

## UMA ABORDAGEM VIA CNC PARA A GERAÇÃO DE PADRÕES DE PONTOS PARA ANÁLISES POR CDI

**Matheus Barbosa Andrade Moser Oberg**

**Carla Tatiana Mota Anflor**

**Universidade de Brasília- UnB**

**Grupo de Mecânica Experimental e Computacional – GMEC**

**Endereço:** Área Especial de Indústria Projeção A, UNB - DF-480 - Gama Leste, Brasília - DF, 72444- 240.

**RESUMO:** A correlação digital de imagens (CDI) é uma técnica de metrologia óptica capaz de fornecer informações acerca da deformação de superfícies carregadas mecanicamente a partir da análise de imagens digitais desta superfície. Isto se dá por meio da análise comparativa entre imagens digitais tomadas antes e depois do carregamento. Esta técnica requer que um padrão de pontos de distribuição aleatória seja marcado sobre a superfície a ser estudada. Este padrão de pontos fornece uma referência para o procedimento de correlação, permitindo que o CDI obtenha a deformação da superfície com base na deformação do padrão. Diversos estudos recentes afirmam que a qualidade do padrão de pontos utilizados tem direta influência na qualidade dos resultados das análises por CDI. Apesar de muitos estudos numéricos apontarem parâmetros ótimos para os padrões de pontos, a carência de técnicas adequadas para a sua reprodução sobre superfícies impossibilita a sua utilização prática. Diante disto, este trabalho apresenta uma metodologia numérica para geração dos padrões de pontos e também o desenvolvimento de um equipamento de marcação por comando numérico computadorizado capaz de reproduzi-los sobre superfícies reais com precisão.

**Palavras-chave:** Correlação digital de imagens, Padrões de pontos, Marcação por comando numérico computadorizado

**ABSTRACT:** Digital image correlation (DIC) is an optical metrology technique used to acquire deformational and displacement data of mechanically loaded surfaces based on digital images taken before and after the loading. To achieve this, this technique requires the studied surface to have a randomly distributed speckle pattern marked over it. This speckle pattern provides a reference for the image correlation procedure, allowing the DIC system to obtain the surface deformation based on the speckle pattern deformation. In this sense, as already stated in many recent studies, the quality of the used speckle pattern has direct influence on the quality of the DIC results. Although many numerical studies have already defined near optimum parameters for a speckle pattern, the lack of proper techniques to reproduce it on surfaces renders it impractical. In sight of this, this work presents a numerical methodology for the generation of speckle patterns and the development of a computadorized numerical control marking equipment capable of accurately reproducing it on real surfaces.

**Palavras-Chave:** Digital image correlation, Speckle patterns, Computadorized numerical control marking.

**RESUMEN:** La correlación digital de imagen (CDI) es una técnica de metrología óptica capaz de brindar informaciones acerca de la deformación de superficies cargadas mecánicamente a partir del análisis de imágenes digitales de esa superficie, anteriores y posteriores a la carga. Para eso, esta técnica requiere que un patrón de puntos, de distribución aleatoria, sea diseñado sobre la superficie a ser estudiada. Este patrón de puntos sirve de referencia para el análisis de correlación de imagen, de manera que las informaciones de deformación de la superficie son obtenidas con base en la deformación experimentada por este patrón de puntos después de la aplicación de la carga. De esta forma, como muestran diferentes estudios recientes, la calidad del patrón de puntos utilizados tiene una influencia directa en la calidad de los resultados de los análisis hechos por CDI. A pesar de que muchos estudios numéricos muestran buenos parámetros para los patrones de puntos, la falta de técnicas adecuadas para su reproducción sobre superficies imposibilita su utilización práctica. Con lo anterior, este trabajo presenta una metodología numérica para la generación de los patrones de puntos y también el desarrollo de un equipamiento de impresión de puntos por

comando numérico computarizado capaz de reproducirlos sobre superficies reales con precisión.

**Palabras Clave:** Correlación digital de imagen, Patrón de puntos, Impresión de puntos por comando numérico computarizado.

## 1 – INTRODUÇÃO

Com a evolução nas áreas de eletrônica óptica e computacional, técnicas de metrologia óptica vem sendo cada vez mais utilizadas para análises em engenharia. Dentre estas técnicas, destaca-se a análise por correlação digital de imagens (CDI), a qual se utiliza de imagens digitais de uma superfície antes e após a aplicação de uma carga de deformação para obtenção do campo de deformações. Para tal, o CDI baseia-se no mapeamento de um padrão de pontos, que devem ser distribuídos aleatoriamente sobre a superfície antes a aplicação da carga, e em uma análise de correlação, que determina a deformação sofrida pelo padrão após a carga aplicada.

Diversos trabalhos, como Pan et al. (2009) [1] e Lecompte et al. (2006) [2], enfatizam a importância do padrão de pontos utilizados diante de sua direta relação com a qualidade dos resultados obtidos pelas análises por CDI. Pan et al. (2009) [1] demonstrou por comparação entre diferentes padrões que o padrão de pontos introduz um erro de natureza aleatória ao problema. Por sua vez, Lecompte et al. (2006) [2] realizou uma análise numérica acerca da dimensão dos pontos utilizados e sua densidade de distribuição. Para um contexto de uma única sub-região mapeada, medindo 15x15 pixels, observou-se melhores resultados para padrões com pontos medindo por volta de 5 pixels e ocupando entre 40 e 70% da área de superfície em análise da superfície em análise. Complementado esta análise, Lecompte et al. (2006) [3], apresenta uma tabela de tamanhos ótimos de pontos, em pixels, para diferentes tamanhos de sub-regiões mapeadas. Já em uma abordagem mais experimental, Lecompte et al. (2007) [4], testou distribuições aleatórias de pontos geradas por pintura com spray. Em concordância com os resultados numéricos apresentados em Lecompte et al. (2006) [1], foram observados resultados mais precisos com distribuições de pontos contendo de 1 a 5 pixels. Além disso, observou-se uma correlação entre os tamanhos dos pontos utilizados nos padrões com o aumento de erros sistemáticos e aleatórios nos resultados da análise por CDI. De acordo com este trabalho, padrões compostos por pontos maiores (contendo de 1 a 13 pixels) apresentaram influência no aumento do erro aleatório, enquanto o uso de padrões compostos por pontos menores (contendo 0 a 3 pixels) acarretou em um aumento tanto do erro aleatório quanto do sistemático.

