

REVISÃO DOS MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE EXTRUSÃO DURANTE ENSAIOS DE IMPRESSÃO 3D

Felipe Chagas Rodrigues de Souza
Maria Alice de Oliveira
Thiago de Oliveira Santos
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva
Álison Rocha Machado

Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia, av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, Brasil

felipechagas@ufu.br, m.alice@ufu.br, thiago.de@ufu.br, leonardo.rrs@gmail.com, alissonr.machado@gmail.com

Resumo: Nesta revisão foram revisados cerca de 50 artigos entre os mais relevantes e publicados nos últimos 5 anos, com o intuito de levantar estatísticas e tendências nas pesquisas envolvendo impressão 3D (manufatura aditiva), focando no monitoramento da temperatura do bocal (do material em extrusão) durante a impressão. Esta etapa da condução, fusão e deposição do filamento pode apresentar alguns problemas, afetando o desempenho do cabeçote extrusor, implicando na necessidade de monitorar tal etapa. Dentre as principais falhas no sistema destacam-se: o entupimento do tubo do bico aquecido, a perda de comando no acionamento do motor responsável por mover o filamento, e o escorregamento entre o filamento e a polia. Outra vantagem de realizar tal monitoramento está na detecção de possíveis pontos de falha na peça, otimizando uma avaliação e acabamento da peça final. Indo além, neste presente trabalho, também foram levantados dados sobre os materiais utilizados para realizar a impressão, pois a temperatura de extrusão é função do ponto de fusão do material impresso. Por fim foram levantados gráficos os quais indicam tendências e lacunas para dar base para futuros pesquisadores que buscam estudar as temperaturas durante um processo de impressão 3D. Tais gráficos são acompanhados sequencialmente de uma lista com os artigos correspondentes para cada parcela do gráfico, fornecendo uma lista de artigos para cada categoria aqui abordada. Alguns dados que se destacaram são a respeito dos materiais, em que 42 % são PLA e ABS, e consequentemente a essa alta proporção está na faixa de temperatura usadas na impressão, de acordo com o ponto de fusão destes materiais: cerca de 65 % dos estudos revisados trabalharam entre 140 e 240 °C. Por fim, 53 % dependem do termistor da própria impressora para monitorar a temperatura de deposição do material, enquanto que 35 % optaram por realizar tal monitoramento através de câmeras termográficas.

Palavras-chave: Impressão 3D; Monitoramento de Temperatura; Manufatura Aditiva

1. INTRODUÇÃO

Um dos métodos que vem se destacando atualmente, pela redução no tempo de fabricação, é a manufatura aditiva, onde é possível transitar, em poucas etapas, de um modelo conceitual feito em sistema CAD para um arquétipo físico. Em geral, os processos de manufatura aditiva, destacam-se pelo baixo consumo de matéria-prima, baixo refugo e por apresentar menores gastos com manutenção (Sood, 2011).

Utilizando as tecnologias ligadas ao processo de manufatura aditiva por extrusão de materiais, as máquinas popularmente conhecidas como Impressoras 3D estão cada vez mais difundidas no âmbito industrial e no mundo acadêmico. Dentre os módulos que compõem uma impressora 3D, o cabeçote extrusor dispõe de elementos responsáveis pela fusão e deposição da matéria-prima. Este sistema possui um motor que conduz o filamento ao bocal aquecido, no qual o material alcança sua temperatura de processamento, sendo então depositado sobre a plataforma de construção, onde a peça toma forma.

Este processo de condução, fusão e deposição do filamento pode apresentar problemas, afetando o desempenho do cabeçote extrusor. Dentre as principais falhas no sistema, de acordo com (Santana, 2015), destacam-se: o entupimento do tubo do bico aquecido, a perda de comando no acionamento do motor responsável por mover o filamento, e o escorregamento entre o filamento e a polia ranhurada.

Dessa maneira é fundamental o monitoramento da temperatura de extrusão durante todo o processo de impressão. No presente trabalho foram revisados cerca de 50 artigos publicados nos últimos 5 anos (a partir de 2018), com o intuito de levantar estatísticas e também tendências sobre as pesquisas envolvendo impressão 3D. Apesar do foco desta pesquisa estar no monitoramento da temperatura de extrusão do material durante a impressão, também foram estudados outros parâmetros que se correlacionam com este. Foram levantados dados sobre os materiais utilizados para realizar a impressão, pois a temperatura de extrusão é função do ponto de fusão do material trabalhado.

Para expor os dados levantados, foram plotados gráficos os quais indicam tendências e lacunas para dar base para futuros pesquisadores que buscam estudar as temperaturas durante um processo de impressão 3D. Tais gráficos são acompanhados sequencialmente de uma lista com os artigos correspondentes para cada parcela do gráfico, fornecendo uma lista de artigos para cada categoria aqui abordada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com base no tema abordado e nos principais resultados encontrados, este tópico dedica-se a explicar os principais itens destacados nos artigos revisados, deixando mais coeso os jargões, equipamentos e materiais apresentados nos resultados do presente estudo. Os 50 artigos revisados, foram selecionados com auxílio do buscador *Science Direct*, filtrando os artigos dos últimos 5 anos, ordenados por relevância e cruzando as mesmas palavras-chaves citadas neste presente trabalho. Não necessariamente são os 50 primeiros na ordem de relevância, pois alguns, mesmo com palavras chaves correspondentes, não atendem o foco desta revisão e estes artigos então tiveram de ser pospostos aos artigos admitidos nesta revisão.

2.1. Impressão 3D / Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é o conjunto de tecnologias de impressão 3D que permite criar objetos a partir do zero utilizando modelos digitais. Com ela, é possível produzir peças complexas otimizando recursos. Funcionam adicionando camadas de material, uma sob a outra, até formar o objeto final através de impressoras 3D (3D Lab, 2022). A Figura 1 ilustra uma típica impressora 3D atual.

