.

#### 2.1.1. Mecanismo da cura UV

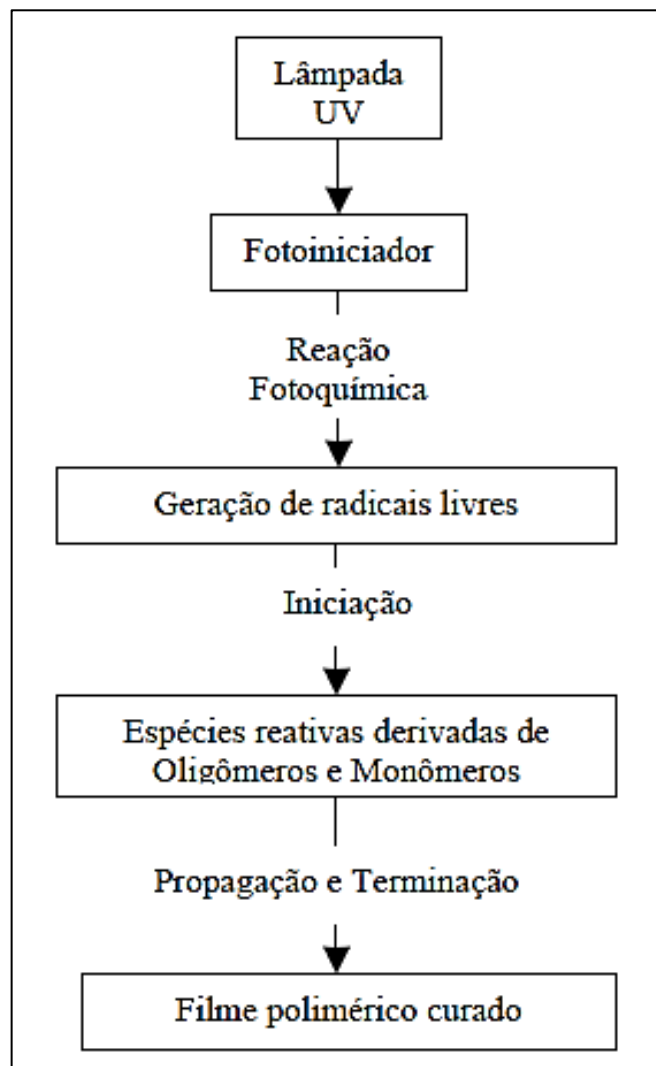
Para Santos e Silva (2014) para que ocorra a reação química entre os elementos da tinta UV deve haver provimento de energia ao composto químico, e o que fornece essa energia são as fontes de radiação eletromagnética. A cura por radiação requer a transmissão de fótons, por meio de processos físicos, emitidos em nível atômico desde a fonte até a tinta que deve ser

curada. Embora o contexto de emissão de fótons remeta a radiação eletromagnética semelhante à da luz, a radiação ultravioleta pode não ser percebida pelos olhos.

Ainda segundo Ruiz e Machado (2002), o processo de cura por radiação ultravioleta está dividido nas fases de iniciação, propagação e terminação, ocasionando em reações de polimerização. A cura ocorre basicamente com as moléculas do fotoiniciador absorvendo a radiação UV e formando radicais livres iniciando a reação de polimerização e de ligações cruzadas. A velocidade da cura está diretamente ligada à capacidade do fotoiniciador absorver os fótons e formar radicais livres.

Na Figura 1 está ilustrada a sequência simplificada das etapas da cura por meio da radiação ultravioleta.

Figura 1-Etapas da cura UV



Fonte: Adaptado de Ruiz e Machado (2002).

O processo de cura é bastante amplo e complexo, depende da natureza da cadeia polimérica envolvida. Tecnicamente, em termos gerais, sistemas fotopolimerizáveis envolvem em sua formulação a presença de diferentes-matérias primas como monômeros, oligômeros, aditivos e o fotoiniciador, que por meio de reações denominadas de polimerização, promovem a cadeia polimérica desejada.

Monômeros são unidades moleculares (meros) que se unem com outras unidades formando cadeias maiores denominadas polímeros. As principais condições para sua seleção são: o efeito e velocidade de fotopolimerização e a viscosidade além de ter influência direta nas propriedades do material final.

Oligômeros são um determinado número de monômeros combinados de forma sequencial. Possibilitam ao substrato uma maior variedade de alternativas para a sua elaboração de resinas para as mais diferentes aplicações. Os aditivos ajudam a modificar o substrato para atingir as propriedades desejadas.

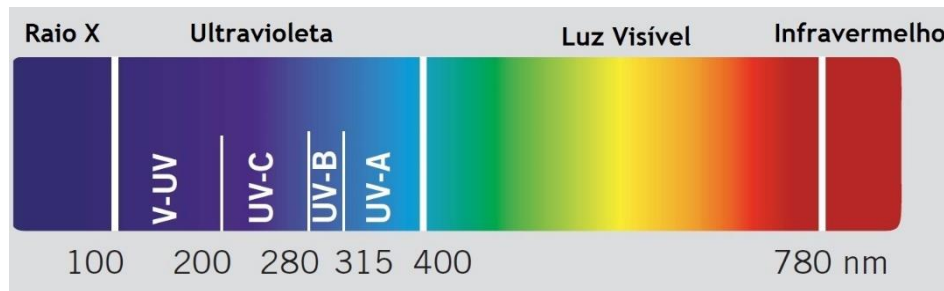
O fotoiniciador é um dos principais componentes, basicamente quando é exposto à radiação UV, a qual é absorvida por sua cadeia atômica promovendo a ruptura de ligações covalentes, levando a produção de espécies reativas, radicais ou íons que iniciem a polimerização do sistema. Tais espécies, agora livres, se unirão com outras unidades de monômeros em um processo contínuo de propagação da cadeia polimérica até atingir a massa molecular desejada, estabelecendo assim a cura do material.

Cabe ressaltar que o excesso de exposição à radiação UV pode levar a modificação das propriedades mecânicas pelo enrijecimento do material, devido à formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, podendo desencadear a formação de trincas e fissuras (RODRIGUES e NEUMANN, 2003)

### **2.1.2. Tipos de radiação UV**

A radiação UV tem comprimento de onda de 100 nm a 400 nm, está subdividida tradicionalmente, segundo Tatiana Santana Balogh (2010), conforme sua faixa de comprimento de onda denominando UVC variando de 100 nm a 290 nm, UVB de 290 nm a aproximadamente 320 nm e UVA de aproximadamente 320 nm a 400 nm, conforme espectro da Figura 2. Ainda UVA, dividindo-se em UVA1 de 340 nm a 400 nm e UVA2 variando de 320 nm a 340 nm.

Figura 2-Espectro eletromagnético com as variações de UV

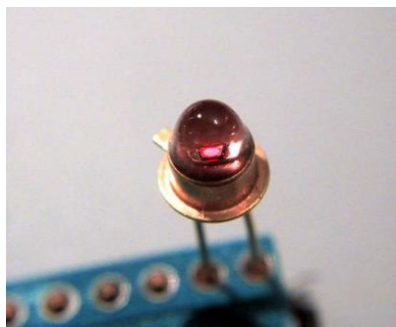


Fonte: Sensor Technology (2019).

## 2.2. HISTÓRIA DO LED

Segundo o site Foxlux em uma matéria sobre a história dos LEDs, ele foi inventado em 1963 e posteriormente usado para indicar estado em aparelhos eletrônicos como televisores e rádios, tinha baixa intensidade e era encontrado somente na cor vermelha, se assemelhava com o ilustrado na Figura 3.

Figura 3-Exemplar da primeira geração de LEDs com padrão na cor vermelha



Fonte: Associação de Tecnologia Vintage

No fim dos anos 60 foi produzido na cor amarela também com baixa intensidade. Na cor verde, e com uma intensidade um pouco maior foi criado por volta de 1975 possuindo comprimento de onda de 550 nm. Então somente no início de 1990 foram criados LEDs com comprimentos de ondas menores nas cores ciano e azul, o que proporcionou posteriormente para a fabricação da cor branca e assim todo o espectro de cores no final dos anos 90. Passando a ser uma fonte de iluminação promissora nas mais diversas áreas e segmentos.

Por volta dos anos 2000 foram criados em comprimento de onda na região do ultravioleta (por volta de 100 nm- a 400 nm), e desde então começou a ser utilizado em alguns

processos e equipamentos por conta das inúmeras vantagens do LED em comparação a outras fontes de radiação ultravioleta.

Segundo Batista et al (2015), a praticidade do LED se deve ao fato de ele ser compacto e pode ser aplicado em diversos lugares, além de ser fabricado com materiais não tóxicos ao meio ambiente. A relação de uma lâmpada incandescente para uma LED é de quatro para um, ou seja, equivalência de lâmpada de 60 W para uma de 15 W que usa a tecnologia LED.

### **2.2.1. Tecnologia LED aplicada a cura por UV**

Embora já existam a mais de uma década a utilização de LEDs UV, estes não estão inseridos em todos os setores da indústria que utilizam processos por cura por UV. Entretanto, onde já estão inseridos, estes apresentam vantagens atraentes frente a processos convencionais de cura UV.

Para sua utilização na cura é necessário que o substrato seja desenvolvido com as propriedades específicas para a sua faixa de emissão, assim devendo ter o fotoiniciador e elementos fotoreativos adequados.

O site Alborum, em um artigo dedicado às novas tecnologias de cura UV cita algumas vantagens e desvantagens da cura por LED UV em relação às lâmpadas de vapor de mercúrio. Abaixo estão citadas as principais vantagens e características:

- a) uma característica das lâmpadas UV convencionais de vapor de mercúrio é a baixa eficiência energética devido a ela emitir em uma faixa espectral muito ampla, incluindo IR (infravermelho) que acaba irradiando calor para o sistema. Enquanto para o LED a faixa é bem mais estreita irradiando menos calor. A temperatura de trabalho das lâmpadas convencionais é cerca de 300 °C enquanto no LED por volta de 60 °C, diminuindo bastante o sistema de ventilação e refrigeração do equipamento;
- b) as lâmpadas de vapor de mercúrio por emitir em faixa mais ampla acabam emitindo na faixa do UVC, que é a radiação com comprimento de onda de 100 nm a 290 nm. Na radiação de 254 nm as moléculas de oxigênio do ar reagem entre si criando ozônio, que deve ser extraído do meio para que não bloqueie a faixa de UV necessária para a cura. No entanto como o LED emite uma faixa mais estreita e em um comprimento de onda maior, acaba por não produzir ozônio;

- c) o acendimento do LED é instantâneo e em milissegundos ele já emite 100% da sua potência, podendo ser ligado somente quando for necessário, economizando energia pois as lâmpadas de vapor de mercúrio necessitam de um tempo de aquecimento para sua máxima emissão e, após serem desligadas, necessitam de um tempo de resfriamento antes de serem religadas novamente;
- d) uma das características principais do LED é sua vida útil, que pode chegar a 20.000 horas enquanto uma lâmpada tradicional de vapor de mercúrio de 1.000 a 2.000 horas;
- e) além de durar mais, o LED não possui mercúrio em sua fabricação, enquanto as lâmpadas tradicionais têm uma pequena quantidade, sendo necessário dar uma maior atenção no descarte no final de sua vida útil.

Claramente se sobressaem as vantagens, mas o LED também possui algumas desvantagens listadas a seguir:

- a) a cura por UV LED necessita que o substrato seja fabricado com fotoiniciadores específicos para esse sistema, que ainda não são tão comuns no mercado como os tradicionais;
- b) além dos fotoiniciadores para cura UV LED não serem tão comuns, seu preço também é elevado;
- c) outra desvantagem é o preço do próprio LED, chegando a custar quase o dobro de uma lâmpada UV convencional.

### 2.3. PROCESSO E APLICAÇÃO DA CURA UV NO SETOR CALÇADISTA

A cura por meio do UV é usada no setor calçadista para altas produções na confecção de calçados esportivos preparando a sola ou entressola em EVA juntamente com um *primer*, para a colagem no cabedal, sem esta preparação EVA não adere à cola usada, por uma característica resultante do processo de fabricação da sola.

Também pode ser usada para curar a tinta UV de partes pintadas de calçados, assim proporcionando altas taxas de produção na indústria calçadista, sendo uma alternativa rápida e atrativa para imprimir nos calçados logomarcas e detalhes.

O equipamento usado para esse fim é denominado Túnel UV, conforme os apresentados na Figura 4, e embora haja outras tecnologias e processos para a preparação para a colagem das solas em EVA, esta é a mais aceita e mais procurada, pois ainda é a que menos agride a saúde do trabalhador e ao meio ambiente.

Figura 4-Túneis comerciais para a cura ultravioleta usados no setor calçadista



Fonte: Máquinas Tecnomaq (2019).

Atualmente na fabricação do calçado são utilizados *primers* de cura por radiação UV e posteriormente adesivos a base de PU principalmente quando a base é o EVA. As etapas são basicamente: limpar a sola e entressola ilustradas na Figura 5, com base aquosa ou solvente orgânico, aplicar com pincel ou por imersão o *primer* UV, cura pela exposição à radiação UV transformando a solução líquida em polímero seco e insolúvel por meio da reticulação e polimerização. Após é aplicado o adesivo a base de PU que deve ser seco por ventilação quente ou não e aquecido para ser reativado. Só então a sola estará pronta para a colagem, garantindo a assim total aderência do EVA à cola que unirá ao cabedal (DA ROSA et.al., 2012).

Figura 5-Partes de um calçado esportivo utilizados no processo de colagem



Fonte: Adaptado de Silvestre dos Santos (2007).



Segundo a indústria calçadista, no setor normalmente são utilizados túneis UV, que são equipamentos grandes e pesados que consomem uma boa quantidade de energia elétrica, e os parâmetros de processo utilizados já estão bem definidos e consolidados, por isso há certo receio na aceitação de novos processos e tecnologias.