Com o passar do tempo, muitos critérios para avaliação da qualidade dos padrões utilizados foram sendo desenvolvidos. Porém, como constatado em Crammond et al. (2013) [5], estes parâmetros terminam servindo apenas como ferramentas de comparação. Esta

afirmação baseia-se no fato de que, diferentemente das análises numéricas, os aspectos práticos dos métodos utilizados para criação do padrão na superfície e o próprio equipamento utilizado acabam por proporcionar características únicas a cada experimento. Em seu trabalho, Crammond et al. (2013) [5] apresentou uma investigação sobre dois dos métodos mais comumente utilizados para criação de padrões de pontos em superfícies: pintura utilizando tinta em spray e, também, pintura com aerógrafo. Seus resultados experimentais demonstraram que distribuições mais uniformes, atingidas com técnicas de aerógrafo, proporcionaram os melhores resultados. Ainda assim, a partir dos resultados apresentados Lecompte et al. (2007) [4] e de Crammond et al. (2013) [5] fica evidente que técnicas de aplicação de padrões baseadas em pintura com tinta spray e também com aerógrafo proporcionam pouco controle acerca de importantes propriedades do padrão como o tamanho dos pontos e sua distribuição na superfície. Como apontado em Crammond et al. (2013) [5], a aleatoriedade causada pela interação do fluxo de ar com as partículas de tinta resulta na impraticabilidade de utilizar tais técnicas para criação de padrões específicos com características tidas como ótimas.

Visando contornar o problema das técnicas supracitadas, Ghorbani et al. (2015) [6] utilizou uma abordagem com um molde vazado da distribuição de pontos a ser replicada sobre uma parede de alvenaria. Este método permite aplicação de um padrão mais homogeneamente distribuído de pontos sobre a superfície, uma vez que os parâmetros de criação de pontos são determinados em função do molde produzido. Apesar de efetivo, para casos de escalas menores, como no caso de corpos de prova utilizados em ensaios de resistência mecânica, a criação de um molde vazado para distribuições com alta densidade de pontos com dimensão de cerca de 0,5 mm torna-se uma tarefa complexa ou até mesmo impraticável. Diante disto, Mazzoleni et al. (2015) [7] propôs uma metodologia para aplicação de padrões de pontos gerados por computador em superfícies utilizando um toner termomecânico desenvolvido especialmente para esta tarefa. De acordo com o funcionamento apresentado, este equipamento permite a produção de padrões com pontos de tamanhos diversos. Desta forma, a metodologia apresentada adequa-se a problemas de diferentes escalas, atendendo ainda aos parâmetros ótimos apontados em Lecompte et al. (2006) [1] e Lecompte et al. (2006) [2], entre outros.

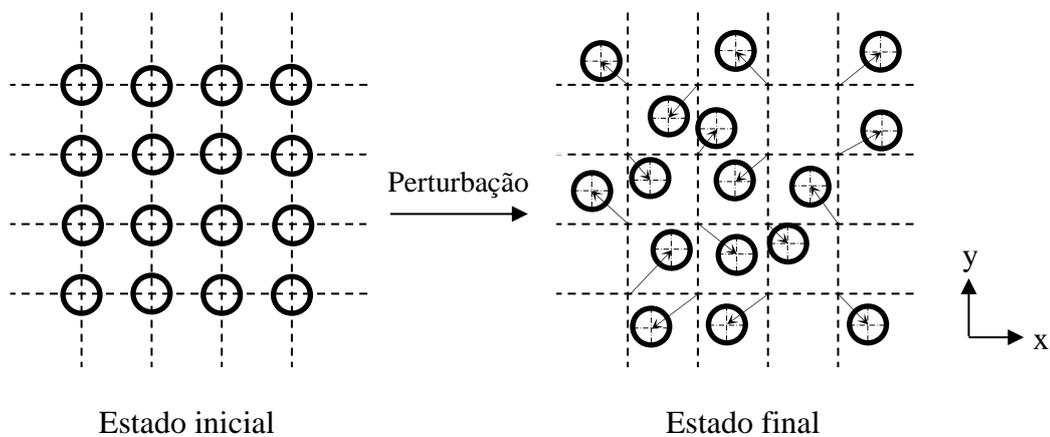
Inspirado no trabalho de Mazzoleni et al. (2015) [7], este trabalho apresenta uma metodologia alternativa de geração computacional e marcação de padrões de pontos em superfícies para ensaios por CDI. Visando suprir a necessidade de marcação de superfícies para ensaios de resistência mecânica, foi desenvolvido um equipamento de marcação CNC de

relativo baixo custo capaz de realizar replicar os padrões gerados em superfícies planas de até 160 x 160mm. Neste trabalho são apresentados aspectos acerca do método utilizado para gerar computacionalmente os padrões a serem marcados, da montagem, construção e funcionamento do equipamento elaborado, e também de todas as rotinas utilizadas em sua programação.