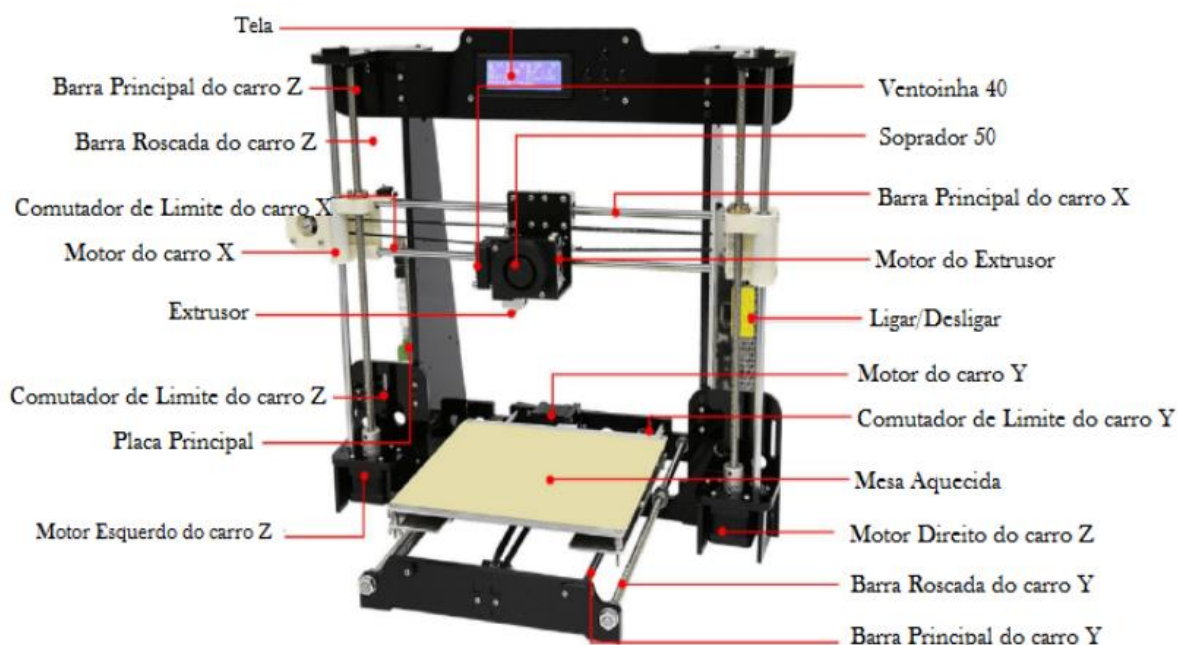


Figura 1. Detalhamento de uma típica impressora 3D. Fonte: Agrotama, 2022.

Dentre suas vantagens pode-se citar:

- custo: permite que peças sejam produzidas em pequenas quantidades, diminuindo o custo unitário;
- rapidez: produção eficiente do projeto digital ao modelo físico possibilita uma prototipagem rápida;
- complexidade: permite a criação de peças com geometrias complexas;
- customização: os produtos são totalmente personalizáveis de acordo com as necessidades;
- sustentabilidade: o uso reduzido de material gera menor volume de resíduos e gasta pouca energia.

Em contrapartida, como desvantagens estão:

- Alto investimento: As impressoras e seus insumos são relativamente caros;
- Custos com manutenção: É necessário conhecimento técnico para um bom resultado;
- Uso de softwares específicos: É preciso usar softwares específicos de modelagem 3D.

As principais variáveis que vão definir a qualidade das peças são: velocidade de deposição do material, quantidade de material depositado e densidade da deposição e a temperatura do material. Sobre a velocidade, ela é limitada pelos motores

da máquina. A quantidade de material está no diâmetro do bocal e também na velocidade de alimentação do filamento. Essas variáveis são facilmente monitoradas e calculadas. Agora se tratando da temperatura, esta variável é muito visada como objetivo de estudo nessa área.

2.2. Principais temperaturas monitoradas numa impressão 3D

Há vários parâmetros envolvidos na impressão de peças 3D, como a velocidade da extrusão, o diâmetro do bocal, etc. No presente trabalho o foco está no monitoramento da temperatura de extrusão, que é aferida no bocal da impressora. É importante ressaltar que, se tratando de monitoramento de temperatura, há 3 regiões que se destacam: mesa, bocal e câmara (rever figura 1).

2.2.1 Mesa

À medida que o material impresso esfria, ele encolhe e se contrai. Isso pode ser particularmente problemático para as primeiras camadas, já que essa alteração no tamanho pode frequentemente fazer com que a peça se separe da mesa de impressão, arruinando o projeto. Por isso é preciso que a mesa seja aquecida. Assim há uma melhor aderência da primeira camada e controle do resfriamento do material, fazendo com que ele seja mais lento (3DLab, 2022).

Caso a temperatura da mesa esteja abaixo do ideal, as impressões não irão aderir à mesa. Uma mesa mais quente pode ajudar a “amolecer” o plástico, permitindo que ele grude. Já para o caso de a temperatura estar acima do ideal, as impressões podem acabar com “pé de elefante”. Pé de elefante é o nome dado quando as primeiras camadas da impressão são derretidas e o peso da peça as comprime.

2.2.2. Câmara

Para o caso de impressões de materiais especiais, pode ser necessário uma extrusão com temperaturas muito altas ou muito baixas. Nesse caso é fundamento o uso de uma câmara que isole a impressão do ambiente. As câmaras também podem ser utilizadas nas temperaturas comumente trabalhadas, com intuito de economizar energia, visto que o calor gerado não vai se dissipar no ambiente.

Materiais que geralmente precisam ser operados em temperatura negativa são fármacos e orgânicos, como proteínas. No trabalho de Liu (2019), trabalhou-se à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para evitar que uma proteína se desnaturizasse. Na Figura 2 é possível ver que a câmara atua como um refrigerador.

Também há casos como o artigo de Zenzinger (2015) em que o autor trabalhou a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, com um metal, uma temperatura muito acima da faixa usual para impressão 3D.