Outra etapa da fabricação do calçado que utiliza a cura UV é a pintura de peças de calçado por um processo semelhante ao usado na serigrafia. Basicamente, este processo consiste em aplicar uma tinta UV com um rodo de borracha por intermédio de uma tela permeabilizada com a figura ou logomarca que se deseja imprimir na peça do calçado. Além de ser muito produtivo e eficiente, este método de aplicação é muito versátil pois possibilita a aplicação nos mais variados materiais rígidos ou flexíveis como PVC, vinil, policarbonato e outros. Este processo também é adequado por ser barato e com alta taxa de produção, aliado à tinta UV que tem o mais rápido tempo de cura. Abaixo Figura 6 ilustra o processo de serigrafia utilizado para aplicação da tinta UV (BROSKA, 2012).

Figura 6-Tela e rodo para aplicação de tinta UV



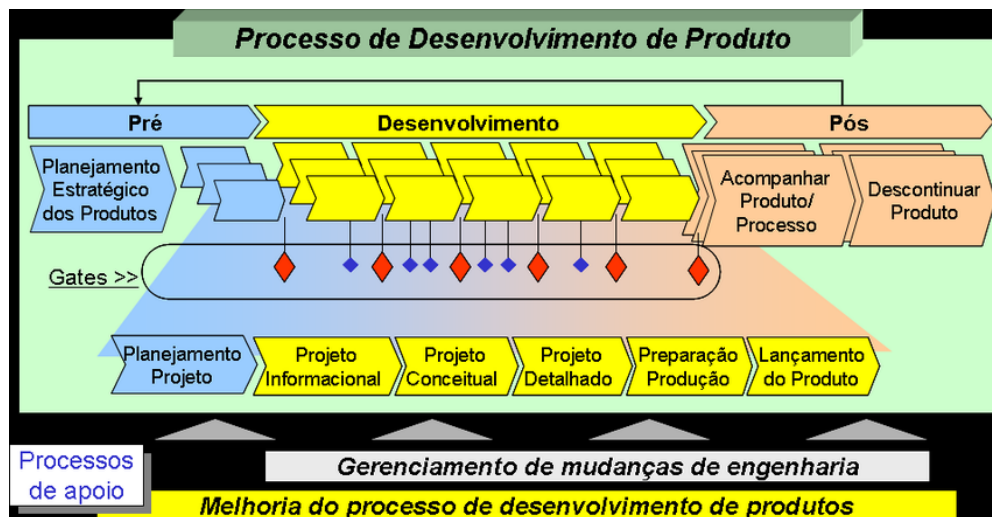
Fonte: Imagem da internet (2019).

#### 2.4. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

O Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) é um modelo que auxilia a dar rumo ao projeto, para que ele se desenvolva e seja produzido o mais próximo a sua real necessidade, maximizando as alterações e mudanças de projeto no decorrer do desenvolvimento. Ele ajuda a tomada de decisão e a ter entendimento de quais são as reais necessidades e prioridades.

Segundo Rozenfeld et al. (2006) para que os passos de desenvolvimento de um produto sejam feitos com uma referência e possa ser repetido por várias pessoas em diversos produtos em desenvolvimento, deve ser documentado na forma de um padrão. Também ao final de cada fase, a qual permanece congelada e todas as informações necessárias e decisões tomadas para se prosseguir para a próxima fase são obtidas na anterior. O modelo de referência sugerido pelo citado autor está ilustrado na Figura 7.

Figura 7-Modelo de referência do PDP, segundo Rozenfeld et al. (2006)



Fonte: Rosenfeld et al. (2006).

Outro modelo também muito interessante é apresentado por Back et al. (2008) com um passo a mais denominado Projeto Preliminar entre o Projeto Conceitual e Detalhado além de uma Validação do projeto na fase de Implementação, conforme Figura 8.

A fase de Projeto é dividida então em Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado explanados nas demais seções.

Figura 8-Modelo de referência do PDP, segundo Back et al. (2008)



Fonte: adaptado de Back et al. (2008).

## 2.4.1. Fases do Projeto

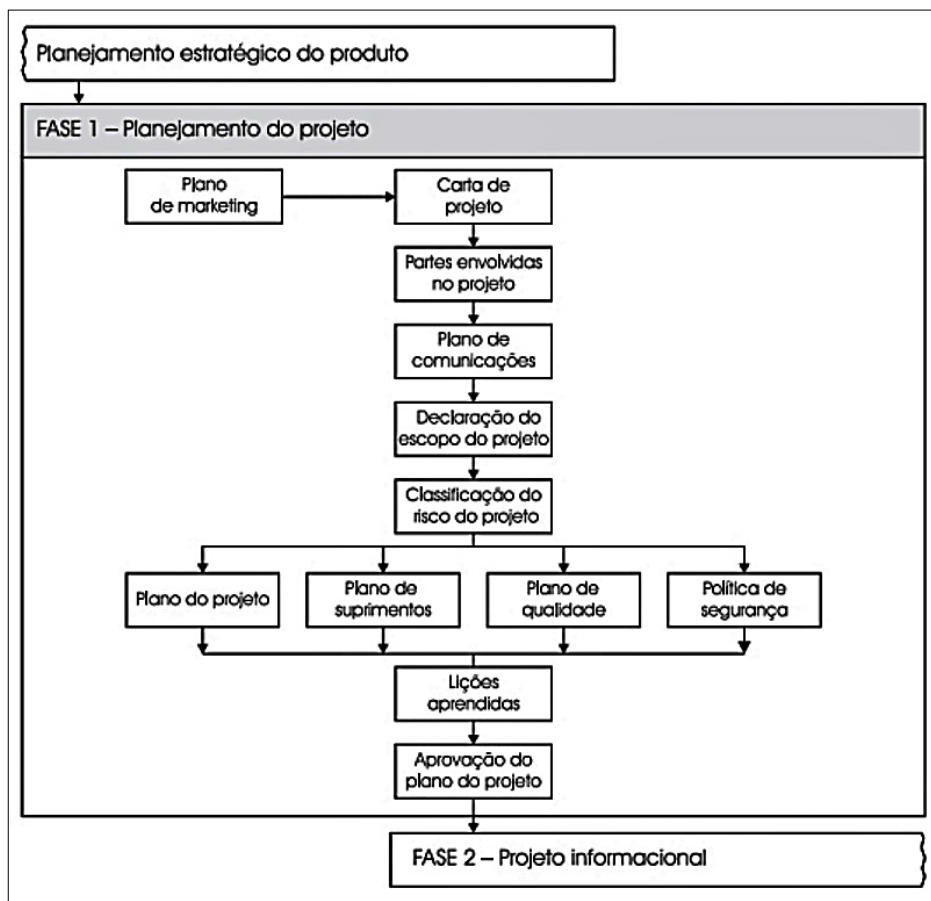
### 2.4.1.1. Planejamento do Projeto

Segundo Back et al. (2008) devido à quantidade cada vez maior de pessoas trabalhando e envolvidas no projeto de produtos cada vez maiores, e a permanente necessidade de atender o mercado cada vez mais rapidamente e com qualidade e inovação, a necessidade de aplicar um bom gerenciamento de projeto é essencial. Assim, na Figura 9 tem-se um fluxograma da fase de planejamento do projeto com todas as etapas pertinentes para concluir esta fase.

No decorrer da dinâmica do Planejamento do Produto é determinado o que deve ser feito e quando deve ser feito, com base nas diretrizes do projeto, analisando restrições, custos e suas relações. Assim podendo guiar as ações e as decisões pertinentes para dar rumo ao projeto.

Para Norton (2013) é extremamente importante que todas as etapas do projeto sejam devidamente documentadas, registrando todas hipóteses e decisões em ordem cronológica para que todo o raciocínio possa ser recriado em caso de reformulação do projeto.

Figura 9-Fluxograma da fase de planejamento do projeto



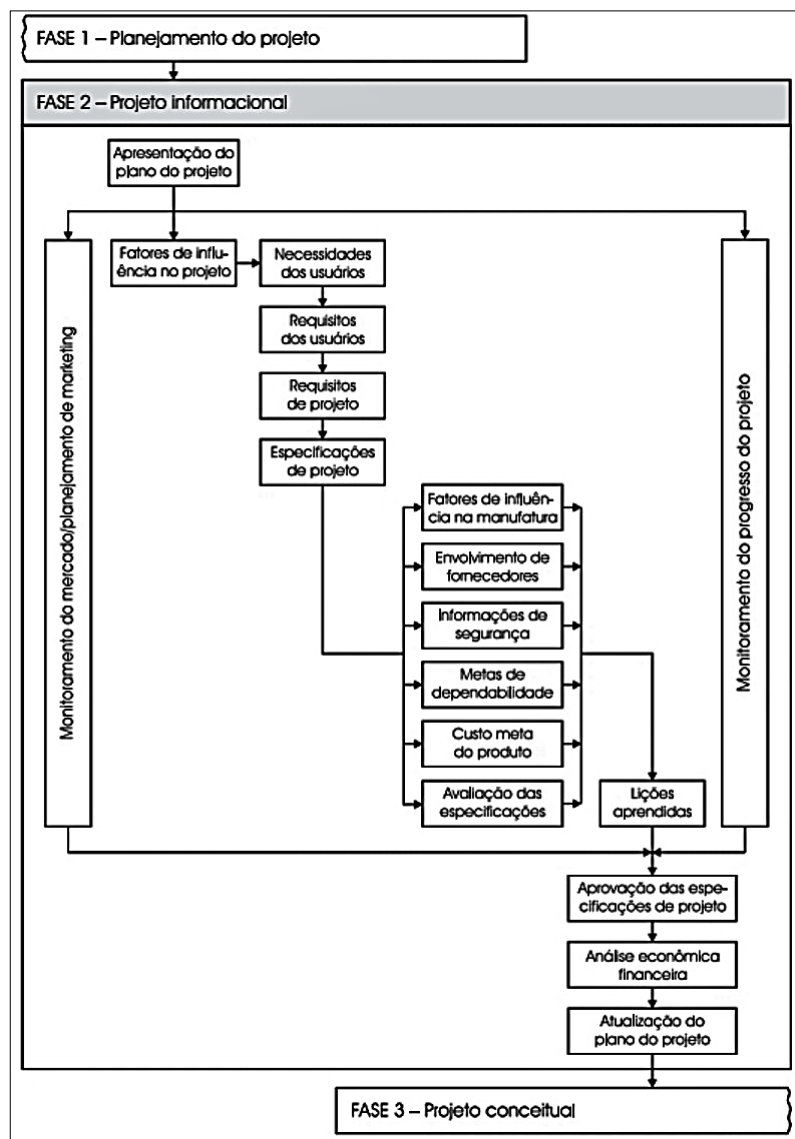
Fonte: Back et al. (2008).

### 2.4.1.2. Projeto Informacional

Nesta etapa são obtidas e reunidas todas as informações necessárias, para depois serem analisadas e servirem para dirigir a tomada de decisão e elaboradas as especificações do projeto, seguindo os passos conforme o fluxograma da Figura 10.

Após dado andamento ao plano de projeto, são necessárias várias ações que têm como objetivo a determinação dos fatores mais importantes para o projeto. São então apontadas todas as necessidades de usuários e clientes e todos os requisitos do projeto, além de analisados os equipamentos similares do mercado, seus defeitos e qualidades para então estabelecer as especificações do projeto (Back et al.,2008).

Figura 10-Fluxograma da fase de projeto informacional

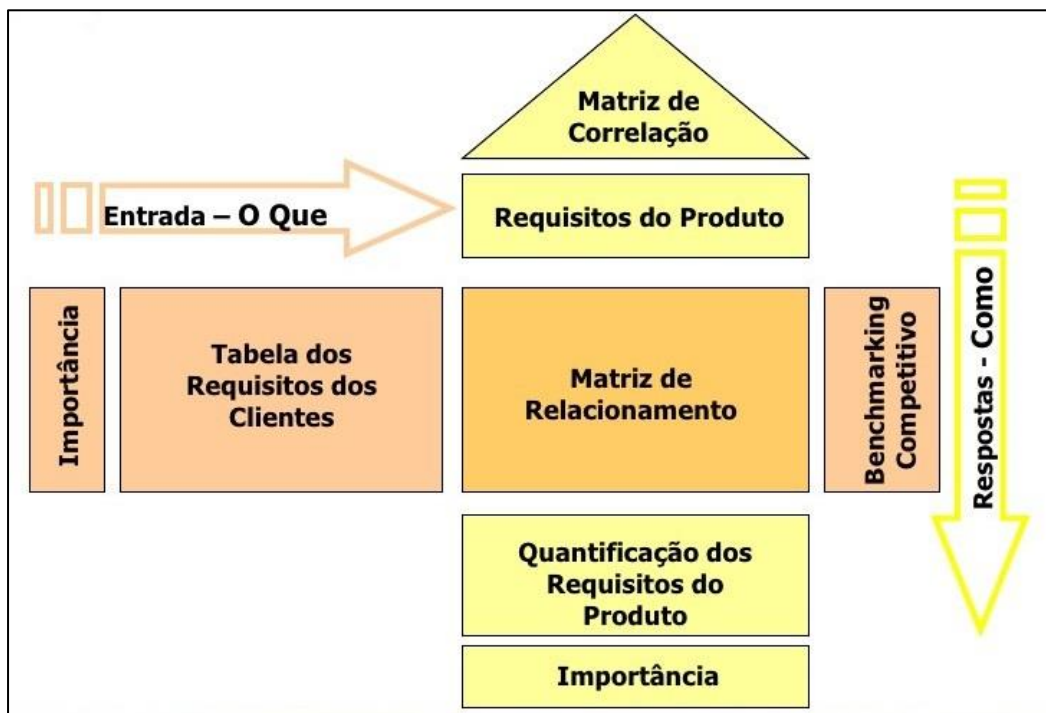


Fonte: Back et al. (2008).

Os clientes de quem está envolvido na elaboração de um projeto não é somente quem irá comprar o produto, mas também quem irá vendê-lo, quem irá prestar assistência ou até quem irá fazer a manutenção nele. Pois todos contam com que ele atenda um nível solicitado de especificações.

Uma ferramenta muito usada nesta fase é o Desdobramento da Função Qualidade, QFD, também conhecido como Casa da Qualidade ilustrada na Figura 11, que auxilia e reduz o tempo de projeto pela diminuição de alterações de projeto, auxiliando também a tomada de decisão.