## 2 - METODOLOGIA

### 2.1 – Geração computacional dos padrões de pontos

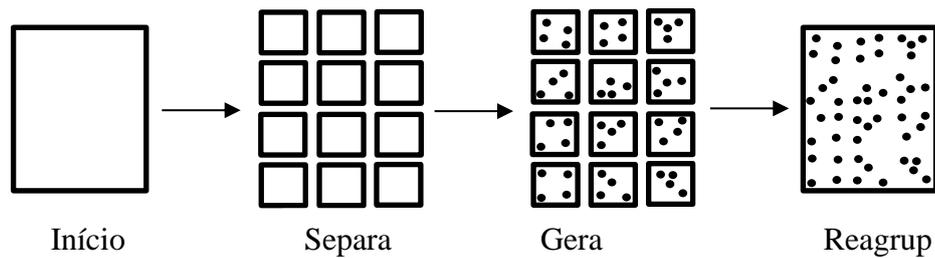
No trabalho de Mazzoleni et al. (2015) [7] é proposto um método para geração de padrões aleatórios de pontos com uma distribuição pseudo-aleatória a partir da perturbação de uma distribuição de pontos inicialmente organizada em rede. Essa perturbação consiste em somar ou subtrair pequenos valores aleatórios nas coordenadas  $x$  e  $y$  de cada ponto, forçando o seu deslocamento. A figura 1, baseada em um esquema apresentado em Mazzolleni et al. (2015) [7], ilustra esse procedimento aplicado a um pequeno grupo de pontos.



**Figura 1.** Estratégia para criação de padrões de superfície utilizada em Mazzolleni et al. (2015) [7].

Apesar de efetivo, para garantir uma distribuição mais homogênea de pontos sobre a superfície, este método acaba restringindo um pouco da aleatoriedade dos padrões de pontos gerados ao permitir apenas pequenas movimentações dos pontos. Em vista disto, este trabalho propõe uma lógica diferente para o posicionamento dos pontos ao longo do padrão gerado. Neste trabalho adotou-se um método no qual o padrão final é gerado pelo agrupamento de padrões aleatórios menores. Desta forma, ao invés de criar o padrão de pontos sobre o domínio completo, a superfície a ser medida via CDI é, inicialmente, dividida em um

conjunto de áreas menores. Em seguida, para cada uma dessas áreas é gerado uma distribuição aleatória de pontos respeitando o intervalo de área ocupada tido como ótimo em Lecompte et al. (2006) [1]. Ao final, as sub-regiões, contendo cada uma um padrão aleatório, são reagrupadas dando origem a um padrão único para a superfície. Esta forma de posicionamento de pontos, ilustrada na figura 2, permite uma maior quantidade de possibilidades em comparação às perturbações utilizadas em Mazzoleni et al. (2015) [7].

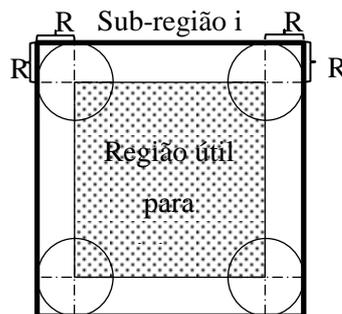


**Figura 2.** Estratégia proposta para geração de padrão de superfície para CDI.

Assumindo-se os pontos como círculos preenchidos de raio igual a  $R$ , é possível calcular-se a quantidade de pontos ( $n$ ) necessária para cobrir área uma porcentagem ( $p$ ) da área total da superfície ( $A$ ) utilizando-se a equação 1:

$$n = \frac{p \cdot A}{\pi \cdot R^2} \quad (1)$$

Para garantir a validade da equação 1, é necessário o estabelecimento de uma área útil para posicionamento dos pontos dentro das sub-regiões de modo a garantir que nenhum ponto ultrapasse os contornos de cada sub-região. Desta forma, a região útil é definida como ilustrado na figura 3.



**Figura 3.** Região limite para posicionamento dos centros dos pontos.

O algoritmo elaborado posiciona um ponto por vez na região delimitada até que a proporção de área designada a ser ocupada pelos pontos seja atingida, garantindo que não ocorra intersecção com os pontos já posicionado, como ilustrado na figura 4. Caso ocorra intersecção de contornos de dois ou mais círculos que representam os contornos dos pontos, o último ponto colocado é reposicionado. Este procedimento é repetido até que seja atingida uma posição satisfatória ou até que seja atingido um limite máximo de tentativas. Caso seja atingido o limite, o padrão atual é descartado e a geração um novo padrão é iniciada. A divisão do domínio total em regiões menores também beneficia esta forma de posicionamento de pontos, pois garante uma distribuição de pontos mais homogênea pela superfície. A figura 5 apresenta um esquema da rotina de posicionamento de pontos no interior de cada sub-região.

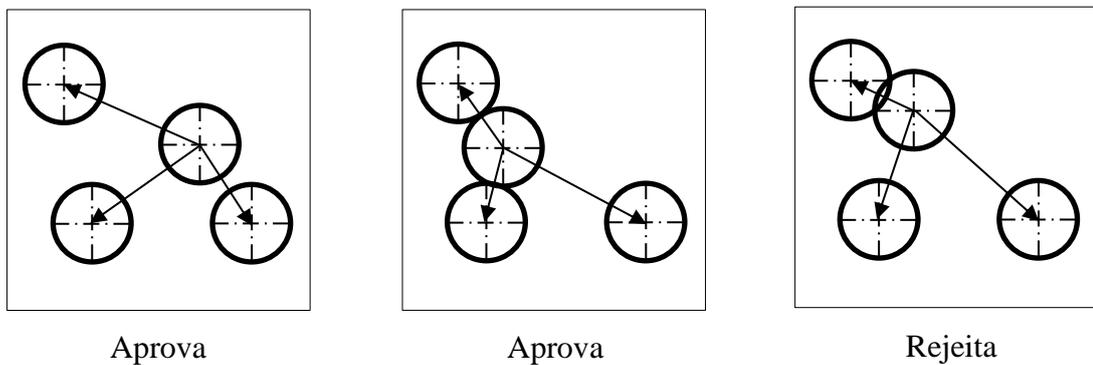


Figura 4. Processo de posicionamento dos pontos circulares.