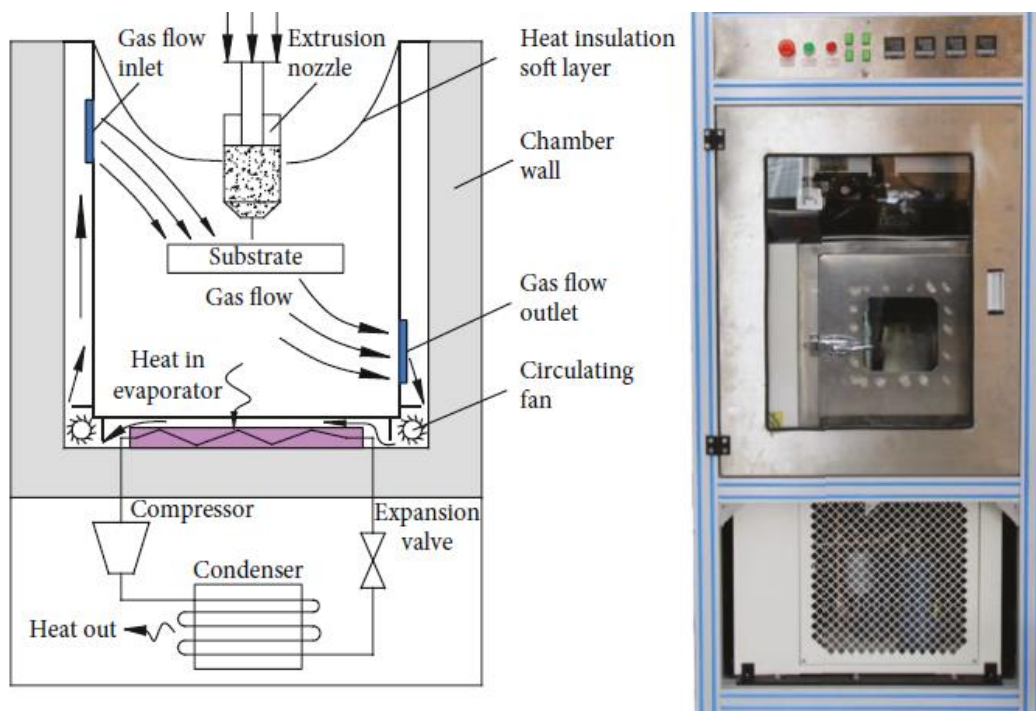


Figura 2. Câmara isolando uma impressão 3D, no caso refrigerando a impressão. Fonte Liu, 2019.

2.2.3. Bocal

A temperatura do bocal, que é onde ocorre a extrusão do material, essa precisa ser monitorada o tempo todo. Uma temperatura inadequada na extrusão pode acarretar em problemas como: o entupimento do tubo do bico aquecido, a perda de comando no acionamento do motor responsável por mover o filamento, e o escorregamento entre o filamento e a polia ranhurada.

É sobre o monitoramento dessa temperatura que se trata a revisão do presente trabalho. O bocal de extrusão, deve possuir temperatura de operação correspondente à faixa do processo de fusão do material utilizado, cujo valor também deve ser obedecido segundo seu respectivo fabricante. O controle adequado deste componente de impressão resulta na conformidade esperada com relação à espessura da camada depositada no processo de impressão, garante as boas características mecânicas da peça impressa e também é responsável por garantir que haja de fato a deposição do material e adesão entre camadas, pois caso não seja atingido o valor de temperatura necessária para fusão, o mesmo se encontraria em estado sólido, impossibilitando assim o processo. A Figura 3 ilustra o bocal durante uma impressão 3D.

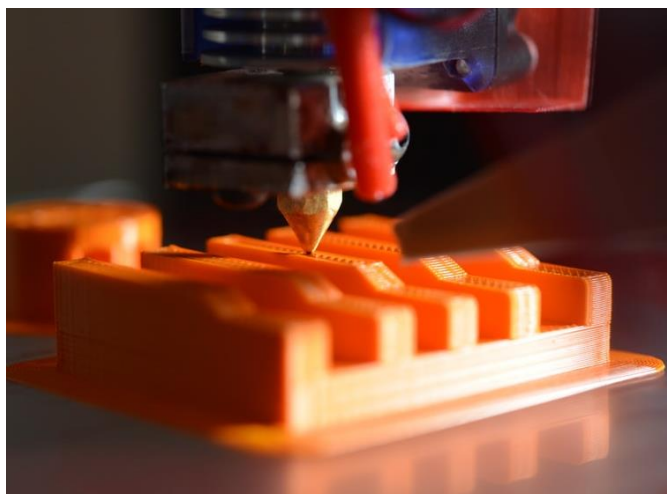


Figura 3. Impressão com foco no bocal. Fonte: Unsplash, 2022.

2.3. Principais materiais comuns para impressão 3D

A maioria dos materiais utilizados para impressão 3D são PLA (Ácido Polilático) e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). Algumas diferenças que se destacam entre estes materiais é que o ABS apresenta uma resistência mecânica e térmica maiores do que o PLA, e é fácil de ser lixado porque apresenta dureza superficial menor que o PLA. O material ABS, tem origem no petróleo, e reage à acetona pura, usada para dar acabamento e deixar a peça lisa, suavizando os efeitos de degraus das camadas.

A seguir na Tabela 1, temos um resumo de propriedades mecânicas do PLA e ABS, evidenciando algumas diferenças. Nos tópicos seguintes estes materiais serão descritos mais detalhadamente.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do PLA e ABS. Fonte 3DLab, 2022.

Propriedades	PLA	ABS
Densidade	1,24 [g/cm ³]	1,04 [g/cm ³]
Temperatura de Fusão	185 [°C]	220 [°C]
Resistência a Flexão	130 [Mpa]	66 [Mpa]
Tensão de Ruptura	46 [Mpa]	29 [Mpa]
Alongamento	3,69%	7,08%

2.4. Técnicas de monitoramento de temperatura destacados neste review

Apesar da existência de várias técnicas de monitoramento de temperatura, se tratando de impressão 3D, nos artigos mais recentes os autores optaram por utilizar entre apenas 4 técnicas. Tais técnicas serão brevemente explanadas nos tópicos a seguir.