Figura 11-QFD (Desdobramento da Função Qualidade)



Fonte: Reis (2012).

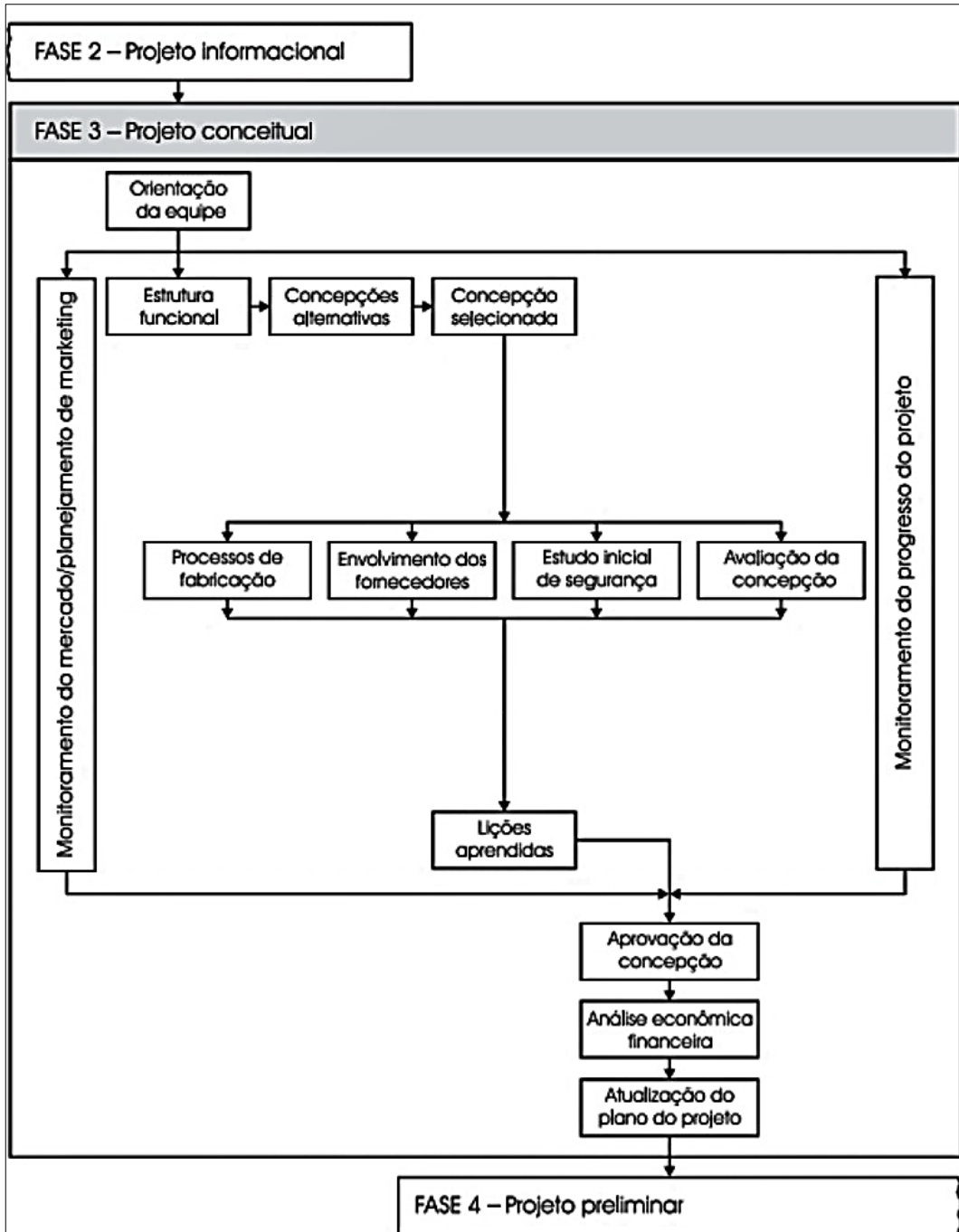
#### 2.4.1.3. Projeto Conceitual

Esta etapa busca a idealização de soluções para as questões da etapa anterior, mesmo tendo uma ou mais soluções óbvias, deve-se usar a criatividade para inovar. É provavelmente a fase mais importante, pois decisões tomadas nela são muito relevantes para as próximas fases e para o produto final.

Back et al. (2008) destaca que nesta fase é criada a concepção do produto, além de ser definida sua função global e subfunções a serem realizadas. Também são ponderados conceitos

alternativos da estrutura funcional sempre acompanhando o mercado para analisar possíveis informações que podem mudar a concepção do produto. Também é possível observar as etapas no fluxograma da Figura 12.

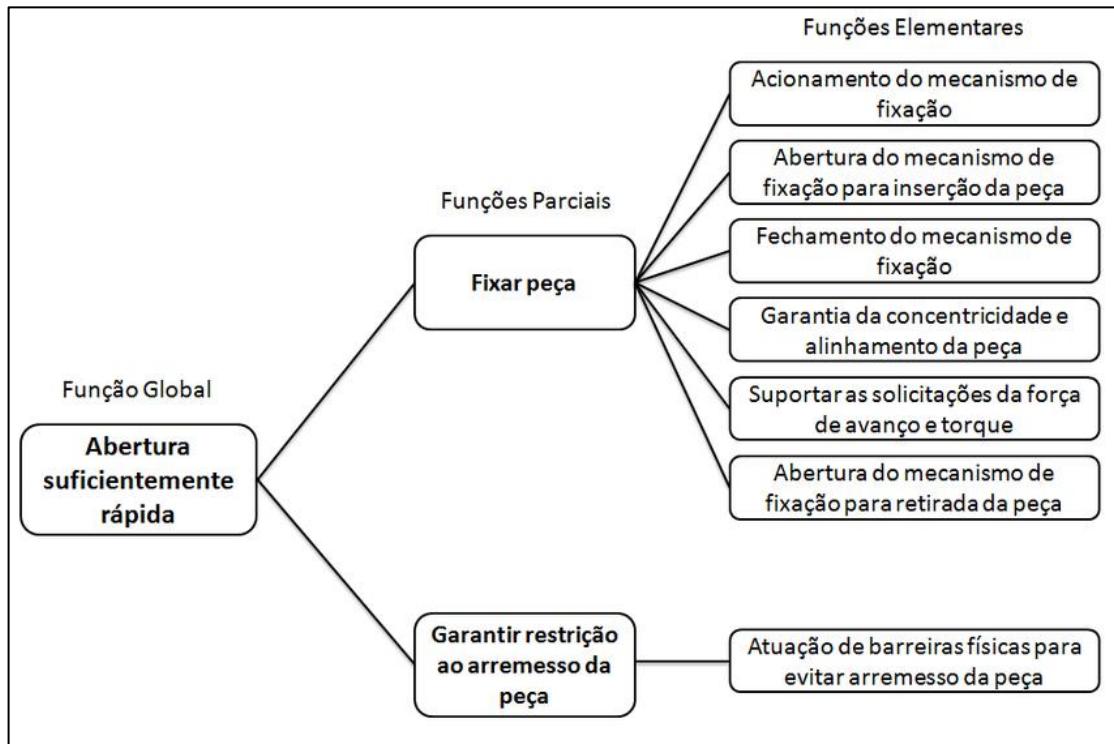
Figura 12-Fluxograma da fase de projeto conceitual



Fonte: Back et al. (2008).

Cabe também criar uma Estrutura de Funções ilustrado na Figura 13 com as soluções das funções elementares e uma Matriz Morfológica conforme Figura 14 e 15 atribuindo notas as especificações para ajudar a tomada de decisão.

Figura 13-Estrutura de Funções



Fonte: Rodrigo Blodorn (2010).

Figura 14-Matriz Morfológica

MATRIZ MORFOLÓGICA

FUNÇÕES ELEMENTARES	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO			
	PS1	PS2	PS3	PS4
Alimentar máquina	Manual	Sistema de calha	Automático: manipuladores	Esteira
Fixar peça	Morsa manual	Morsa pneumática	Morsa hidráulica	Gabarito
Movimentar peça	Mesa giratória	Cilindro pneumático	Esteira	Automático: manipuladores
Realizar furação passante D5	Simultânea/ cabeçote simples	Simultânea/ cabeçote múltiplo	Individual/ cabeçote simples	Corte jato d'água
Movimentar peça	Mesa giratória	Cilindro pneumático	Esteira	Automático: manipuladores
Realizar furação D8 e rebaxe D18 - 45°	Simultânea/ Broca escalonada D8-D18	Individual: Broca e fresa	Simultânea/ Broca especial com inserto metal duro	Broca metal duro D8 e broca especial D18
Movimentar peça	Mesa giratória	Cilindro pneumático	Esteira	Automático: manipuladores
Realizar furação D8 e rebaxe D18 - 0°	Simultânea/ Broca escalonada D8-D18	Individual: Broca e fresa	Simultânea/ Broca especial com inserto metal duro	Broca metal duro D8 e broca especial D18
Movimentar peça	Mesa giratória	Cilindro pneumático	Esteira	Automático: manipuladores
Escarear furos	Broca	Escareador	Rebolo	Lixa
Movimentar peça	Mesa giratória	Cilindro pneumático	Esteira	Automático: manipuladores
Descarregar peça	Manual	Sistema de calha	Automático: manipuladores	Esteira

Fonte: O autor (2018).

Figura 15-Resultados da Matriz Morfológica

RESULTADOS			
Nestor	Renan	Guilherme	Cassiano
PS2	PS4	PS4	PS2
PS3	PS4	PS2	PS2
PS1	PS2	PS3	PS1
PS2	PS1	PS4	PS2
PS1	PS2	PS3	PS1
PS2	PS3	PS1	PS1
PS1	PS2	PS3	PS1
PS2	PS3	PS1	PS1
PS1	PS2	PS3	PS1
PS2	PS1	PS3	PS2
PS1	PS2	PS3	PS1
PS4	PS1	PS4	PS2

Fonte: O autor (2018).

#### 2.4.1.4. Projeto Preliminar

De acordo com Back et al. (2008), nesta fase se define o aspecto final do produto e se inicia o estudo da viabilidade técnica e econômica do projeto, conforme a Figura 16.

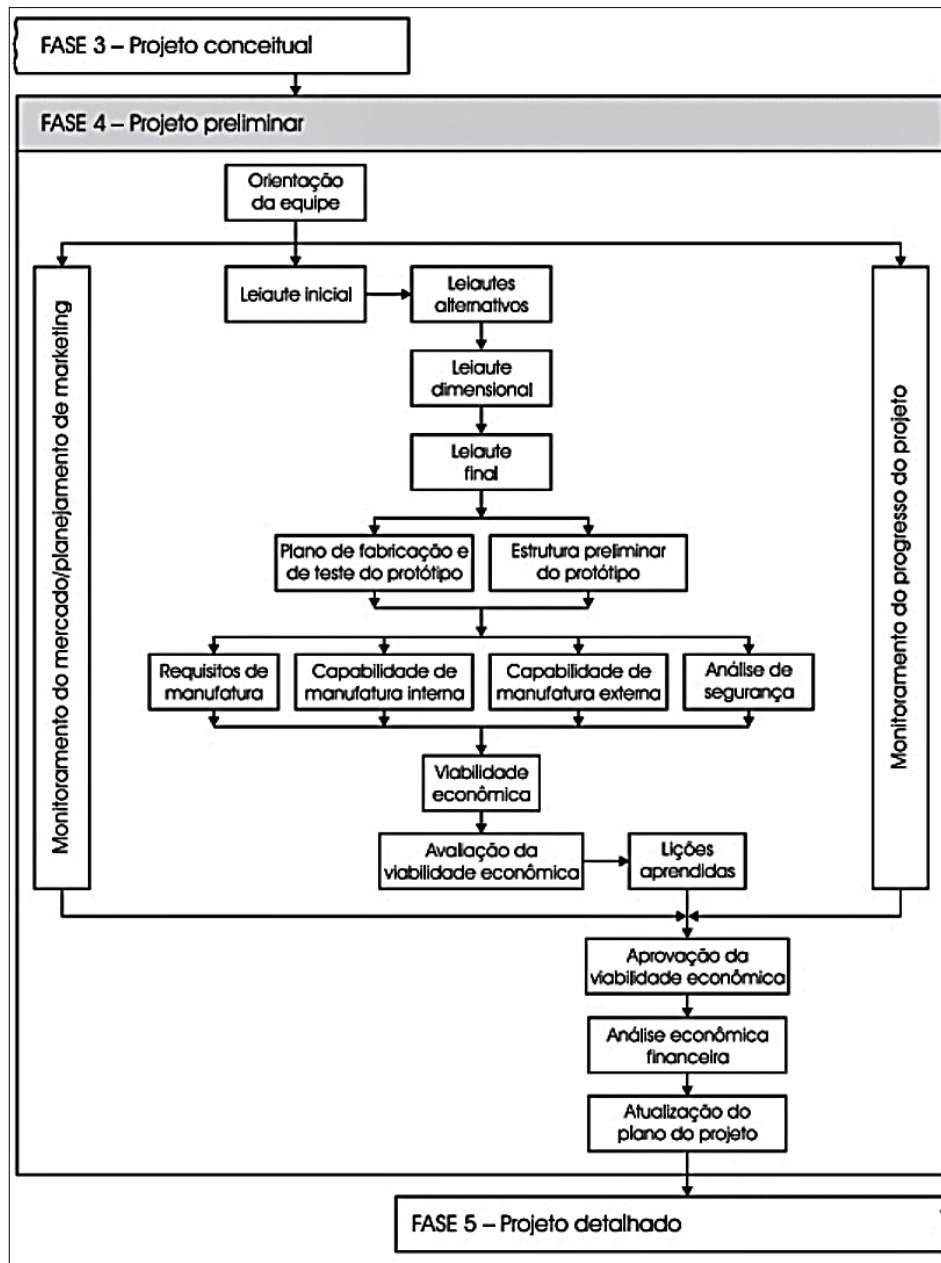
Algumas tarefas são definidas para ajudar a chegar à fase final com eficiência e menos reprojeito, entre elas, dimensões gerais, aspectos de segurança e ergonomia, materiais, componentes e manufatura. Para auxiliar podem ser criados modelos virtuais de um protótipo para simulações.