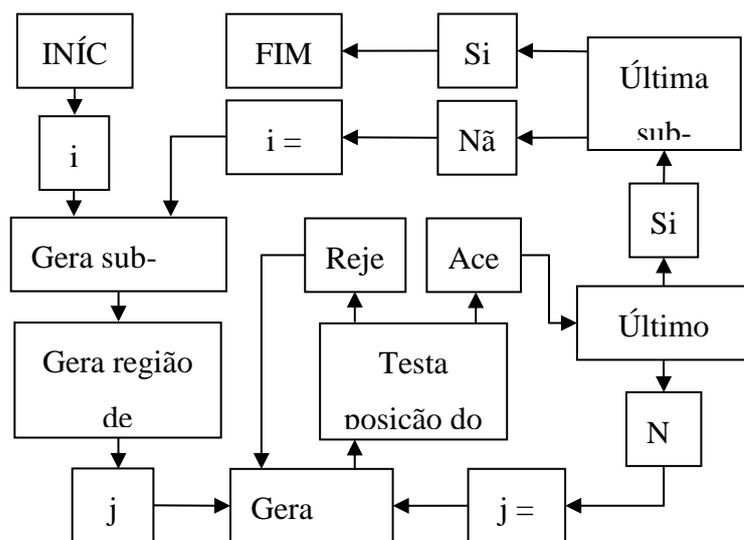
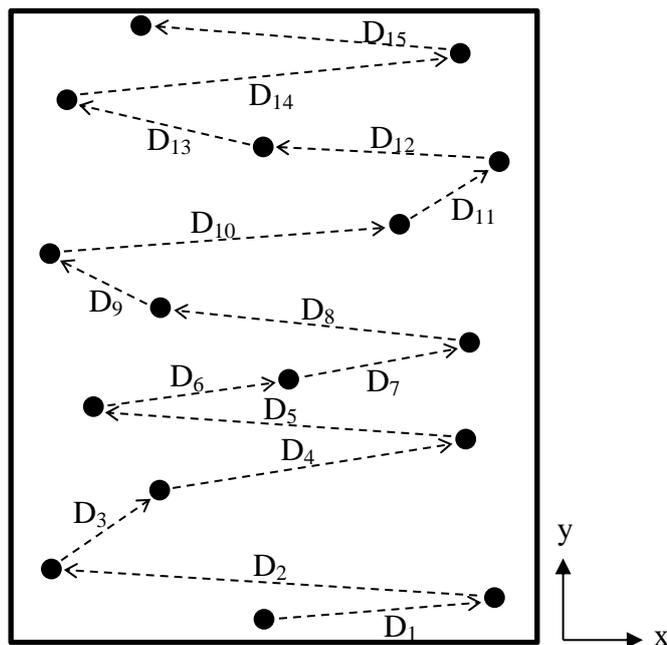


Figura 6. Diagrama de funcionamento da rotina para criação dos padrões de pontos.

Após o reagrupamento das sub-regiões é gerado um par de vetores que armazena as informações de coordenadas cartesianas, em milímetros, de cada ponto posicionado. Em seguida, esses vetores são reorganizados de maneira a compor uma rota otimizada de marcação como exemplificado na figura 7. Esta rota limita a movimentação no eixo y a apenas uma direção, reduzindo erros devido a possíveis folgas no equipamento de marcação. A partir desse par de vetores organizados, são calculadas as componentes do vetor distância entre cada ponto e o ponto seguinte,  $D_i$ , como ilustrado na figura 6. As componentes em x e y de cada vetor  $D_i$  são agrupadas sequencialmente em vetores,  $inc\_x$  e  $inc\_y$  respectivamente, de forma que a posição,  $p_i(x,y)$  de cada um dos pontos pode ser obtida de forma incremental como explicita a equação 2. A expressão da posição de cada ponto nesta forma incremental é conveniente para a execução sequencial de movimentos regidos por motores de passo, bastando apenas a conversão das distâncias em quantidades de passos a serem percorridos. Esta conversão é realizada com base na distância percorrida pelo marcador ao incremento de um passo pelo motor de passo utilizado. Caso o diâmetro primitivo de ambas as engrenagens motoras de cada correia de dentada seja o mesmo, a equação de conversão utilizada será a mesma para ambos os eixos de deslocamento. Porém em caso de diâmetros primitivos distintos, é necessária uma equação para cada eixo.

$$p_i(x,y) = \left( \sum_{n=1}^i inc\_x(n), \sum_{n=1}^i inc\_y(n) \right) \quad (2)$$



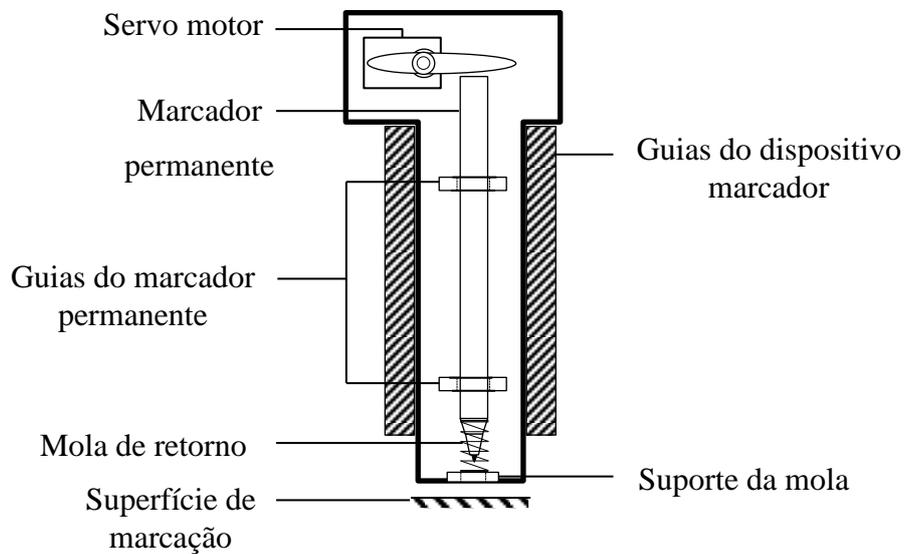
**Figura 7.** Diagrama de funcionamento da rotina para criação dos padrões de pontos.