2.4.1. Termopar

Termopares são sensores de temperatura simples, robustos, muito confiáveis em suas medições e de baixo custo. Sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura, o termopar é constituído de dois metais distintos unidos em uma das extremidades (Figura 4). Existem vários tipos de termopares industriais que permitem medir temperaturas entre $-270 \sim 2320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mundo da Elétrica, 2022).

A Força Eletromotriz (FEM) gerada pelo termopar quando conectada em um instrumento de medição é capaz de ler a temperatura relacional do objeto (Contemp, 2022). As principais vantagens são:

- Estão entre as opções mais práticas do mercado, possuindo um custo baixíssimo;
- Tem um range de temperatura muito maior do que diversos outros sensores;
- Possuem uma deterioração desprezível, podendo durar muito mais do que outros sensores;
- Não precisam que todo o corpo esteja com a temperatura estabilizada para que façam uma aferição;
- São resistentes mecanicamente;
- Não auto aquecem;
- Podem ser instalados em locais de grande vibração;
- Podem ser usados em temperaturas acima de 500°C .

Desvantagens:

- Possuem uma boa precisão dentro da faixa de utilização, contudo, não é a maior do mercado;
- Possuem limite de distância para a sua utilização;
- Necessitam de fios e cabos de extensão e compensação para a ligação.



Figura 4. Exemplo típico de um termopar.

2.4.2. Termômetro

Os termômetros são equipamentos utilizados para realizar a medição de temperatura e sua construção baseia-se no uso de grandezas físicas que dependem da variação de temperatura (Figura 5). Existem vários tipos: gás, mercúrio, bimetálico, fio de platina, etc.



Figura 5. Exemplo similar à um termômetro capaz de ser acoplado num bocal de impressora 3D. Para tal aplicação é necessário adaptações.

2.4.3. Termistor

São dispositivos elétricos (Figura 6) que têm a sua resistência elétrica alterada termicamente, isto é, apresentam um valor de resistência elétrica para cada temperatura absoluta (Ppgenfis, 2022). Os termístors geralmente apresentam coeficiente de temperatura negativo, o que significa que a resistência do termístor diminui à medida que a temperatura aumenta. Geralmente, os termístors conseguem trabalhar em um intervalo de temperatura de $-200\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, na faixa de temperatura que compreende $-50^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ o sensor tem uma estabilidade maior.

As principais vantagens deste equipamento é alta sensibilidade, o coeficiente de temperatura do termistor é mais de 10~100 vezes maior do que o do metal e pode detectar mudanças de temperatura de $6\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; ampla faixa de temperatura operacional, dispositivos de temperatura normal são adequados para $-55\sim 315\text{ }^{\circ}\text{C}$, dispositivos de alta temperatura são adequados para temperaturas acima de $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ (atualmente o mais alto pode chegar a $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$), o dispositivo de baixa temperatura é adequado para $-273\sim -55\text{ }^{\circ}\text{C}$; é pequeno em tamanho e pode medir a temperatura do espaço que outros termômetros não podem medir.

A principal desvantagem do termistor é que a relação entre resistência e temperatura é não linear e séria; e a consistência dos componentes é pobre, e a intercambialidade é pobre; uma vez danificado, é difícil encontrar produtos intercambiáveis. Além disso, os componentes dos termistores estão sujeitos ao envelhecimento e sua estabilidade é relativamente baixa; e exceto para termistores especiais de alta temperatura, a maioria dos termistores são adequados apenas para a faixa de $0\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Top Heater China, 2022).



Figura 6. Exemplo típico de um termístor.

2.4.4. Termografia

Termografia é uma técnica não destrutiva e não invasiva, que permite a captura de imagens para determinar a temperatura dos componentes através da intensidade da radiação infravermelha que ele emite. A **termografia** figura como uma ferramenta eficaz para identificar o desperdício energético em forma de calor. Assim, permite o planejamento de ações que contribuam com o aumento da eficiência dos equipamentos (Abecom, 2022). Através do termovisor, fica extremamente fácil a localização de regiões quentes ou frias (Figura 7), através da interpretação dos termogramas que fornecem imagens, em faixas de temperatura que podem cobrir de $-40\sim 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O equipamento de termografia permite que uma grande área seja avaliada. Como o equipamento de termografia pode ser usado em uma área grande, ele serve para alguns usos práticos. A tecnologia de termografia atual permite a gravação em tempo real, em vez de apenas instantâneos. A detecção de infravermelho é muito importante para tubos e poços que são construídos em edifícios, arranha-céus e casas.

Se as temperaturas estiverem muito próximas, a imagem infravermelha pode levar a informações de leitura errada tiradas da câmera; objetos podem se tornar indistinguíveis. A tecnologia atual em termografia só permite que imagens sejam aplicadas às temperaturas da superfície. A desvantagem da termografia é o preço associado aos equipamentos de imagem térmica. Este equipamento é raramente usado por qualquer pessoa que não seja grandes empresas, serviços públicos ou instituições educacionais devido ao preço que custa para comprar equipamentos (Science Aq, 2022).

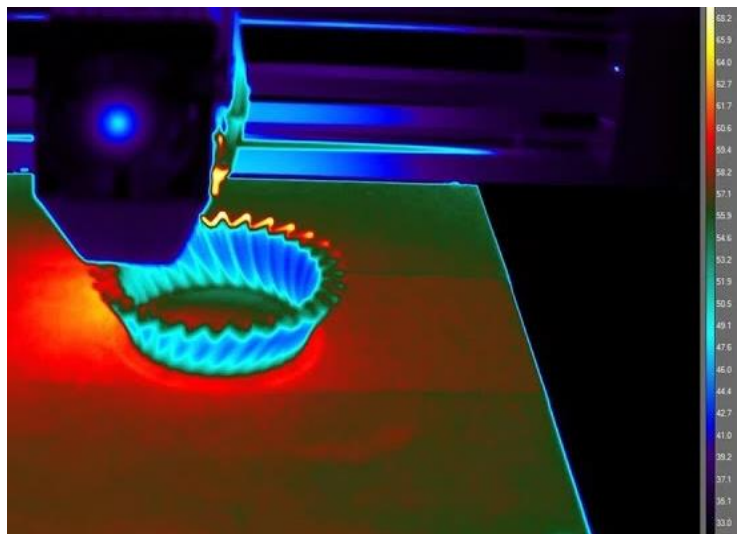


Figura 7. Exemplo típico de uma termografia durante uma impressão 3D.