Esses modelos podem ser:

- a) icônico, que servem para analisar o projeto vários pontos de vista;
- b) analógico, modelo reduzido do produto para analisar suas funcionalidades;
- c) numéricos, são equações matemáticas que retratam as leis físicas e químicas que reagem com as propriedades do projeto;
- d) computacional, por meio do sistema CAD para verificar mais apuradamente montagens, colisões, gerar simulações. Ainda o sistema CAE, mediante ao Método de Elementos Finitos para analisar esforços e até mesmo sua vida útil.



Figura 16-Fluxograma da fase de projeto preliminar



Fonte: Back et al. (2008).

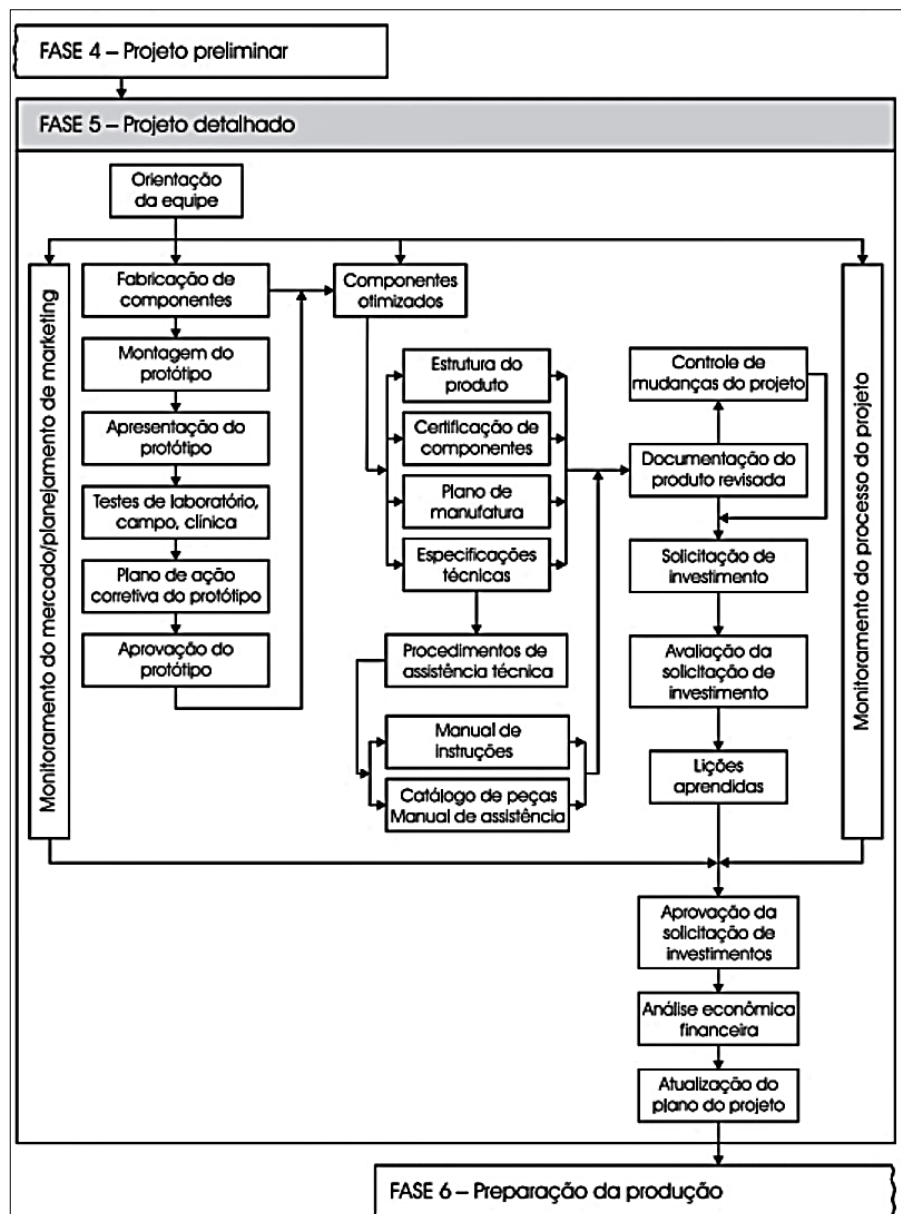
#### 2.4.1.5. Projeto Detalhado

A última fase do desenvolvimento do projeto serve para transformar todo o conceito estudado nas fases anteriores em um projeto para ser manufaturado. Todo o detalhamento para a produção com as tolerâncias, tratamentos térmicos e superficiais é feito. Após são criadas as pastas com os desenhos específicos para cada setor da fábrica, além de lista de componentes, manuais de montagem, operação, manutenção e listas de controle. Todo o necessário para a produção em série.

Para Norton (2013) no estágio do projeto detalhado podem ser criados modelos matemáticos de engenharia para analisar todas as variáveis envolvidas, tais como carregamentos, deformações, locais de falhas, entre outros. Avaliando também as propriedades dos materiais escolhidos para determinar a segurança ou se há falha em algum elemento.

Segundo Back et al. (2008) os objetivos desta etapa são, término das determinações dos componentes usados, validação do protótipo após teste de campo, preparação da solicitação de investimento, além do detalhamento para manufatura. Após é estabelecida a revisão de toda a documentação gerada e iniciada o plano de controle de mudanças de projeto. Na Figura 17 estão os propósitos a serem seguidos para a para a conclusão da fase.

Figura 17-Fluxograma da fase de projeto detalhado



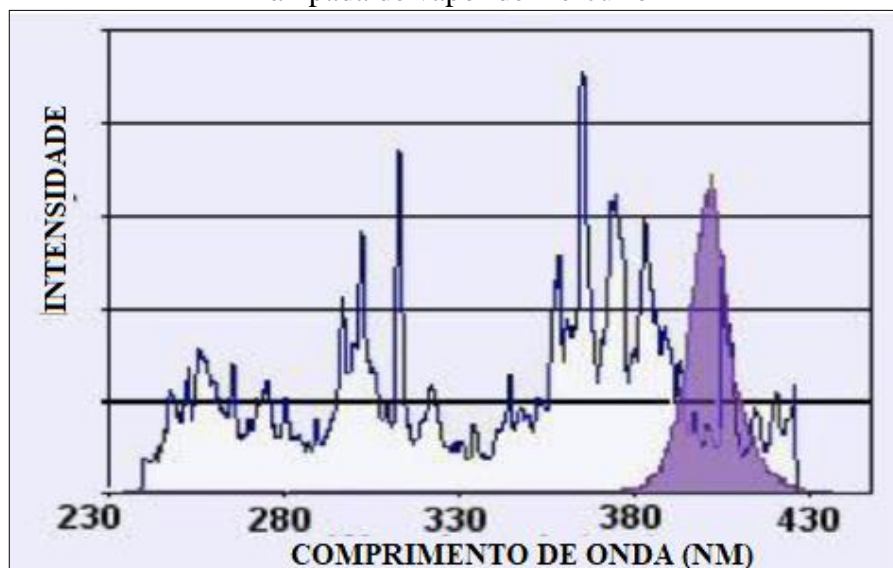
Fonte: Back et al. (2008).

## 2.5. ELEMENTOS DE UM EQUIPAMENTO DE CURA UV

O Sistema de transporte serve para mover o material a ser curado através do túnel que contém a fonte de radiação UV. Sua velocidade e funcionamento são os principais responsáveis para uma boa cura. A alta velocidade causa uma falta de exposição e a baixa velocidade um excesso de exposição à radiação ultravioleta, comprometendo diretamente a polimerização. A determinação desta velocidade é um verdadeiro impasse, pois depende diretamente do processo anterior e características do material e substrato aplicado a ser curado.

O sistema emissor de radiação UV é o coração e o principal elemento para que o equipamento funcione, além de ser o que mais gera consumo energético e um dos componentes mais caros, este é indispensável pois é o maior encarregado pelo processo de polimerização. A fonte emissora pode ser lâmpadas do tipo vapor de mercúrio, ou em alguns equipamentos mais modernos diodos emissores de luz (LED's). O espectro de emissão das duas fontes pode ser comparado na Figura 18.

Figura 18- Espectro de emissão do LED UV (linha preenchida) comparada a emissão da lâmpada de vapor de mercúrio



Fonte: Adaptado de Vicent J. Cahill, RADTECH.

Assim as principais vantagens do LED em comparação a lâmpada de mercúrio estão relacionadas a maior eficiência energética, um espectro de luz mais estreito, menor aquecimento, entre outros. Já a lâmpada de mercúrio tem como característica emitir em uma faixa muito ampla do espectro eletromagnético, mas somente uma faixa estreita é aproveitada pelo elemento fotoiniciador, além da lâmpada emitir radiação em todas as direções sendo necessário o uso de um refletor. Por esses motivos sua eficiência energética é bastante reduzida

(VISIONCURE, 2014). Outra característica importante no processo de cura está associada aos diferentes tipos e formulações dos substratos aplicados, pois nestes casos podem ser necessários diferentes faixas de emissão do ultravioleta para que a cura seja mais eficiente, e essa seletividade é mais bem explorada pela tecnologia LED.

Os refletores são responsáveis por convergir a radiação para os pontos que irão passar o material. Pelo fato da lâmpada de vapor de mercúrio emitir radiação para todos os lados o uso de um refletor melhora em até 50% a eficiência de cura. O refletor ideal deveria absorver radiação infravermelha e refletir a ultravioleta. Normalmente são de alumínio com aletas formando um trocador de calor para ajudar a dissipar o calor gerado pela lâmpada, em alguns casos é usado uma lâmina de inox para melhorar a reflexão conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19-Refletores para lâmpada de vapor de mercúrio



Fonte: O autor (2019).

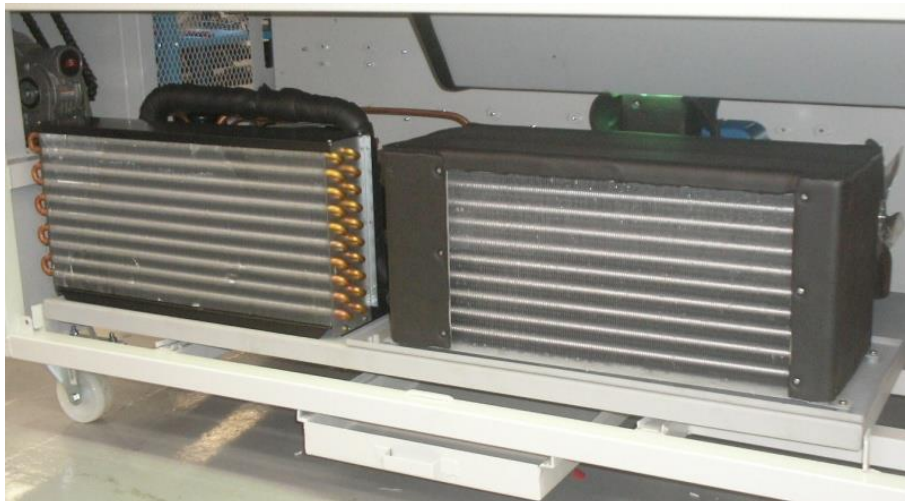
Qualquer tinta de cobertura, verniz ou *primer* podem passar pelo processo de polimerização por meio do UV, desde que tenham em sua formulação um fotoiniciador, responsável por desencadear a cura. O substrato já é fabricado com todos seus componentes da sua fórmula, sem a adição do fotoiniciador posteriormente na indústria em que irá ser utilizado. Além do fotoiniciador, que compõe apenas 10% do substrato, normalmente é adicionado um outro aditivo para controle da cura, estes são os fotossensibilizadores que conseguem absorver a radiação ultravioleta e depois transferi-la para os fotoiniciadores. Também adicionado para melhorar a reação, são adicionados fotoativadores. Um fator que altera a penetração da radiação UV no substrato é o tipo de pigmentação e a quantidade do fotoiniciador.

Devido a grande geração de calor pelas lâmpadas ultravioletas convencionais, um túnel de cura necessita de um sistema de exaustão e algumas vezes de refrigeração para que a lâmpada não aqueça demais diminuindo drasticamente sua vida útil, além de manter o meio de passagem a uma temperatura de cura controlada, evitando assim que o material base aqueça e deforme. Assim como a falta de refrigeração, o excesso de refrigeração também reduz a vida útil da lâmpada convencional, o que dificulta sua estabilização já que ela necessita de aquecimento para atingir sua máxima eficiência de emissão. Na Figura 20 pode-se observar a unidade de ar condicionado de um túnel UV que utiliza lâmpadas de vapor de mercúrio, com o evaporador a direita e o condensador a esquerda.

A exaustão se faz necessária também, em um equipamento com lâmpadas de vapor de mercúrio, para remover o ozônio formado pela ionização do oxigênio do ar por meio da radiação UVC, que conforme mencionado, acaba criando uma barreira para as faixas de UVA e UVB que são necessárias para a cura, diminuindo sua eficiência (SANTOS, OLIVA, 2014 apud BECKER, 2010).

Embora uma fonte LED gere menos calor e não emita UVC, ainda assim há a necessidade de pelo menos um sistema de exaustão no interior do túnel.

Figura 20-Unidade de refrigeração de túnel UV convencional



Fonte: O autor (2019).

No caso do uso da lâmpada de vapor de mercúrio é necessário o uso de transformadores para adequar e elevar a tensão da rede pública para o padrão exigido pelas lâmpadas, e assim propiciar uma descarga elétrica necessária para iniciar o processo de ionização do mercúrio. Além de também estabilizar a corrente que passa pelas lâmpadas, que se esta for elevada

ocasiona na diminuição da vida útil e, se for reduzida, ocasionam irregularidades na estabilização e emissão de UV limitada.

Na Figura 21 pode-se ver os transformadores usados em um túnel de cura UV que ligam as lâmpadas UV de vapor de mercúrio.

Figura 21-Transformadores usados em um túnel UV



Fonte: O autor (2019).