## 2.2 – O equipamento de marcação de pontos

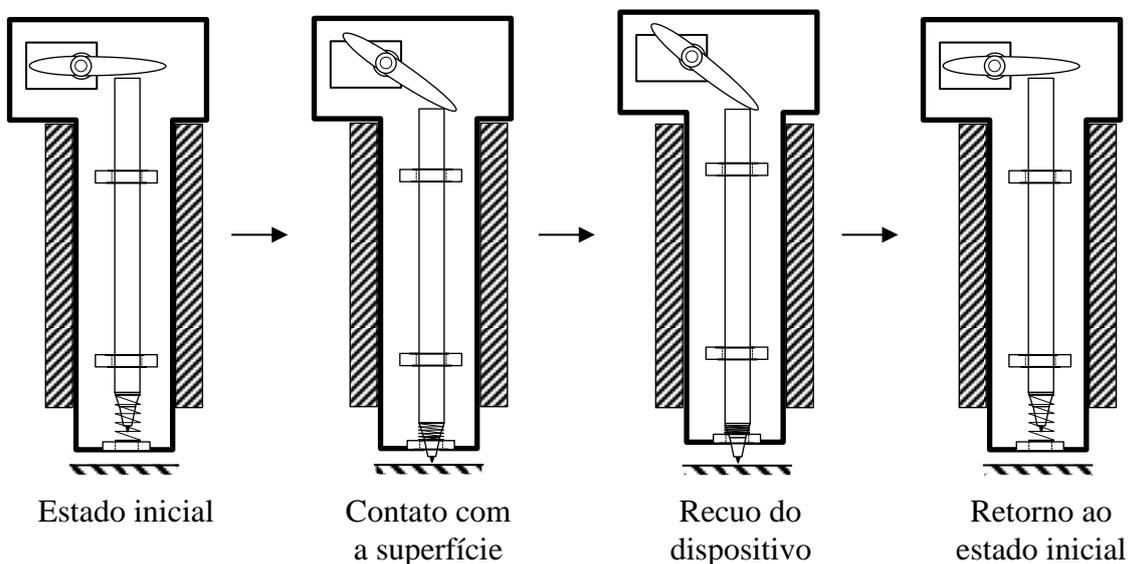
Para tornar possível a reprodução do padrão gerado por computador na superfície a ser analisada, foi desenvolvido um equipamento de marcação por comando numérico computacional (CNC). O equipamento utiliza como meio de marcação uma caneta de tinta permanente com ponta fina (1.0 mm), facilmente obtidas em papelarias a um custo relativamente baixo. A seleção deste tipo de marcador se deu com base em testes prévios, nos quais verificou-se a sua capacidade de produzir padrões de pontos com bom contraste e pontos bem definidos, medindo entre 0.6 e 0.7 mm. Com base em Lecompte et al. (2006) [1] e Lecompte et al. (2006) [2], este tamanho de pontos adequa-se à escala desejada na proposta inicial deste trabalho que é suprir padrões de pontos para análises por CDI em corpos de prova utilizados em ensaios mecânicos. As canetas previamente testadas foram capazes de produzir em média 20000 pontos antes de começarem a apresentar perda de qualidade nos pontos produzidos, valor suficiente para cobrir uma superfície de cerca de 130 x 130 mm, respeitando a proporção ótima de 40% de área coberta apresentada em Lecompte et al. (2006) [1].

Selecionado o meio de marcação apropriado, o próximo passo do projeto consistiu no desenvolvimento de um dispositivo automático para marcação dos pontos sobre a superfície a ser investigada. Para isso, o sistema proposto deveria ser capaz de pressionar a ponta do marcador permanente contra a superfície a ser marcada e, em seguida, reerguer o marcador para que este possa ser movimentada para a posição do ponto seguinte. Para a execução da primeira parte do ciclo de movimento, isto é, pressionar a ponta do marcador contra a superfície, foi elaborado um sistema controlado por um micro servo motor 9g SG90 TowerPro com 180° de liberdade de movimento. Este servo é bastante utilizado em projetos de aeromodelos e apresenta torque e robustez suficientes para esta tarefa. A figura 7 exibe um desenho esquemático da montagem do sistema de marcação. Por meio desta figura, nota-se a montagem do braço do servo junto ao fundo do tubo marcador permanente, de forma a empurrá-lo para baixo. Para retornar o marcador à sua posição original, o servo retorna à sua angulação original e uma mola empurra a caneta para cima. Para que assegurar a nitidez da marcação é necessária uma certa pressão por parte do servo motor. Entretanto, pressão excessiva pode danificar a ponta do marcador, comprometendo a qualidade dos pontos produzidos e reduzindo a sua vida útil. Em função disso, o dispositivo de marcação desenvolvido conta com um sistema de recuo, que impede a aplicação de pressão excessiva

sobre a ponta do marcador. O ciclo de funcionamento detalhado do dispositivo de marcação desenvolvido é ilustrado na figura 9.



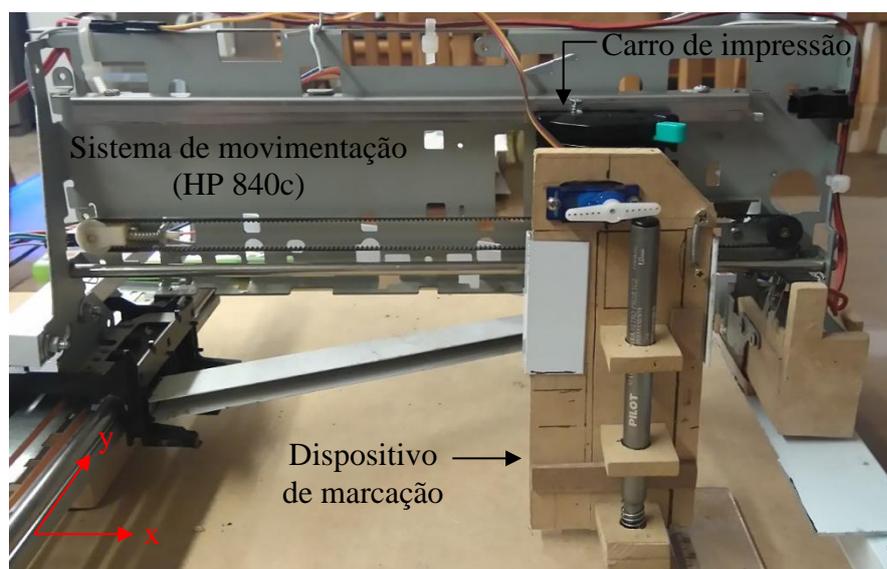
**Figura 8.** Desenho esquemático do dispositivo marcador.