3. RESULTADOS

Após a investigação dos artigos foram levantados os dados sobre os tipos de ensaios usados para o monitoramento da temperatura de extrusão, assim como as faixas de temperatura trabalhadas e os materiais trabalhados (importantes pelo seu ponto de fusão). A seguir cada um destes itens serão abordados e seus respectivos artigos citados. Um dado extra trata-se do uso de câmaras. Menos de 15 % dos artigos revisados utilizaram câmaras durante a impressão. São eles: Zhao (2018), Hu *et al.* (2019), Liu (2019), Zenzinger (2015) e Dinwiddie (2013).

3.1. Materiais mais utilizados

Os materiais utilizados na impressão, são quem vão definir a faixa de temperatura trabalhada, devido ao ponto de fusão do material. O gráfico da Figura 8 ilustra as porcentagens encontradas na revisão para os materiais trabalhados, enquanto que a Tabela 2 correlaciona cada tipo de material com os respectivos artigos revisados.

Em primeiro lugar, o PLA esteve presente em 28% dos artigos revisados. É o dobro do segundo colocado, o ABS, com 14%. Estes foram os únicos materiais que estiveram presentes em vários artigos.

A categoria “Vários” (representando 11 %), trata-se de pesquisas que envolver 2 ou mais materiais distintos, e que às vezes podem incluir o PLA e ABS. Já a categoria “Outros”, com 47%, refere-se à artigos que trabalharam com um único material, mas que difere de PLA e ABS. Não houve nenhum material repetido nessa categoria, cada artigo trabalhou com um material até então único. Nessa categoria se encontram fármacos, proteínas, substâncias orgânicas, materiais patenteados... Tratam-se de estudos que visam avaliar a aplicabilidade de um material muito específico dentro da manufatura aditiva, e tal fatia corresponde à metade dos artigos revisados.

Uma observação é que mesmo variando os materiais, estes geralmente possuem ponto de fusão próximo ao PLA e ABS, visto os pesquisadores utilizam das impressoras comumente comercializadas, e que possuem melhor capacidade de operação próximo das temperaturas de fusão do PLA e ABS por exemplo.

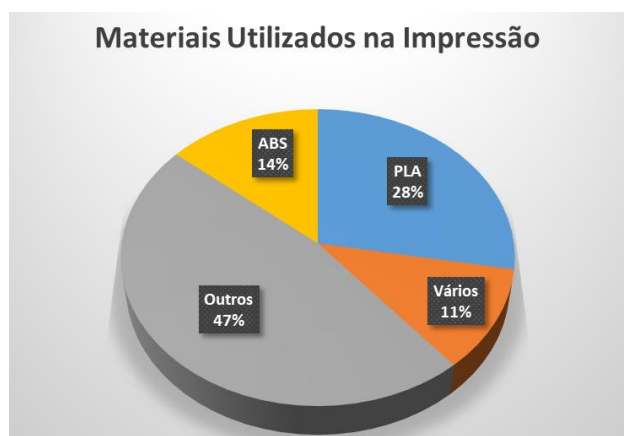


Figura 8. Gráfico com as porcentagens dos artigos revisados em função dos tipos de materiais trabalhados.

Tabela 2. Artigos em função dos materiais trabalhados.

Material Trabalhado	Artigo
PLA	14, 12, 29, 45, 15, 20, 22, 5, 10 e 7.
ABS	31, 20, 37, 9 e 38.
Vários	36, 28, 8 e 25.
Outros	48, 30, 21, 24, 49, 23, 11, 25, 19, 26, 42, 41, 35, 46, 16, 47 e 17.

3.2. Faixas de Temperaturas mais trabalhadas

O gráfico da Figura 9 ilustra quantidade de artigos revisados em função da faixa de temperatura que os autores trabalharam. A maioria dos estudos permaneceram com uma temperatura de extrusão entre 140 e 240 °C, que é a faixa de trabalho que abrange o ponto de fusão do PLA e ABS. Tal faixa pode ser medida por inúmeras técnicas de medição de temperatura.

Mas há vários materiais em faixas separadas. Destaca-se alguns artigos com temperaturas negativas, próximo de zero, e também muito altas acima de 1200 °C (uma observação sobre o gráfico é que este artigo com temperatura de 1200 ficou fora da imagem para manter uma melhor proporção de escala).

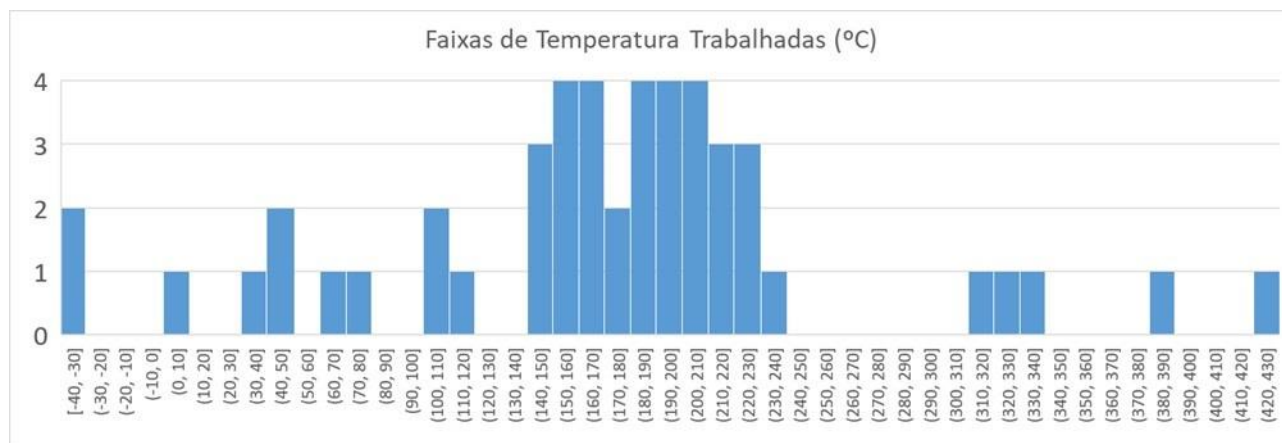


Figura 9. Gráfico com número de artigos revisados em função de faixar de temperatura de extrusão.