## 2.6. EXEMPLO DE EXPERIMENTOS NA ÁREA DE CURA UV LED.

Santos e Silva (2014), em seu trabalho na área de cura de tintas e vernizes industriais, a fim de avaliar a cura de um verniz específico usando LED-UV realizaram testes de reatividade, alastramento, dureza lápis, aderência e brilho especular, chegando a conclusão de que a cura por LED-UV em comparação a lâmpada UV apresenta-se mais viável em razão da cura por LED, por manifestar condições de reações de cura mais severas com menor consumo de energia. Também foi possível atestar todas as outras vantagens da utilização do LED já citadas no texto acima, como menor temperatura de trabalho e melhor aproveitamento de energia.

De acordo com Pastorello et al (2015) em projeto realizado pela empresa Ultragaz, juntamente com a empresa UV Tronic, visando melhorar a resistência ao contato mecânico de recipientes de 13 kg, foi adotada a pintura com tinta UV e posteriormente a cura com LED UV.

Ainda antes dos testes decisivos foi notável a melhora da qualidade e brilho da pintura. Já no teste, que consistia em embarcar os recipientes em uma carreta para um trajeto de 500 km, e analisado a diferença na pintura, que são muito nítidas conforme Figura 22.

Figura 22-Comparação dos recipientes pintados

Tinta convencional:



Tinta UV:



Fonte: Pastorello et al (2015).

Ainda com a mudança do mecanismo de pintura dos recipientes a empresa projetou uma economia no gasto com a tinta de 35%. Além da alta durabilidade da pintura fazendo com que a manutenção seja menos frequente.

### 3. MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas todas as etapas e ferramentas usadas para a concretização do que foi proposto nos objetivos geral e específicos.

#### 3.1. LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES

A ideia para a melhoria de um equipamento surgiu principalmente da necessidade do mercado e dos clientes. A principal ideia foi mudar o emissor de radiação UV gerada por lâmpadas de vapor de mercúrio, para diodos emissores de luz já frequentemente usado em outros setores do mercado, trazendo significativos benefícios para o setor de máquinas para calçados produzidas pela empresa Máquinas Tecnomaq.

As principais reclamações dos clientes são a curta vida útil das lâmpadas de vapor de mercúrio e de seu alto consumo de energia elétrica associado. Isso se deve a alta potência das lâmpadas usadas e ao fato da máquina necessitar de uma unidade de ar condicionado para refrigerar o túnel de cura.

Assim, com a mudança das lâmpadas para LED não seria mais necessário a unidade de ar condicionado pois estas lâmpadas aquecem menos. Segundo artigo do site Alborum (2014) as lâmpadas de mercúrio podem gerar temperaturas acima dos 300 °C, enquanto uma matriz de LED produz cerca de 60 °C. Além de que o LED se sobressai muito em relação a lâmpada de vapor de mercúrio no quesito vida útil, pois chega a aproximadamente 20.000 h contra aproximadamente 2.000 h para a lâmpada de mercúrio.

Neste contexto apresentado, a evolução para o LED-UV tornou-se essencial para a modernização deste equipamento aplicado ao setor calçadista, como já é realidade cada vez maior em diferentes setores como o moveleiro, serigráfico entre outros.

#### 3.2. EXECUÇÃO DA FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO

Para esta etapa está definida a elaboração da carta ou ata de projeto, onde são consultadas todas as partes que fazem envolvidas. Além da declaração do escopo do projeto e a classificação do risco do projeto. Assim se consegue saber que rumo tomará sua concepção.

Segundo Montes (2018), existem alguns fatores que são críticos para que a fase do planejamento do projeto tenha sucesso e serão seguidos nesta etapa. Ele afirma que é



imprescindível definir uma equipe adequada às necessidades do projeto e que se deve garantir que os recursos necessários estejam disponíveis, e também que o escopo seja bem definido assim como as entregas. Muito importante também é criar um cronograma e ter uma base de orçamento para o projeto.

### 3.3. COMPARAÇÕES E TESTES UTILIZANDO AMOSTRA PADRÃO

Para análise da funcionalidade e da viabilidade da troca do principal componente do equipamento foram feitos testes de aplicação comparativos entre os sistemas LEV-UV frente a lâmpada de vapor de mercúrio, utilizando amostras padrão a base de tinta comercial de cura por ultravioleta. Após a execução dos testes as amostras produzidas foram caracterizadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier no modo de reflexão total atenuada (ATR-FTIR) e análise de perda de cor, a fim de comparar os efeitos da radiação UV no processo de cura das amostras pelo uso do LED-UV com o uso da lâmpada-UV. A escolha por estas técnicas de caracterização é devida a rapidez na obtenção dos resultados, além de ser a mais adequada para a análise dos ensaios.

### 3.4. EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO INFORMACIONAL

Esta etapa visa definir os principais fatores que possuem mais influência no projeto, tais como necessidades dos usuários, requisitos do projeto e especificações do projeto.

Faz parte desta etapa a identificação do problema e as possíveis soluções, todas as funções do equipamento e a sua funcionalidade. Para analisar todas as informações oriundas do mercado, para se ter o máximo de certeza na determinação das necessidades e especificações do projeto, foi feita a elaboração de uma matriz QFD também conhecida como casa da qualidade.

#### 3.4.1. Elaboração da matriz QFD

Para ajudar na fase do projeto informacional é muito útil elaborar uma matriz QFD que relaciona todas as necessidades dos clientes, requisitos do sistema e manufatura, dando um grau de importância para o que se deve priorizar. Mantendo assim o foco nos requisitos mais importantes para o projeto, além de reduzir ou extinguir o reprojeto e de diminuir as reclamações sobre o produto.

Basicamente a ferramenta QFD relaciona as necessidades dos clientes, dando um grau de importância para cada uma delas com os requisitos do projeto. Ajudando a tomada de decisão para o que realmente é importante para prosseguir para a próxima etapa.

### 3.5. EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL

Para esta etapa foram relacionados, para cada função do equipamento, o modo pela qual ela deve ser alcançada. Ou seja, deve-se criar a estrutura funcional e também algum conceito alternativo para ser definido qual melhor, e seguir para fazer um estudo sobre os processos de fabricação, fornecedores de materiais, além de ter uma breve noção da segurança do equipamento. Para então no fim, fazer uma avaliação geral sempre consultando a bibliografia e equipe de projeto.

Para ajudar nesta etapa é importante criar uma estrutura de funções, uma matriz morfológica e uma matriz de decisão.

#### 3.5.1. Elaboração da estrutura de funções

Para a construção da estrutura de funções foram determinadas todas as funções e subfunções do equipamento, em sequência e por meio de um diagrama com suas entradas e saídas.

Para Rosenfeld et al. (2006), logo após de serem definidas estas funções, deve-se arbitrar vários princípios de soluções que as satisfaçam, a fim de selecionar a melhor com base nas especificações já definidas.

#### 3.5.2. Elaboração da Matriz Morfológica

Estando a função global, funções auxiliares e subfunções definidas, é determinado um princípio de solução para executar de forma física as funções elementares. Para a execução da matriz morfológica são listadas as funções elementares e relacionadas para cada uma um princípio de solução. E posteriormente os integrantes da equipe de projeto escolhem individualmente qual o melhor princípio de solução acabando por eleger o que mais se sobressai para cada função elementar.

Para Back et al. (2008), este método baseia-se em fazer uma pesquisa sistemática de distintas combinações de princípios a fim de encontrar uma solução para problema, também para criar soluções mais criativas usando a combinações de funções.

### **3.5.3. Elaboração da Matriz de decisão**

Na matriz de decisão são apresentadas cada uma das especificações de projeto juntamente com seu grau de importância, e relacionadas com os princípios de solução propostos, a fim de definir qual caminho a ser tomado por meio de um sistema de pontuação. Assim sendo possível quantificar as diversas maneiras de atender as necessidades dos clientes. A solução que tiver maior pontuação dará continuidade para a próxima fase do projeto preliminar.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo são apresentadas todas as etapas para o desenvolvimento do projeto de um equipamento usado para a cura UV por LED. Além de esclarecer todos os resultados seguindo as etapas apresentadas no capítulo 3.

### 4.1. LEVANTAMENTO DAS INFORMAÇÕES

A ideia de empregar o uso do LED para processos no setor calçadista surgiu por volta de 2017, mas devido a dúvidas na funcionalidade e apreensão na mudança do processo de fabricação que poderia ocasionar problemas aos consumidores do produto, denegrindo a imagem da marca e fabricante do calçado, a concepção foi sendo deixada de lado, mesmo o LED sendo usado cada vez mais em outros setores da indústria.

Para auxílio com materiais e processos, pode-se contar com uma empresa fabricante de calçados, que ofereceu todo o material (*primer*, EVA, tinta UV e substrato) e material para aplicação apresentado na Figura 23, além de partilhar o conhecimento dos processos pertinentes para a fabricação do calçado. As amostras e todo equipamento de aplicação usado para os testes foram doados por uma indústria de um grande grupo com diversas unidades no Brasil e Argentina. A lâmpada de vapor de mercúrio e o sistema de alimentação foram um empréstimo da empresa Tecnomaq.

Figura 23-Tela e rodo utilizado para aplicação da tinta UV

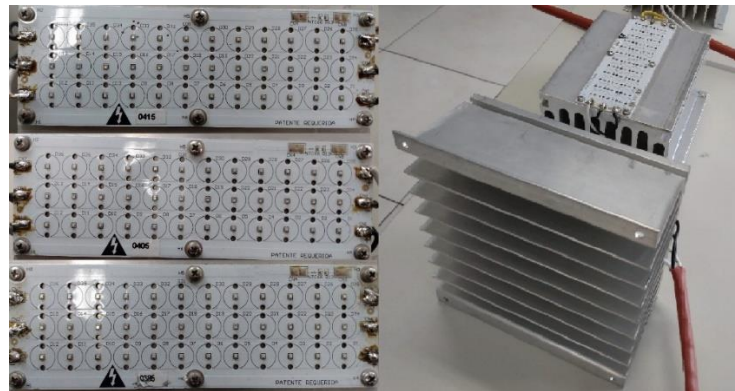


Fonte: O autor (2019).

Foi levantada a informação de que a cura UV com LED já usada em outros setores da indústria usa radiação no comprimento de onda de 385 nm a 415 nm. Então foram desenvolvidas três placas de LED com seus devidos dissipadores de calor, nos comprimentos de onda de 385, 405 e 415 nm conforme apresentados na Figura 24. Foi desenvolvido um suporte para as placas de LED juntamente com o dissipador conforme ilustrado na Figura 25.

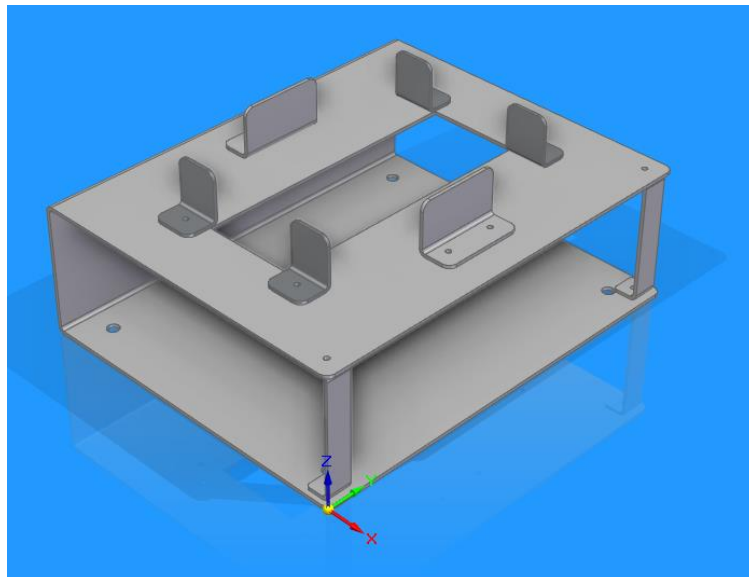
Na indústria calçadista a avaliação de perda de cor das peças produzidas é feita via ensaio de envelhecimento UV. Este ensaio consiste na análise visual comparativa de uma amostra submetida a radiação UV por 24 horas, onde a alteração de cor é avaliada entre uma seção coberta por uma fita e outra exposta a radiação UV da mesma amostra. Verificando se a tonalidade da tinta curada atende a tonalidade de cor escolhida, ou se houve alguma alteração, servindo de controle de qualidade e uniformidade da produção.

Figura 24-Placas de LEDs de 385, 405 e 415 nm e dissipador de calor



Fonte: O autor (2019).

Figura 25- Suporte para as placas de LEDs e dissipador.



Fonte: O autor (2019).

#### 4.2. EXECUÇÃO DA FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO

O escopo deste projeto foi de criar um produto enxuto, com uma variação que fosse possível adaptar em esteiras já utilizadas na indústria do calçado. A utilização do LED UV no setor calçadista será algo inédito, muito esperado e com inúmeros benefícios em comparação aos equipamentos de cura já existentes. Mas antes de definir o projeto foi imprescindível a realização de testes para dar rumo ao desenvolvimento do projeto. O risco para o projeto é elevado, pois insere uma nova tecnologia em um processo que já está bem definido na fabricação do calçado, e caso ocorra alguma falha não analisada, interferirá na qualidade e durabilidade do produto final. Por isso será necessário um tempo de testes e experiências nas indústrias que irão utilizar o equipamento novo.

O principal setor que serviu de inspiração foi o moveleiro que já usa a tecnologia LED para cura de vernizes UV com sucesso, sendo deste a reformação do comprimento de onda usado, e do tipo de LED empregado.

Um breve levantamento de custos foi feito levando em consideração somente os componentes que estão mais diretamente relacionados ao funcionamento da lâmpada, inclusive a própria lâmpada, do equipamento antigo que não seriam mais necessários no equipamento novo, dando margem para o gasto com a nova tecnologia dos LEDs para substituir as lâmpadas. Abaixo na Tabela 1 está listado alguns componentes que seriam retirados do projeto antigo e seus relativos custos.