**Figura 9.** Ciclo de trabalho do dispositivo marcador.

Definido o dispositivo de marcação, o passo seguinte consiste em estabelecer um meio para deslocá-lo até as posições de marcação dos pontos. Assumindo-se a necessidade de 2 graus de liberdade no plano, o dispositivo deve ser capaz de deslocar-se independentemente ao longo de dois eixos ortogonais. Neste sentido, para cada eixo de movimento, o sistema de

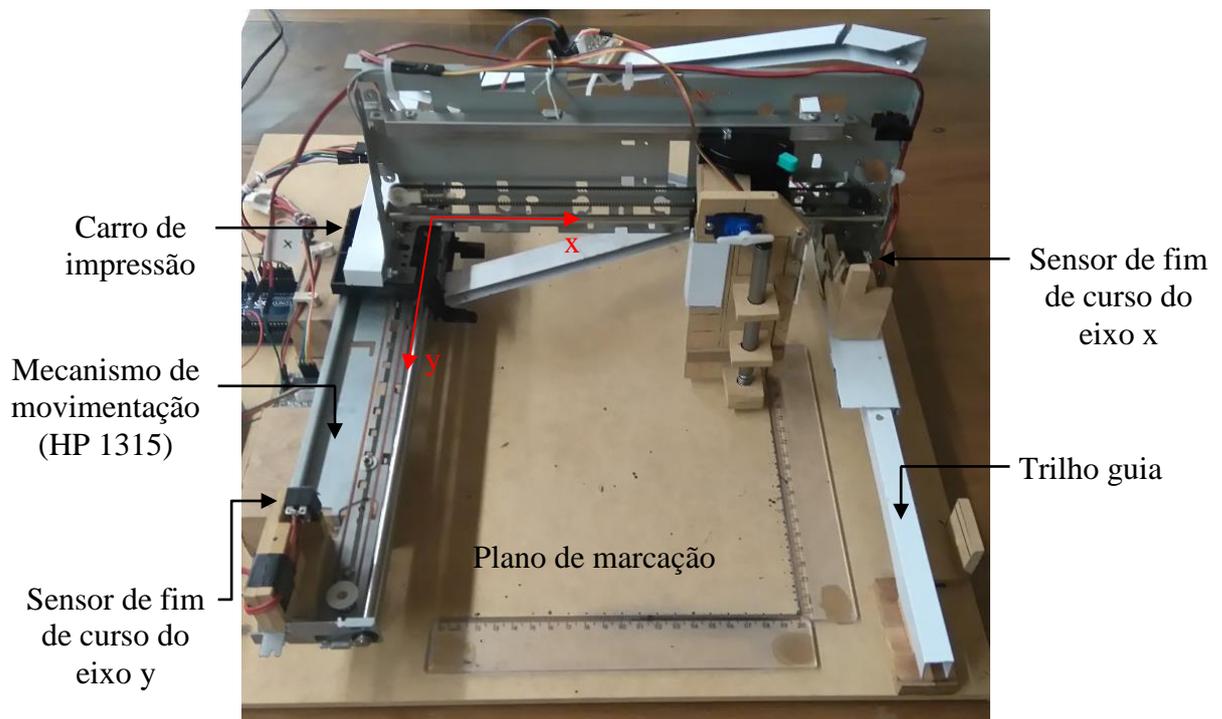
deslocamento proposto utiliza o sistema de movimentação de cartuchos de impressoras de jato de tinta com ligeiras modificações. O sistema de movimentação do carro de impressão, que comporta os cartuchos da impressora, utiliza um sistema por correia dentada que confere precisão necessária para uma boa impressão. Aproveitando esta característica, esse sistema mecânico é utilizado por completo, substituindo-se apenas o motor original que move a correia por um motor de passo. O protótipo desenvolvido neste trabalho poderia ser fabricado utilizando os componentes mecânicos responsáveis pelo deslocamento do carro de impressão de qualquer modelo de impressora jato de tinta. Nesta construção foram utilizados os modelos HP 840c e HP 1315 considerando-se apenas a sua disponibilidade. Para a movimentação horizontal do dispositivo foi utilizado o sistema de movimento do carro de impressão de uma impressora HP 840c. Após a substituição de seu motor original por um motor de passo, esta teve o seu carro de impressão modificado para carregar o dispositivo de marcação ao invés dos cartuchos de tinta. A foto apresentada na figura 10 exibe o dispositivo de marcação desenvolvido já acoplado no sistema de movimentação da impressora HP 840c.



**Figura 10.** Dispositivo de marcação montado no carro de impressão de uma impressora HP 840c.

Esta montagem permite que o dispositivo de marcação se movimente lateralmente ao longo do eixo horizontal de marcação em relação ao plano da superfície a ser marcada. Para adicionar o segundo grau de liberdade em relação ao plano de marcação, utiliza-se outro sistema de movimento de carro de impressão. Desta vez, foi utilizado o conjunto de movimentação de uma impressora HP 1315. Seguindo um conceito similar ao de uma ponte rolante, o carro de impressão deste novo sistema de movimentação é montado sob uma das

bases conjunto que movimenta o dispositivo de marcação ao longo do eixo  $x$ , garantindo a ortogonalidade entre ambos os eixos de movimentação. A outra extremidade do sistema de movimentação sobre o eixo  $x$  é montada sobre um trilho guia paralelo ao mecanismo de movimentação proveniente da HP 1315, desta maneira o dispositivo de marcação se mantém nivelado durante toda a movimentação. Esta montagem completa pode ser visualizada na figura 11. Nesta figura é possível também notar um reforço na estrutura do sistema de movimentação sobre o eixo  $x$ , cuja função é aumentar a rigidez do conjunto.