Os artigos que se destacaram por temperaturas incomuns serão citados na Tabela 3. Uma observação é que destes 6 artigos com temperaturas incomuns, 3 utilizaram o uso de câmaras, foram eles: Hu *et al.* (2019), Liu (2019) e Zenzinger (2015).

Tabela 3. Artigos que trabalharam em temperatura incomuns.

Temperatura [°C]	Artigo
-40	28 e 26
2	16
385	21
430	24
1200	47

3.3. Técnicas mais utilizados para monitorar a extrusão durante a impressão 3D

Em artigos mais antigos era possível encontrar o uso de equipamentos como pirômetros e até mesmo mais variações de termômetros. Porém ao focar a revisão em artigos publicados apenas nos últimos 5 anos, o resultado foi apenas o uso de 4 técnicas para o monitoramento da temperatura de extrusão, dando destaque para 2 tipos que predominaram. Mesmo que o presente trabalho não tem revisado todos as publicações no período citado, este resultado já indica uma forte tendência nesta área de pesquisas da manufatura aditiva.

O gráfico da Figura 10 ilustra as porcentagens encontradas na revisão para as técnicas trabalhadas, enquanto que a Tabela 4 correlaciona cada tipo de técnica utilizadas para monitorar a extrusão e seus respectivos artigos revisados.

Termômetro representou 9 % dos artigos revisados, e termopar apenas 3 %. Nestes artigos os autores não destacaram imagens da aplicação da técnica. Em casa caso destas técnicas é preciso uma adaptação especial para que o bocal possa ser aferido durante seu trabalho.

Em metade dos artigos revisados a técnica utilizada foi o uso de termistor, com 53%. Este tipo de sensor geralmente vem acoplado de fábrica da impressora 3D, por isso é tão muito utilizado. Geralmente para faixas de temperaturas comumente utilizadas (como visto no item anterior 3.2), estes componentes atendem bem para este monitoramento de temperatura, porém há limitações neste monitoramento.

O ensaio não destrutivo que se destaca é foi termografia, em 35% dos artigos revisados. Há uma clara tendência no uso dessa técnica por ser muito prático e mapear o processo, dando uma grande fonte de dados para os pesquisadores. As termocâmera destacam a temperatura superficial das peças, e no caso da impressão 3D, como o material é depositado em camadas muito finas, a temperatura superficial que a termocâmera registra, é muito próxima da temperatura real da camada depositada.

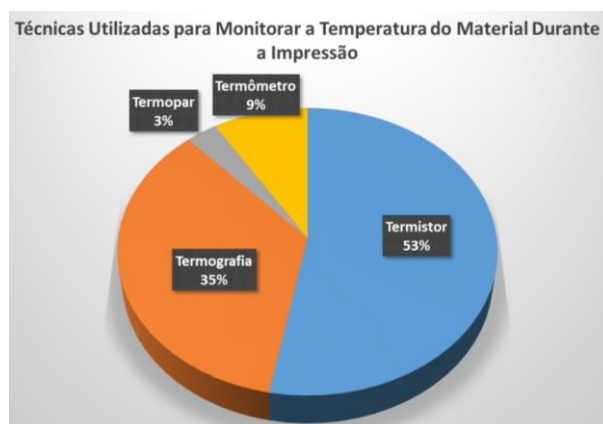


Figura 10. Gráfico com as porcentagens dos artigos revisados em função dos tipos de técnicas de monitoramento de temperatura de extrusão trabalhadas.

Tabela 4. Artigos em função das técnicas de monitoramento de temperatura de extrusão utilizadas.

Técnica	Artigo
Termopar	48
Termômetro	30, 24 e 16.
Termistor	14, 12, 45, 15, 21, 49, 23, 5, 28, 11, 25, 8, 10, 26, 42, 35, 27 e 46.
Termografia	29, 36, 31, 20, 37, 22, 19, 7, 9, 47, 38 e 17.

Na Figura 11 é exemplificado uma típica bancada com o uso de termocâmera numa impressão 3D, mostrando a fácil aplicação desta técnica neste processo. Outras técnicas de monitoramento na impressão (sem foco na temperatura) também foram registrados durante a revisão, porém em quantidade ínfima. Ensaios não destrutivos são mais comuns para a avaliação da peça já produzida, e não monitoramento da produção da peça. Se tratando de monitoramento, o destaque foi para termografia e termístors para acompanhar a temperatura de extrusão.

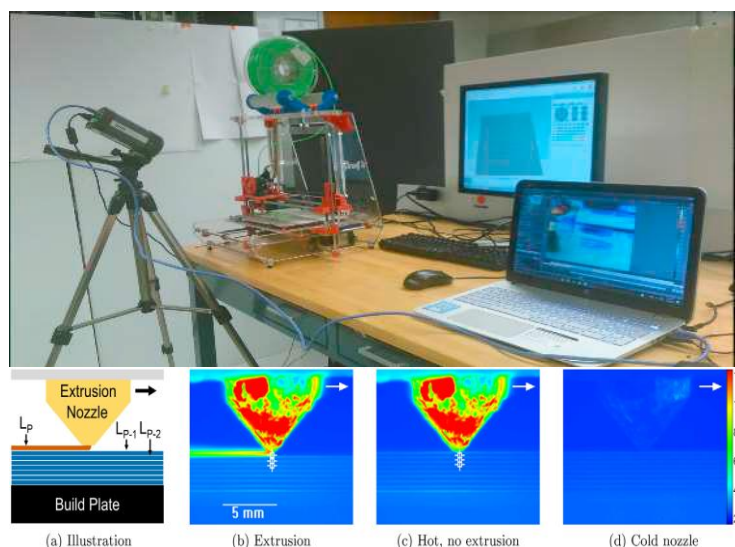


Figura 11. Exemplo do uso de termografia para o monitoramento da temperatura de extrusão durante uma impressão 3D. Fonte Malekipour *et al.*, 2018.