Tabela 1-Levantamento de custos

COMPONENTE	QUANTIDADE	CUSTO R\$	CUSTO TOTAL R\$
CONTROLADOR AMPERIMETRO INV-34 3404	4	212,95	851,80
REATOR 2000VA	4	569,33	2.277,33
REATOR REDUTOR 1010VA 6A 60HZ	4	160,28	641,12
IGNITOR HZN/2000 /380V	4	60,35	241,41
FONTE DE UV MT 2001 (UVTEC)	4	491,19	1.964,76
MOTOR 2HP-CV4P90S- 220/380V 60HZ B5D IP5F	1	460,46	460,46
UNIDADE COND.1.1/4HP C/TQ/VALV.220	1	1432,15	1432,15
EVAPORADOR 10X502 5F 8APP	1	719,74	719,74
GAS GENETRON R22	0,5	35,33	17,66
ROTOR 300X100MM HORÁRIO	1	579,42	579,42
TOTAL:			9.185,85

Fonte: O autor.

#### 4.3. COMPARAÇÕES E DISCUÇÕES DOS TESTES UTILIZANDO AMOSTRA PADRÃO

Para a produção das amostras padrão, foi utilizada uma tinta de cura por ultravioleta comercial, normalmente usada em um processo na fabricação de calçados. Após a confecção das amostras, estas foram em triplicata submetidas à cura UV pelo uso de uma lâmpada UV de vapor de mercúrio por durante 3 segundos. Tempo este sendo o maior que a amostra suportou sem nenhum defeito por aquecimento.

Com o uso de Led UV para cura foram produzidas amostras em triplicada em diferentes tempos de exposição ao ultravioleta, sendo ele: 4, 8, 12 e 16 minutos, para os três comprimentos de ondas 385, 405 e 415nm.

A placa de LED com o dissipador de calor da Figura 26, bem como sua placa de alimentação usadas para os testes foram desenvolvidas por um colaborador da empresa. Também na Figura 26 está ilustrado o suporte para o conjunto dos LEDs e a amostra padrão feita de um material sintético PVC.

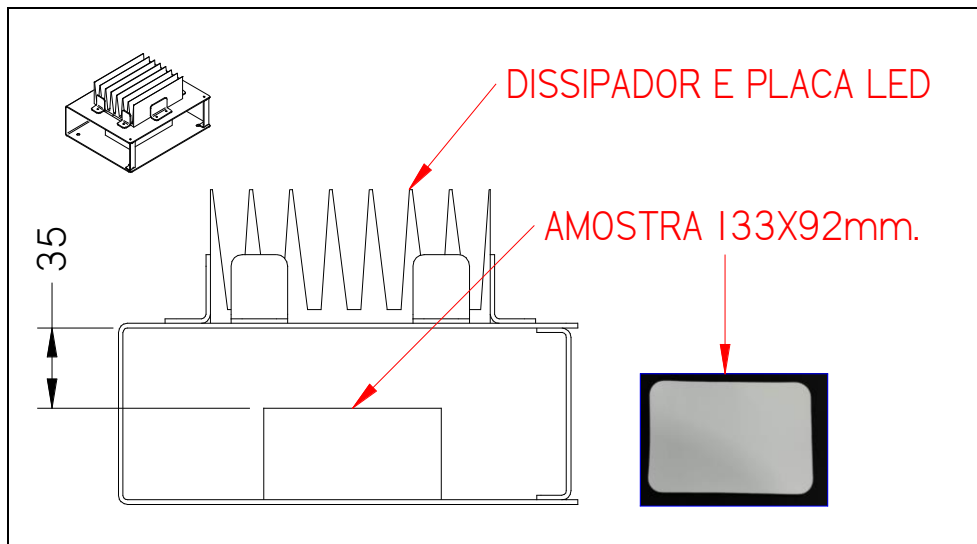
A aplicação da tinta UV usada no calçado é foi feita como no processo de serigrafia, onde foi utilizado um rodo de borracha com dureza específica e tela de nylon permeável em pontos específicos com a forma a ser pintada já apresentada na Figura 23. As amostras foram produzidas momentos antes de serem expostas ao ultravioleta para a cura.

A produção das amostras e os testes seguiram uma série de etapas para garantir que todas ficassem o mais padrão possível, diminuindo diferenças que poderiam mascarar os testes e resultados.

Os testes seguiram as seguintes etapas:

- 1) Limpeza da amostra padrão;
- 2) Aplicação de uma porção da tinta UV na tela;
- 3) Posicionamento da amostra padrão sobre a tela;
- 4) Impressão da tela sobre a amostra padrão com um movimento do rodo sobre a área sempre com a mesma pressão;
- 5) Retirada da amostra padrão e posicionar sobre os LEDs ou lâmpada nos dispositivos desenvolvidos pelo tempo determinado;
- 6) Retirada da amostra padrão do dispositivo e acondicionamento em lugar apropriado.

Figura 26-Sistema montado, suporte, placa de LEDs, dissipador e amostra



Fonte: O autor (2019).

Em uma primeira análise superficial, nos testes com a lâmpada de vapor de mercúrio, foi percebido o quanto a potência da lâmpada, e principalmente a sua irradiação de infravermelho, é alta, pois bastava alguns segundos a mais para praticamente incendiar a amostra a ser curada. Também foi possível notar o quanto a lâmpada demora até sua estabilização e o elevado tempo até seu resfriamento, demorando para poder ser religada e impossibilitando o manuseio do equipamento e lâmpada neste intervalo. Outra peculiaridade foi o odor de ozônio criado pela lâmpada que era facilmente percebido no ar em torno do equipamento.

Já nos testes com o LED a temperatura do trocador de calor não passou dos 55°C e da amostra não passou dos 50°C. Foi possível notar que logo nos primeiros segundos a mudança no aspecto da tinta que aumentava sua viscosidade, sendo um indício de início da cura além de já aderir à superfície da amostra. Foi também percebido o quão prático o LED pode vir a ser pela sua partida instantânea atingindo 100% de emissão logo após ligado, sendo possível desligar e religar quantas vezes fosse necessário.

Também foi possível notar que nas amostras curadas por LED, em sua grande maioria as amostras marcavam ao serem tocadas após o teste de maior tempo de exposição (16 min). As amostras expostas ao UV de comprimento de onda de 415 nm, marcavam menos ao toque, dando a impressão de estarem mais curadas do que as expostas a 405 e 385 nm. Tais marcas deixadas eram bem superficiais e apresentavam uma certa viscosidade, sendo um indicativo de pouca potência ou tempo de exposição empregado no processo de cura. Já para as amostras



curadas utilizando a lâmpada de vapor de mercúrio, estas não apresentaram marcas ao serem tocadas. Todos os procedimentos utilizados para a produção das amostras foram feitos utilizando EPI adequando de proteção – Figura 27.

Figura 27-Óculos com filtro de UV

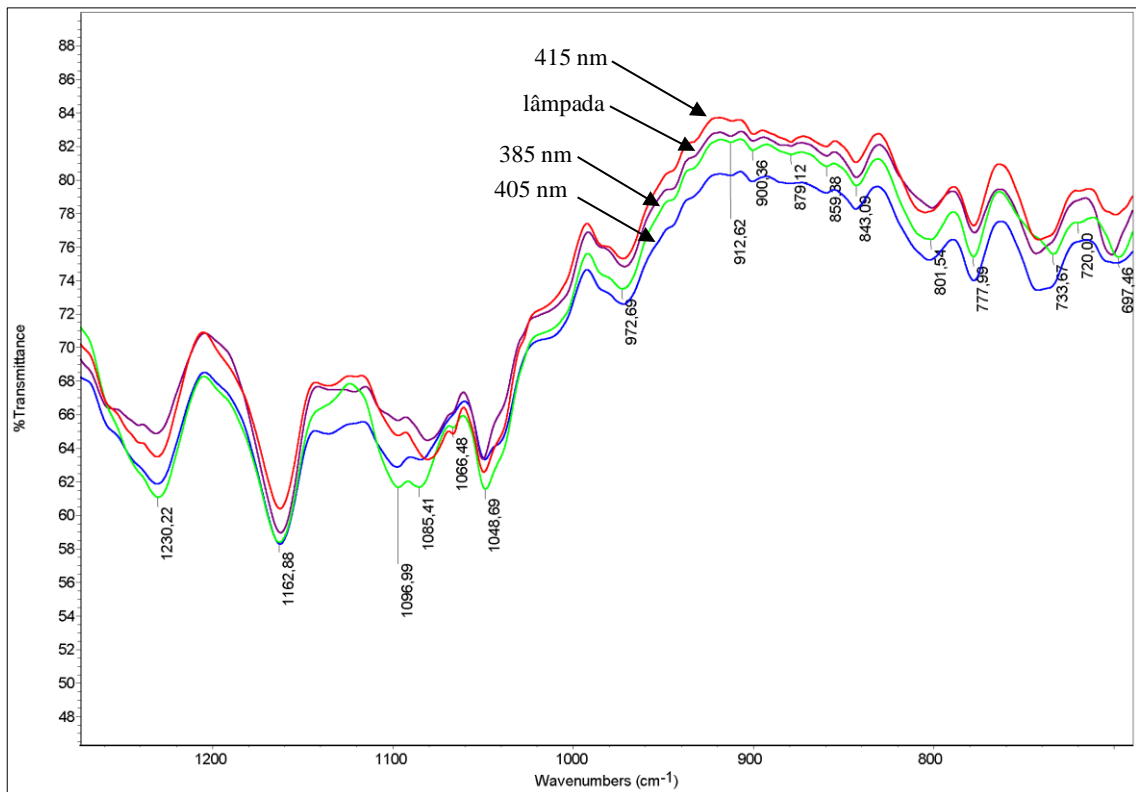


Fonte: O autor (2019).

As amostras curadas tanto por LED quanto pela lâmpada de vapor de mercúrio foram analisadas por FTIR. Para essa análise foi utilizado um espectrofotômetro da marca NICOLET, modelo iS10, da Thermo Scientific, localizado no Laboratório de Polímeros – LPOL da Universidade de Caxias do sul, configurado no modo ATR, utilizando a faixa de varredura de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  na resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e com 32 varreduras de leitura. Tal equipamento obtém o espectro das vibrações moleculares que são obtidas após absorver a radiação de infravermelho, relacionando cada tipo de ligação molecular presente no material, sendo possível analisar qual ligação molecular envolvida e as mudanças de ligações das diferentes amostras.

Na análise de infravermelho das amostras submetidas ao maior tempo de exposição (16 min) ao UV, o espectro de FTIR que ficou mais próximo ao do espectro da lâmpada de vapor de mercúrio foi a do LED de maior comprimento de onda (415 nm) – Figura 28. Pode-se observar também que as principais diferenças nos espectros se referem as bandas de 743, 1097 e 1080  $\text{cm}^{-1}$ , podendo ser um indicativo do processo de cura do material. A identificação dessas bandas vibracionais fica comprometida uma vez que não é disponibilizado pelo fabricante a composição química dos componentes da formulação da tinta pelo fabricante, e uma avaliação mais criteriosa deveria ser feita em relação ao processo de cura propriamente dito, comparando a tinta antes e após a exposição à radiação UV.

Figura 28- Espectros de FTIR obtidos para amostras curadas pela lâmpada de vapor de mercúrio e LEDs UV (385, 405 e 415 nm)

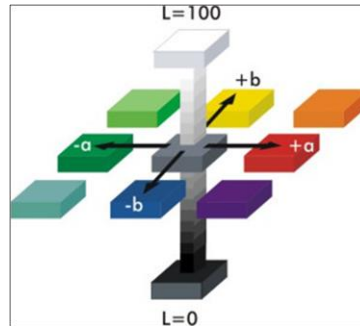


Fonte: O autor (2019).

No teste de perda de cor foram comparadas as amostras curadas pela lâmpada de vapor de mercúrio (tomadas como as de referência), com as amostras curadas pelos LEDs-UV nos diferentes comprimentos de onda utilizados neste trabalho

Para as medidas de perda de cor foi utilizado o equipamento Mutli Gloss GM-268<sup>a</sup> da Konica Minolta. O teste consiste na incidência de um feixe de luz de determinada intensidade e feixe fixo relativo, medindo em seu ângulo complementar a quantidade de luz refletida. Os resultados são expressos em um sistema CIE (definido pelo Sistema Internacional de Iluminação), composto de três variáveis:  $L^*$  variando de 0 a 100 correspondendo ao grau de luminosidade e escuridão, e  $a^*$  e  $b^*$  correspondendo a escala cromática onde, vermelho corresponde a ( $+a^*$ ), verde ( $-a^*$ ), amarelo ( $+b^*$ ) e azul ( $-b^*$ ). A Figura 29 ilustra uma representação esquemática da correlação entre as variáveis apresentadas. Os resultados obtidos para o teste de cor estão apresentados na Tabela 2. Lembrando que as variações  $\Delta$  são tomadas em relação a amostra curada pela lâmpada UV de vapor de mercúrio.

Figura 29- Representação esquemática do sistema de cor CIE



Fonte: Imagem da internet (2019)

Tabela 2-Resultados dos testes de cor

	L*	a*	b*	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E$
lâmpada	86,81	-1,44	0,07	-	-	-	-
385 16 min	87,43	-0,89	-1,78	0,62	0,55	-1,86	2,03
405 16 min	87,34	-0,64	-2,31	0,54	0,80	-2,39	2,57
415 16 min	87,38	-0,39	-3,22	0,57	1,05	-3,29	3,50

Fonte: O autor.