**Figura 11.** Montagem completa do equipamento de marcação de pontos CNC.

Os movimentos sobre os eixos  $x$  e  $y$  são controlados por dois motores de passo 28BYJ-48 de 5V, um para cada eixo. Trata-se de um motor de passo unipolar com 4 solenoides para controle da rotação, que lhe conferem um movimento angular padrão de  $5,625^\circ$  por passo utilizando a recomendação de controle em meio passo. Esses motores contam ainda com uma redução interna de  $1/64$  que o proporciona um bom torque a uma velocidade de rotação máxima de aproximadamente 14 RPM. Esta redução acoplada também acaba por reduzir o movimento angular resultante a  $0,088^\circ$  por passo, elevando sua resolução de posição e deixando o controle de posição mais preciso. Esses motores de passo, geralmente, são acompanhados pelos drivers ULN-2003, simplificando sua implementação em um circuito de

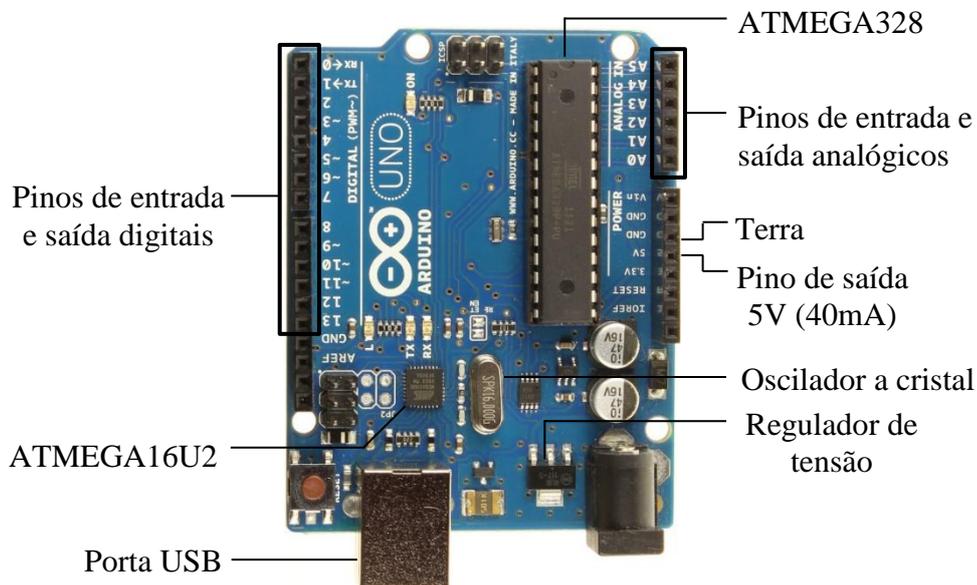
controle. A alimentação de ambos os motores de passo e também do servo motor é realizada por meio de uma única fonte de 5V e corrente máxima de 2,5A.

Na figura 11 ainda constam um par de sensores de fim de curso, posicionados em uma das extremidades de cada eixo de movimentação. Os sensores de fim de curso nada mais são que interruptores que, como utilizados no circuito deste equipamento de impressão, enviam um sinal para o sistema de controle assim que acionados. A sua função se resume a definir uma origem física para os procedimentos de marcação que deve coincidir com a origem do padrão gerado computacionalmente. Antes da execução de qualquer marcação, o dispositivo de marcação deve sempre retornar à posição desses sensores. Para permitir um ajuste desta origem, admite-se um pequeno retorno após o contato com os sensores de fim de curso. Após repetidos usos, pode ocorrer desgaste de componentes ou eventuais folgas, sendo assim o comprimento do recuo após o contato com cada sensor de fim de curso serve como medida de calibração do ponto de origem da marcação.

### **2.3 – Sistema de controle do equipamento**

O controle de todo o processo é realizado por meio de uma placa Arduino Uno R3 ligada a um computador. O Arduino é uma plataforma popular de prototipagem eletrônica open-source de baixo custo, utilizada com frequência em projetos de robótica, automação residencial, impressoras 3D e máquinas CNC em geral entre outros. A placa utilizada conta com um microcontrolador programável ATMEL ATMEGA328 de 8 bits responsável pela execução dos códigos carregados e controle 71 dos componentes conectado à placa. Dentre os componentes do circuito do Arduino Uno R3 destacam-se: O oscilador a cristal, responsável pela velocidade de clock de 16 MHz; O regulador de tensão, que garante a tensão estabilizada de trabalho da placa de 5V; 14 pinos que podem ser utilizados como entradas e saídas digitais, capazes de assumir dois estados: High e Low, caracterizados pelas tensões de 0V e 5V respectivamente; 6 canais de conversão analógico digital que permitem a interpretação e envio de sinais de valores variáveis entre 5V e 0V; Além de uma porta para comunicação serial (USB), controlada por um microcontrolador ATMEL ATMEGA16U2, responsável pela comunicação do Arduino com o computador. Este último microcontrolador também é responsável por receber os dados pela porta USB, convertê-los apropriadamente e gravá-los no ATMEGA328. Isto permite que os códigos de controle elaborados e compilados no computador sejam carregados de maneira prática e direta no Arduino. A porta USB também pode desempenhar a função de alimentação da placa, uma vez que, portas USB de

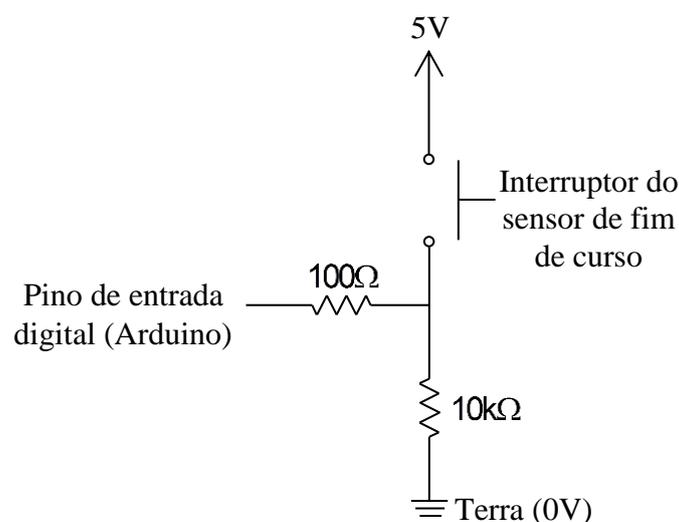
computadores tem por norma uma tensão de saída de 5V. A figura 12 exibe uma placa Arduino Uno R3, na qual são ressaltados os componentes supracitados.