4. CONCLUSÕES

A seguir lista-se algumas estatísticas destacadas nesta revisão, indicando tendências e também lacunas nos estudos que envolvem monitoramento da temperatura durante impressão 3D:

- O PLA é o material mais utilizado, representando 28 %, e seguido do ABS, com 14 %. Juntos são 42 %, logo a temperatura do ponto de fusão destes materiais seja referência numa grande parcela dos artigos revisados;
- 65 % dos estudos revisados trabalharam entre 140 e 240 °C (temperaturas que englobam o ponto de fusão do PLA e ABS). A quantidade de artigos que trabalham com temperaturas negativas ou muito altas (acima de 1000 °C) são pouquíssimos, pois são casos que dependem de um material muito específico, e geralmente precisam de uma câmara para isolar a impressora durante a impressão;
- 53 % dos artigos dependem apenas do termistor (componente da própria impressora) para monitorar a temperatura de deposição do material, enquanto que 35 % optaram por realizar tal monitoramento através de câmera termográfica. Estes foram os métodos que mais se destacaram.

5. REFERÊNCIAS

1. 3dfila, 2022. Disponível em <<https://3dfila.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/#h-fabrica-o-do-pla>> Acesso em 26/06/2022.
2. 3dlab, 2022. Disponível em <<https://3dlab.com.br/o-que-e-manufatura-aditiva/>> Acesso em 26/06/2022.
3. 3dlab, 2022. Disponível em <<https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/#:~:text=Isso%20pode%20ser%20particularmente%20problem%C3%A1tico,utilizar%20110%C2%BAC%20para%20a%20mesa.>>
4. Abecom, 2022. Disponível em <<https://www.abecom.com.br/termografia/>> Acesso em 26/06/2022.
5. Afonso, João Araújo et al. *Influence of 3D printing process parameters on the mechanical properties and mass of PLA parts and predictive models*. Rapid Prototyping Journal, 2021.
6. Agrotama, 2022. Disponível em <https://www.agrotama.com.br/upload/album/16032_MANUAL%20DE%20MONTAGEM_GARANTIA.pdf> Acesso em 26/06/2022.
7. Bechtel, Stephan et al. *Estimation of the adhesion interface performance in aluminum-PLA joints by thermographic monitoring of the material extrusion process*. Materials, v. 13, n. 15, p. 3371, 2020.
8. Bong, Shin Hau et al. *Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications*. Materials, v. 12, n. 6, p. 902, 2019.
9. Borish, Michael et al. *Real-time defect correction in large-scale polymer additive manufacturing via thermal imaging and laser profilometer*. Procedia Manufacturing, v. 48, p. 625-633, 2020.
10. Carlier, E. et al. *Investigation of the parameters used in fused deposition modeling of poly (lactic acid) to optimize 3D printing sessions*. International Journal of Pharmaceutics, v. 565, p. 367-377, 2019.
11. Cheng, Meng et al. *Elevated-temperature 3D printing of hybrid solid-state electrolyte for Li-ion batteries*. Advanced Materials, v. 30, n. 39, p. 1800615, 2018.
12. Colella, R.; Catarinucci, L. *Wearable UHF RFID sensor tag in 3D-printing technology for body temperature monitoring*. In: 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). IEEE, 2018. p. 1-4.
13. Contemp, 2022. Disponível em <<https://contemp.com.br/2022/04/12/quais-sao-as-vantagens-e-desvantagens-no-uso-do-termopar/#:~:text=Possuem%20uma%20boa%20precis%C3%A3o%20dentro,e%20compensa%C3%A7%C3%A3o%20para%20a%20liga%C3%A7%C3%A3o>> Acesso em 26/06/2022.
14. Coppola, Bartolomeo et al. *3D printing of PLA/clay nanocomposites: Influence of printing temperature on printed samples properties*. Materials, v. 11, n. 10, p. 1947, 2018.
15. Coppola, Bartolomeo et al. *3D printing of PLA/clay nanocomposites: Influence of printing temperature on printed samples properties*. Materials, v. 11, n. 10, p. 1947, 2018.
16. Daffner, Kilian et al. *Design and characterization of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route for application in extrusion-based 3D-Printing*. Food Hydrocolloids, v. 112, p. 105850, 2021.
17. Dinwiddie, Ralph B. et al. *Thermographic in-situ process monitoring of the electron-beam melting technology used in additive manufacturing*. In: Thermosense: thermal infrared applications XXXV. SPIE, 2013. p. 156-164.
18. Ecycle, 2022. Disponível em <<https://www.ecycle.com.br/plastico-abs/>> Acesso em 26/06/2022.
19. El Moumen, Ahmed; Tarfaoui, Mostapha; Lafdi, Khalid. *Modelling of the temperature and residual stress fields during 3D printing of polymer composites*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 104, n. 5, p. 1661-1676, 2019.
20. Goh, K. H. H.; Lim, Q. F.; Pallathadka, P. K. *Asynchronous lock in thermography of 3d printed pla and abs samples*. arXiv preprint arXiv:1805.01343, 2018.