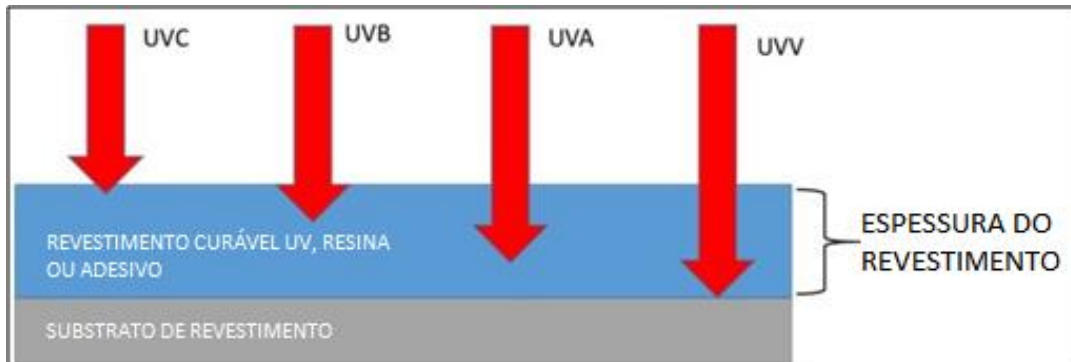
Observa-se que as amostras curadas por LED-UV todas apresentaram um aumento do grau de luminosidade ( $\Delta L^* > 0$ ), ou seja, apresentam-se mais claras que as amostras curadas pela lâmpada de mercúrio. Quanto aos parâmetros cromáticos, nota-se que as amostras de referência apresentaram uma maior tendência ao verde do que ao vermelho ( $a^*$ ), mantendo-se neutra em relação ao amarelo e ao azul ( $b^*$ ). Ao compararmos com as amostras submetidas a radiação LED-UV, observa-se uma maior redução na tendência ao verde com o aumento do comprimento de onda do LED, além de uma tendência maior ao azul.

Também é possível observar pela análise da variação total de cor ( $\Delta E$ ), que as amostras que tiveram as maiores variações de cor foram as submetidas a radiação de maior comprimento de onda (415 nm). Com esta análise, pode-se inferir que a radiação LED-UV de menor comprimento de onda apresentou a menor variação cromática comparada à lâmpada de mercúrio.

A explicação para as diferenças observadas no que diz respeito a cura, entre as exposições ao UV aqui estudadas, vem de um artigo de Jeff Gotro em seu blog de inovação em polímeros. Em seu artigo ele descreve a cura de um sistema UV acontecendo por camadas para cada faixa de comprimento de onda do UV conforme Figura 30. Onde comprimentos de onda

maiores teriam melhor eficiência na cura em profundidade (maior poder de penetração) e menores mais próximos à superfície. Ele também ressalta a importância de mensurar a distância correta do material a ser curado para a fonte UV, pois a densidade de energia diminui com o quadrado de sua distância.

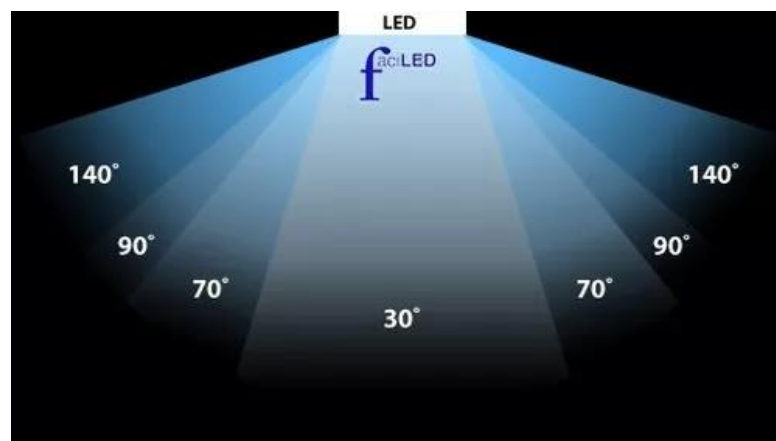
Figura 30- Profundidade de cura em função com comprimento de onda UV



Fonte: adaptado de Jeff Gotro (2016).

Assim, uma dificuldade existente apresentada neste sistema desenvolvido neste trabalho, foi a baixa potência (30W) e a falta de foco na emissão da radiação UV, pois mesmo o LED sendo um ponto de luz, ele emite sua onda eletromagnética em uma abertura que pode variar conforme ilustrado na Figura 31, onde pode dificultar a transmissão de boa parte da energia. Uma saída bastante eficiente seria a utilização de microlentes individuais nos LEDs, o que melhoraria consideravelmente a transmissão para o material a ser curado.

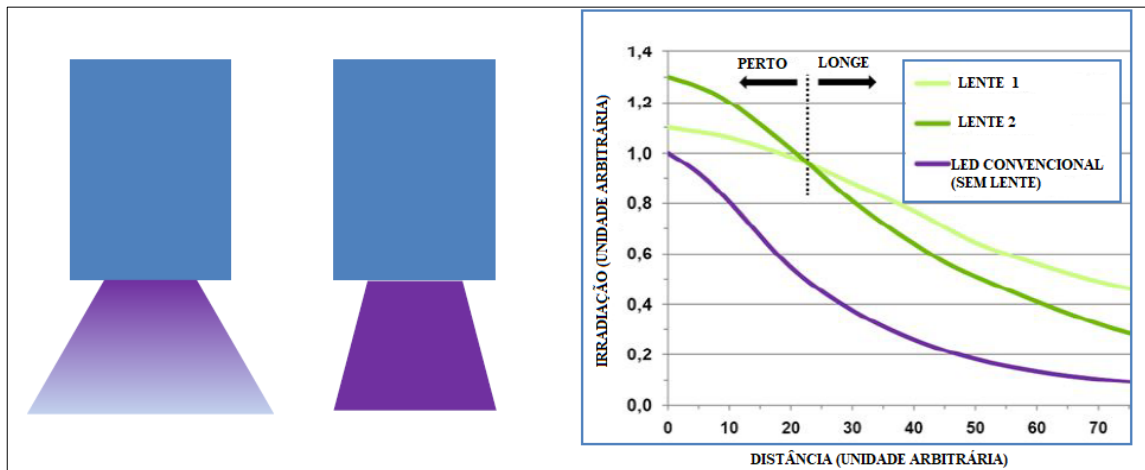
Figura 31- Padrão de intensidade de radiação emitida do LED em função do ângulo de abertura



Fonte: Imagem da internet (2019)

Segundo STOWE (2014), a matriz de LED é um conjunto de fontes pontuais, que pela sua geometria, assumem um padrão de irradiação com tendência ao espalhamento de sua energia, o que torna difícil o uso de refletores como os usados em lâmpadas convencionais. Assim, o uso de microlentes individuais pode direcionar melhor a energia, diminuindo a área de exposição e aumentando a irradiância. Na Figura 32 é ilustrado o uso de microlentes em LEDs.

Figura 32- Ilustração do uso de microlentes em LEDs e sua irradiação em função da distância.



Fonte: adaptado de Stowe (2014).

#### 4.4. EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO INFORMACIONAL

Para correlacionar as necessidades dos clientes, grau de importância e especificações do requisito de projeto foram reunidas as informações conforme Quadro 1. Na elaboração foram obtidas informações de clientes e pessoas envolvidas com o projeto e na coluna do grau de importância é mensurada a relevância das necessidades dos clientes.

Pode-se perceber que as necessidades mais importantes são o baixo consumo de energia, atender as normas de segurança, além da funcionalidade sem interrupções de manutenção pelo fato de a indústria do calçado ter altas taxas de produção e onde a parada de um equipamento poderia criar um inconveniente gargalo na produção.

Também muito importante é a necessidade de criar um equipamento menor, mais leve e versátil, tendo uma versão que fosse possível acoplar em esteiras já usadas no setor de fabricação de calçados se necessário. A melhora da vida útil do sistema gerador de radiação UV também teve alta relevância, pois o sistema antigo gerava altos custos de manutenção pela

relativa curta vida útil. Outra necessidade que ajuda também no consumo energético é a possibilidade de desligar e religar rapidamente o sistema emissor de UV quando não utilizado.

Quadro 1- Informações levantadas para o projeto informacional

PROJETO INFORMACIONAL			
CLASSE	NECESSIDADES DO CLIENTE	GRAU DE IMPORTÂNCIA	ESPECIFICAÇÃO DO REQUISITO DE PROJETO
Custo	Custo de fabricação	7	Custo final
	Baixo custo de manutenção	9	Custo manutenção anual
Tempo/ processo	Tempo de cura	7	Tempo de cura razoável
	Funcionar 40 horas por semana	10	Garantir funcionamento do equipamento
	Desligar e religar fonte UV sem tempos de espera	9	Partida instantânea com emissão máxima de UV
Manutenção	Longa vida útil do sistema emissor UV	10	Baixa o custo de manutenção
	Longo tempo sem reparo (MTBF)	9	Longa vida útil dos LEDs
	Baixo tempo de reparo (MTTR)	9	Troca rápida dos LEDs
	Vida útil de 10 anos	8	Longa vida útil do equipamento
Custo de operação	Baixo consumo de energia	10	Tecnologia mais energeticamente eficiente
Tamanho do equipamento	Possibilidade de acoplar em esteiras	9	Variação do equipamento para cada tipo de esteira
	Equipamento reduzido leve e versátil	9	Tecnologia de menor tamanho
Projeto da máquina	Boa aparência, se utilizando de carenagens	8	Carenagens.
	Atender as normas de segurança NR12	10	Sensores de segurança
	Baixo nível de ruído	8	Sistema de ventilação silencioso
	Atender os requisitos ambientais	9	Normas ambientais
Operação da máquina	Garantir segurança do operador	10	Proteções
	Operação simples	8	Sistema automático
	Alarme de falhas	9	Alerta caso falha do sistema emissor
	Stand by caso não utilizado	9	Acionamento somente se necessário

Fonte: O autor (2019).

#### 4.4.1. Matriz QFD

Com a elaboração da matriz QFD foi possível averiguar com maior acuracidade o grau de importância dos requisitos do projeto sendo possível compreender quais são os mais determinantes. Nesta ferramenta foi possível preservar uma visão fiel dos requisitos do projeto embasado nas necessidades dos clientes.

Como resultado da matriz QFD demonstrada em parte na Tabela 3 foi possível observar como sendo prioridade os seguintes requisitos do projeto:

- a) Custo final;
- b) Custo de manutenção anual;
- c) Garantir o funcionamento do equipamento;
- d) Longa vida útil dos LEDs;
- e) Tecnologia mais energeticamente eficiente;
- f) Longa vida útil do equipamento.

Tabela 3-Fragmento da matriz QFD

RELAÇÃO: FORTE=9 MEDIO=3 LEVE=1 NÃO SE APLICA=0	GRAU DE IMPORTÂNCIA	Custo final	Custo manutenção anual	Tempo de cura razoável	Garantir funcionamento do equipamento	Partida instantanea com emissão máxima de UV	Baixa o custo de manutenção	Longa vida útil dos LEDs	Troca rápida dos LEDs	Longa vida útil do equipamento	Tecnologia mais energeticamente eficiente	Varição do equipamento para cada tipo de esteira
	NECESSIDADES DO CLIENTE											
Custo de fabricação	7	9	3	9	3	3	3	1	3	3	3	3
Baixo custo de manutenção	7	3	9	0	3	3	9	9	3	9	3	3
Tempo de cura	9	9	0	9	0	1	0	1	0	1	1	0
Funcionar 40 horas por semana	7	3	1	1	9	1	1	3	3	3	0	0
Desligar e religar fonte UV sem tempos de espera	10	3	0	1	9	9	0	3	1	1	9	0
Longa vida útil do sistema emissor UV	9	3	3	3	1	1	9	9	1	9	3	0
Longo tempo sem reparo (MTBF)	10	1	9	0	9	1	9	9	1	9	0	0
Baixo tempo de reparo (MTTR)	9	1	9	0	9	1	1	1	9	1	0	0
Vida útil de 10 anos	9	1	9	1	3	1	3	9	1	9	9	0
Baixo consumo de energia	8	3	1	3	0	3	0	3	0	1	9	0
Possibilidade de acoplar em esteiras	10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Equipamento reduzido leve e versátil	9	0	0	1	1	1	0	3	1	1	3	3
Boa aparência, se utilizando de carenagens	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Atender as normas de segurança NR12	8	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Baixo nível de ruído	10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
Atender os requisitos ambientais	8	1	0	0	0	0	0	3	3	3	3	1
Garantir segurança do operador	9	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Operação simples	10	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
Alarme de falhas	8	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0
Stand by caso não utilizado	9	0	0	1	3	9	0	1	0	0	1	0
<b>SOMA</b>	=	375	395	239	465	319	316	485	249	426	381	216
<b>PRIORIZAÇÃO</b>	=	6	4	13	2	7	8	1	11	3	9	16
<b>PERCENTUAL</b>	=	6,66%	7,01%	4,24%	8,25%	5,66%	5,61%	8,61%	4,42%	7,56%	6,76%	3,83%

Fonte: O autor (2019).

#### 4.5. EXECUÇÃO DA FASE DE PROJETO CONCEITUAL

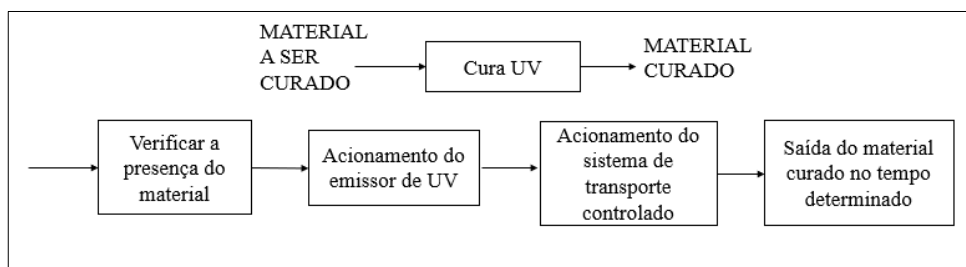
Nesta etapa foi estudado como o equipamento deve desempenhar cada função que foi estabelecida em uma sequência de passos, além do modo de funcionamento e seus sistemas de segurança.

Ajudando nesta etapa foram desenvolvida uma estrutura de funções e uma matriz morfológica e de decisão, que são ferramentas imprescindíveis para progredir com o projeto conceitual.

#### 4.5.1. Elaboração da estrutura de funções

A estrutura de funções ficou relativamente simples devido ao que se propõe fazer o equipamento, não possuindo muitos passos apenas 3, em comparação a equipamentos mais complexos, e está ilustrada na figura 33. Porém seguir sua sequência de funções é imprescindível para o seu correto funcionamento.

Figura 33- Estrutura de funções propostas para o equipamento



Fonte: O autor (2019).

#### 4.5.2. Elaboração da Matriz Morfológica

Para a elaboração da Matriz Morfológica definidos princípios de soluções para cada função elementar do equipamento, correlacionados na Tabela 4. A elaboração dos princípios de soluções foi baseada em combinações de princípios já usados em outros equipamentos produzidos pela empresa, onde já é empregado um certo nível de automação.

Posteriormente foram criadas três soluções distintas para cada função elementar da Figura 33, se utilizado do melhor princípio de solução demonstradas na matriz de soluções da Tabela 5.

Tabela 4-Matriz Morfológica

MATRIZ MORFOLÓGICA			
FUNÇÕES ELEMENTARES	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO		
	PS1	PS2	PS3
Verificar a presença do material	Não aplicado	Sensor e espelho	Sensor capacitivo
Acionamento do sistema UV	Liga ao acionar a esteira	Sempre ligado	Liga ao material se localizar abaixo da fonte UV
Acionamento do sistema de transporte controlado	Acionado por CLP e velocidade continua	Acionado por CLP e velocidade da esteira controlada por inversor	Acionamento por temporizador e velocidade continua
Saída do material curado no tempo determinado	Material passa pela esteira sem parar com velocidade controlada	Tempo programado no CLP	Tempo programado no temporizador

Fonte: O autor (2019).



Tabela 5-Matriz de soluções

SOLUÇÕES		
SOL1	SOL2	SOL3
PS1	PS2	PS3
PS2	PS1	PS3
PS3	PS2	PS1
PS3	PS1	PS2

Fonte: O autor (2019).

#### 4.5.3. Elaboração da Matriz de decisão.

Para a elaboração da matriz de decisão foi analisada quanto, em um sistema de pontuação, cada princípio de solução de cada uma das soluções propostas contempla cada requisito do projeto, levando em conta seus percentuais de importância. Assim gerando uma matriz que revela qual a melhor solução para dar continuidade ao projeto melhor atendendo às necessidades dos clientes ilustrada na Tabela 6.

Tabela 6-Matriz de decisão

Especificação de Projeto	LEGENDA: % IMPORTÂNCIA	5- Atende bem	3- Atende	1- Não atende
		SOL. 1	SOL. 2	SOL. 3
Requisitos de Projeto	% IMPORTÂNCIA	SOL. 1	SOL. 2	SOL. 3
Custo final	6,66%	5	1	3
Custo manutenção anual	7,01%	5	3	5
Tempo de cura razoavel	4,24%	5	5	5
Garantir funcionamento do equipamento	8,25%	5	5	5
Partida instantanea com emissão maxima de UV	5,66%	5	5	5
Baixa o custo de manutenção	5,61%	5	3	5
Longa vida util dos LEDs	8,61%	5	5	5
Troca rápida dos LEDs	4,42%	5	5	5
Longa vida util do equipamento	7,56%	3	3	5
Tecnologia mais energeticamente eficiente	6,76%	3	5	5
Varição do equipamento para cada tipo de esteira	3,83%	5	5	5
Tecnologia de menor tamanho	4,58%	1	3	5
Carenagens.	4,62%	5	5	5
Sensores de segurança	4,33%	1	3	5
Sistema de ventilação silencioso	3,66%	5	5	5
Normas ambientais	1,97%	5	5	5
Proteções	4,05%	5	5	5
Sistema automatico	3,92%	1	5	5
Alerta caso falha do sistema emissor	2,27%	1	5	5
Acionamento somente se necessário	3,82	1	3	5
		4,01	4,05	4,77

Fonte: O autor (2019).

Esta, juntamente com as outras ferramentas ajudam a tomada de decisão e diminuem consideravelmente o reprojeto e as melhorias pós protótipo, pois ajudam a compreender as reais

necessidades e a possibilidades do projeto, mesmo sendo um processo mais trabalhoso e lento, e muitas vezes sendo deixado de lado na correria de criar um projeto nas indústrias.

Como melhor solução obteve-se a opção 3 que atendeu melhor determinadas especificações do projeto sem comprometer tanto o custo final do equipamento.

## 5. CONCLUSÃO

O estímulo para a realização deste trabalho surgiu da necessidade da indústria calçadista de modernizar um dos diversos equipamentos empregados na fabricação de seus produtos. Usando uma tecnologia que está cada vez mais popular nos demais segmentos do mercado. A partir dos testes realizados e suas respectivas análises, foi possível obter resultados significativos para dar segmento ao projeto, e assim seguir as etapas do Planejamento do Projeto. Sendo imprescindível para determinar e focar as especificações e requisitos do projeto baseados na real necessidade do cliente.

Como resultado em relação a cura da tinta, foi possível observar que o LED-UV de comprimento de onda de 415 nm teve o melhor resultado em relação aos de 385 e 405 nm, muito provavelmente devido a cura em profundidade ser mais efetiva para comprimentos de onda maiores, conforme apresentada por Jeff Gotro em seu artigo. Apesar do LED não possuir a mesma eficiência de cura que a lâmpada de vapor de mercúrio para este sistema. Outro fator observado foi a dispersão na emissão, que por sua vez pode ser melhorada pelo uso de microlentes especiais para LED, a qual poderia ter sua eficiência aumentada, além da necessidade de avaliar um conjunto de LEDs com maior potência por área de irradiação. O que pode ser notado pelo elevado tempo de cura utilizado neste trabalho, 16 minutos para os LEDs UV, frente aos 3 segundos utilizados pela lâmpada UV de vapor de mercúrio.

Com os resultados das caracterizações por ATR-FTIR e de perda de cor, foi possível concluir que o espectro de infravermelho para as amostras curadas com o comprimento de onda de 415 nm, se mostrou muito semelhante aos espectros das amostras curadas pela lâmpada UV de vapor de mercúrio (Figura 28). Entretanto, para as análises de perda de cor, as amostras apresentaram uma maior alteração de cor na tinta UV curada em relação a tinta curada pela lâmpada de vapor de mercúrio. O que por sua talvez, poderia acarretar alterações significativas em peças finais de aplicação. Neste sentido o comprimento de onda de 385 nm apresentou as menores alterações de cor conforme apresentado na Tabela 1.

Uma possível desvantagem do uso de um equipamento que utiliza LED para cura no setor calçadista é que ele irá possuir um comprimento de onda fixo, ou seja, um equipamento fabricado com o LED com emissão de 405 nm somente irá curar uma tinta ou *primer* fabricado especificamente para este comprimento de onda. E assim, no caso da troca da tinta ou *primer* do fabricante por outro produto de cura em outra faixa, será necessário trocar o conjunto dos LEDs para adequar o equipamento ao novo produto.

O presente trabalho visou testar uma tinta UV já usada na indústria calçadista de clientes, porém esta tinta não foi exatamente criada para sistemas de cura UV LED, com o fotoiniciador específico para este fim. Mostrando a importância da adequação do sistema ao uso de uma tinta UV específica para cura por LED-UV neste comprimento de onda.

Assim, para dar continuidade ao projeto será necessário além de empregar maior potência no sistema LED, adotar o uso de microlentes para melhorar a geometria e a focalização da radiação sobre a amostra. Faz-se também necessária a busca frente ao cliente ou aos fornecedores de tintas, vernizes ou *primers* de cura UV específicas para cada tipo necessidade de aplicação.

Por fim os objetivos propostos no início do trabalho foram alcançados, sendo possível definir quais serão os próximos passos para prosseguir com o projeto.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudo da formulação de tintas com fotoiniciador especial para cura por LED UV;
- Avaliação da necessidade de desenvolver uma tinta especial para cura por LED UV;
- Estudo das variações de fotoiniciadores no mercado, qual faixa de comprimento de onda para a cura de cada um e quais são específicos para cura por LED UV.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. LED: um pouco de história, curiosidades e aplicações ao longo do tempo. Forlux. Disponível em: <https://www.foxlux.com.br/blog/foxlux-2/led-um-pouco-de-historia-e-aplicacoes-ao-longo-do-tempo/>. Acesso em: 13 abr.2019, 18:30hs.

\_\_\_\_\_. Boletim técnico: Breve introdução à tecnologia de cura por radiação UV. Disponível em: [http://www.visioncure.com.br/bt/BT\\_007.pdf](http://www.visioncure.com.br/bt/BT_007.pdf). Acesso em: 20 mar. 2019, 23:00 hs.

\_\_\_\_\_. Metodologia de gerenciamento de projetos. Disponível em: <https://escritoriodeprojetos.com.br/metodologias-de-gerenciamento-de-projetos>. Acesso em: 29 mai. 2019, 20:30hs.

\_\_\_\_\_. Novas capacidades de cura UV e tecnologias. Disponível em: <https://www.alborum.com/as-novas-possibilidades-da-cura-uv/>. Acesso em: 15 mai. 2019, 22:00hs.

\_\_\_\_\_. Solução UV e IV. Disponível em: <https://sensor-technology.com.br/index.php/solucoes-em-uv-e-ir/>. Acesso em: 20 mai. 2019, 19:00hs.  
AMARAL, Daniel Capaldo, ROZENFELD, Henrique, FORCELLINI, Fernando Antônio, TOLEDO, José d. Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência Para Melhoria do Processo. São Paulo. Saraiva, 2006.

BACK, Nelson, OGLIARI, André, DIAS, Acires, SILVA, Jonny da. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. [Minha Biblioteca]. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520452646/cfi/109!/4/4@0.00:67.3>. Acesso em: 14 mai. 2019, 17:30 hs.

BALOGH TS, VELASCO MVR, PEDRIALI CA, KANEKO TM, BABY AR. **Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção**. An Bras Dermatol. 2011;86(4):732-42.

BLODORN, Rodrigo. **Estrutura de funções, 2010**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Estrutura-de-funcoes-Nesta-etapa-do-projeto-foi-utilizada-a-tecnica-do\\_fig4\\_274069960](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Estrutura-de-funcoes-Nesta-etapa-do-projeto-foi-utilizada-a-tecnica-do_fig4_274069960). Acesso em: 10 mai.2019, 18:00hs.

BROSCA, Thawana dos Santos. **Elaboração de manual didático interativo sobre o processo de impressão em serigrafia**. Trabalho de diplomação. Curitiba. 2012.

CLEARY, Nessian. **Porque a cura LED está ganhando espaço em grande formato**. Artigo FESPA. Disponível em: <https://www.fespabrazil.com.br/pt/noticias/artigo-fespa-cura-led-ganha-espaco-grande-formato>. Acesso em: 23 mai. 2019, 17:30hs.

FURTADO, Marcelo. **Vernizes: Formulação com secagem UV desbancam as convencionais**. 2004. Disponível em : <https://www.quimica.com.br/vernizes-formulacoes-com-secagem-uv-desbancam-convencionais/>. Acesso em: 02 mai. 2019, 20:00hs.

GOTTO, Jeffrey. UV Curing Part Nine: “If you can’t measure it, you can’t manage it”. Disponível em: <https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-nine-cant-measure-cant-manage-peter-drucker/>. Acesso em: 15 out. 2019, 22:30hs.

MELO Júnior, T. A; SANTOS, C. **Materiais e processo de produção de solados: destinação final de resíduos em empresas calçadistas no município de Franca**. Revista Eletrônica “Diálogos Acadêmicos”. São Paulo. 2017.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVA, Vanessa; SANTOS, Jaqueline Alves. **Viabilidade da utilização de lâmpadas LED no processo industrial de cura de vernizes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade do Vale do Paraíba. Graduação em Engenharia Química, 2014.

Organização Mundial da Propriedade Intelectual, Secretaria internacional. DA ROSA REIS, Vagner Giani; RITTER, Jenifer; FONTES MOREIRA, Ana Cristina; SOTO OVIEDO, Mauro Alfredo; DELFINO, Camilo; BECKER, Raquel. **WO 2014/100865 A1**, 3 de julho de 2014.

PASTORELLO, Flávio; NASCIMENTO, Willam; TREVINE, José Antonio; Matsuda, Mauro; MELO, Wellington; CASTRO, Rodrigo; TOLEDO, Jefferson; TAUBER, Pedro; MARIUSSI, Luciano; Martins, Evandro; AMORIN, Marcos; MORAES, Antonio Augusto; ARAUJO, Juarez. **Cura UV: Desenvolvimento de um sistema de cura e pintura UV em recipientes de 13kg**. Disponível em: [http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/wp-content/uploads/Cura\\_UV.pdf](http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/wp-content/uploads/Cura_UV.pdf). Acesso em: 13 ago. 2019, 23:00hs.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **História do Tênis**.

Disponível em: <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/historia-geral/historia-do-tenis>>. Acesso em: 22 mar. 2019, 09:30hs.

REIS, Marcelo de C. **Aula de QFD desdobramento da função de qualidade**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/CenneBrasil/aula-de-qfd-desdobramento-da-funcao-de-qualidade>. Acesso em: 23 mai. 2019, 22:30hs.

RODRIGUES, Máira R; Neumann, Miguel G. **Fotopolimerização: Princípios e Métodos**. Instituto de Química de São Carlos. USP. 2003.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SABBAG, Fabio. **Sistema de cura UV: em busca da cura ideal**. 23-131. Disponível em: <https://www.graphprint.com.br/edicao/131/files/assets/basic-html/page24.html>. Acesso em: 05 mai. 2019, 21:30 hs.

SANTOS, A.S. dos; SILVA, Laura G. **O tênis nosso de cada dia**. Editoria QNesc. 2009.

SANTOS, Alexandre Silvestre dos. **O tênis-Uma abordagem didática**. Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, Talía Simões dos; BATISTA, Marília Carone; POZZA, Simone Andréa; ROSSI, Luciana Savoi. **Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais**. Limeira (SP). 2015.

STOWE, Richrad W. **Comparing Traditional UV Systems with LED UV Systems for UV Curing**. Gaithersburg, MD USA. 2014.

STOWE, Richrad W. **Lâmpadas UV de alta potência para aplicações industriais de cura UV**. 1996. Revista eletrônica SPIE. Disponível em:

<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/2831/1/High-power-UV-lamps-for-industrial-UV-curing-applications/10.1117/12.257198.short?SSO=1>. Acesso: em: 20 mar. 2019, 22:00hs.