21. Hu, Bin et al. *Improved design of fused deposition modeling equipment for 3D printing of high-performance PEEK parts*. Mechanics of Materials, v. 137, p. 103139, 2019.
22. Huang, DingYi Monique; TIGHE, Rachael C.; MCDONALD-WHARRY, John S. *Thermographic assessment of fibre reinforced 3D printing filament*. In: ICCM22 2019. Melbourne, VIC: Engineers Australia, 2019. p. 3759-3763.
23. Kim, Haeri et al. *Gelatin/PVA scaffolds fabricated using a 3D-printing process employed with a low-temperature plate for hard tissue regeneration: Fabrication and characterizations*. International journal of biological macromolecules, v. 120, p. 119-127, 2018.
24. Kollamaram, Gayathri et al. *Low temperature fused deposition modeling (FDM) 3D printing of thermolabile drugs*. International journal of pharmaceutics, v. 545, n. 1-2, p. 144-152, 2018.
25. Kotikian, Arda et al. *3D printing of liquid crystal elastomeric actuators with spatially programed nematic order*. Advanced materials, v. 30, n. 10, p. 1706164, 2018.
26. Lee, Hyeongjin et al. *Fabrication of micro/nanoporous collagen/dECM/silk-fibroin biocomposite scaffolds using a low temperature 3D printing process for bone tissue regeneration*. Materials Science and Engineering: C, v. 84, p. 140-147, 2018.
27. Li, Xiangjia et al. *3D printing temporary crown and bridge by temperature controlled mask image projection stereolithography*. Procedia Manufacturing, v. 26, p. 1023-1033, 2018.
28. Liu, Changyong et al. *Low-temperature deposition manufacturing: a versatile material extrusion-based 3D printing technology for fabricating hierarchically porous materials*. Journal of Nanomaterials, v. 2019, 2019.
29. Liu, Zengguang et al. *A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 102, n. 9, p. 2877-2889, 2019.
30. Luo, Yuanyuan et al. *3D printing of poly (propylene fumarate) oligomers: Evaluation of resin viscosity, printing characteristics and mechanical properties*. Biomacromolecules, v. 20, n. 4, p. 1699-1708, 2019.
31. Malekipour, Ehsan; Attoye, Samuel; El-Mounayri, Hazim. *Investigation of layer based thermal behavior in fused deposition modeling process by infrared thermography*. Procedia Manufacturing, v. 26, p. 1014-1022, 2018.
32. Mundoeletrica, 2022. Disponível em <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-termopar/>> Acesso em 26/06/2022.
33. Ppgenfis, 2022. Disponível em <<https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Termistor.html>> Acesso em 26/06/2022.
34. Santana, Leonardo et al. *Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA*. 2015.
35. Schirmeister, Carl G. et al. *3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication*. Additive Manufacturing, v. 28, p. 152-159, 2019.
36. Sels, Seppe et al. *A CAD matching method for 3D thermography of complex objects*. Infrared Physics & Technology, v. 99, p. 152-157, 2019.
37. Seppala, Jonathan E.; MIGLER, Kalman D. *Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing*. Additive manufacturing, v. 12, p. 71-76, 2016.
38. Seppala, Jonathan E.; MIGLER, Kalman D. *Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing*. Additive manufacturing, v. 12, p. 71-76, 2016.
39. Sienceaq, 2022. Disponível em <<http://pt.sienceaq.com/Physics/100403693.html>> Acesso em 26/06/2022.
40. Sood, A. K. *Study on parametric optimisation of fused deposition modelling (FDM) process [Ph. D. Thesis]*. Rourkela, Odisha: Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2011.
41. Steyrer, Bernhard et al. *Hot Lithography vs. room temperature DLP 3D-printing of a dimethacrylate*. Additive Manufacturing, v. 21, p. 209-214, 2018.
42. Tang, Zhangzhang et al. *3D printing of a versatile applicability shape memory polymer with high strength and high transition temperature*. Chemical Engineering Journal, v. 431, p. 134211, 2022.
43. Top-Heaterchina, 2022. Disponível em <<http://www.top-heaterchina.com/info/advantages-and-disadvantages-of-thermistors-60846788.html>> Acesso em 26/06/2022.
44. Unsplash, 2022. Disponível em <<https://unsplash.com/s/photos/3d-printing>> Acesso em 26/06/2022.
45. Woern, Aubrey L. et al. *Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties*. Materials, v. 11, n. 8, p. 1413, 2018.
46. Wu, Wenzheng et al. *3D printing of thermoplastic PI and interlayer bonding evaluation*. Materials Letters, v. 229, p. 206-209, 2018.
47. Zenzinger, Guenter et al. *Process monitoring of additive manufacturing by using optical tomography*. In: AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2015. p. 164-170.
48. Zhao, Jingxin et al. *3D printing fiber electrodes for an all-fiber integrated electronic device via hybridization of an asymmetric supercapacitor and a temperature sensor*. Advanced Science, v. 5, n. 11, p. 1801114, 2018.
49. Zhu, Junzhe et al. *3D printing of multi-scalable structures via high penetration near-infrared photopolymerization*. Nature communications, v. 11, n. 1, p. 1-7, 2020.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

REVIEW OF EXTRUSION TEMPERATURE MONITORING METHODS DURING 3D PRINTING TESTS

Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Maria Alice de Oliveira

Thiago de Oliveira Santos

Éder Costa Silva

Álison Rocha Machado

Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia, av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, Brasil

felipechagas@ufu.br, m.alice@ufu.br, thiago.de@ufu.br, edercosta@ufu.br, alissonr.machado@gmail.com

Abstract. In this review, around 50 articles were reviewed, among the most relevant and published in the last 5 years., with the aim of raising statistics and trends in research involving 3D printing (additive manufacturing), focusing on monitoring the temperature of the nozzle (of the material in extrusion) during printing. This stage of conducting, melting and deposition of the filament can present some problems, affecting the performance of the extruder head, implying the need to monitor this stage. Among the main failures in the system, the following stand out: clogging of the heated nozzle tube, loss of command in activating the motor responsible for moving the filament, and slippage between the filament and the pulley. Another advantage of carrying out such monitoring is the detection of possible points of failure in the part, optimizing an evaluation and finishing of the final part. Going further, in this present work, data were also collected on the materials used to perform the printing, since the extrusion temperature is a function of the melting point of the printed material. Finally, graphs were raised which indicate trends and gaps to provide a basis for future researchers who seek to study temperatures during a 3D printing process. Such graphs are sequentially accompanied by a list with the corresponding articles for each portion of the graph, providing a list of articles for each category discussed here. Some data that stood out are regarding the materials, in which 42% are PLA and ABS, and consequently this high proportion is in the temperature range used in printing, according to the melting point of these materials: about 65% of reviewed studies worked between 140 and 240 °C. Finally, 53% depend on the printer's thermistor to monitor the material's deposition temperature, while 35% chose to carry out such monitoring through thermographic cameras.

Keywords: 3D printing; Temperature Monitoring; Additive Manufacturing

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.