**Figura 12.** Placa Arduino Uno R3 e seus principais componentes.

O controle dos motores de passo 28BYJ-48 utilizados é assistido por um par drivers ULN-2003, um para cada motor. O driver é responsável pela interpretação dos sinais enviados pelo Arduino, convertendo-os em informação útil para o motor de passo. Por exemplo, a distância angular percorrida pelo eixo do motor de passo é proporcional à quantidade de sinais enviados ao driver, enquanto a frequência desses sinais dita sua velocidade de rotação. Neste caso, para cada conjunto de driver e motor de passo, o controle, são necessários quatro sinais digitais (High ou Low) distintos, um para cada solenoide do motor. O envio organizado dos sinais, ativa e desativa os solenoides em sequência fazendo o eixo rotor do motor girar, alinhando-se com os solenoides energizados. Portanto, para controle de cada par composto por motor de passo e driver selecionados são necessárias quatro saídas digitais do Arduino. A sequência de pinos digitais utilizada na placa do Arduino deve ser conectada na mesma ordem no driver para que os motores funcionem adequadamente. O servo motor, por outro lado não depende de um controlador adicional para seu funcionamento, podendo ter seu sinal obtido diretamente pelo Arduino. Entretanto, diferentemente do motor de passo, neste caso utiliza-se um único pino de saída analógico. Visto que o modelo de servo motor selecionado, Tower Pro 9g SG90, possui velocidade e torque de trabalho constantes, a única informação necessária para seu funcionamento é o valor da amplitude angular do movimento a ser executado. Embora o Arduino possua uma saída de 5V, os motores de passo e servo motor empregados foram

alimentados por meio de uma fonte externa. O Arduino possui uma corrente máxima de trabalho de 200mA somando todos os pinos em trabalho simultâneo. Correntes superiores a este valor representam sério risco à integridade do sistema. Mesmo para o caso do servo motor, onde a corrente necessária é inferior ao limite de corrente do Arduino, não convém a utilização da alimentação direto da placa. Como explica McRoberts (2015) [8], isto pode gerar ruídos nos sinais e também aquecimento excessivo dos componentes eletrônicos. Por fim, os últimos elementos que restam ser conectados ao Arduino são os circuitos dos sensores de fim de curso, utilizados para definir uma origem para o processo de marcação. Como já comentado, estes sensores de fim de curso são interruptores mecânicos responsáveis por sinalizar ao Arduino o limite físico do curso possível para eixo de movimento. A partir desta informação é possível definir um ponto de origem padrão para cada marcação. Estes sensores são montados em um circuito normalmente aberto, isto é, enquanto não for acionado, o Arduino recebe um sinal de Low (0V) no pino de entrada digital definido para este sensor. Quando o interruptor do sensor de fim de curso é acionado, o circuito é fechado e o sinal enviado ao Arduino passa a ser High (5V). A troca do tipo de sinal recebido pelo Arduino indica que o final do curso de movimento para o eixo em questão foi atingido e, portanto, o movimento neste eixo deve cessar e um pequeno recuo deve ser executado, liberando novamente o interruptor. Este procedimento é executado apenas uma vez antes do início de todo procedimento de marcação. Para cumprir com esse objetivo, cada sensor de fim de curso é montado em um circuito utilizando um resistor na configuração conhecida como “*Pull down*”, esquematizado na figura 13, adaptada de McRoberts (2015) [8].

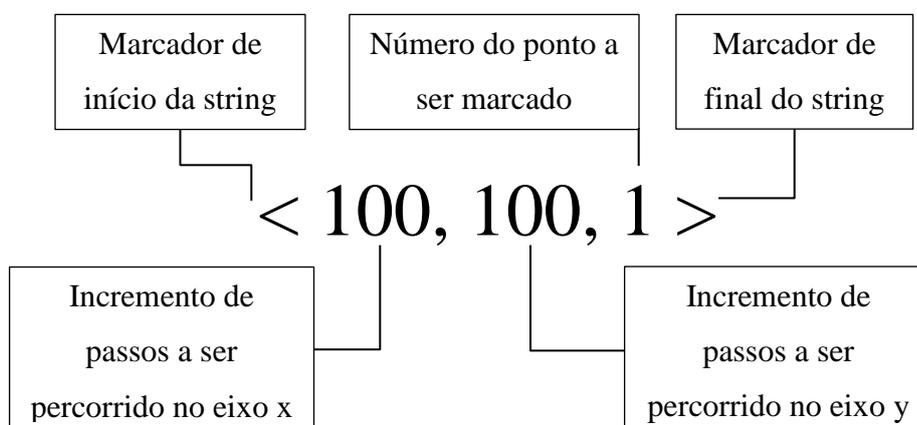


**Figura 13.** Esquema de um circuito de resistor pull-down.

## 2.4 – Rotina para marcação dos pontos sobre as superfícies

Para que seja possível a execução coordenada dos processos envolvidos no procedimento de marcação dos pontos é necessário um código de controle específico. O Arduino conta com um ambiente integrado de desenvolvimento, geralmente conhecido pelas siglas em inglês IDE, a partir do qual é possível escrever os códigos de controle, compilá-los e carregá-los no microprocessador ATMEGA328 via USB. A linguagem utilizada para tal consiste em um apanhado de funções de C/C++ que podem ser carregadas aos códigos por meio de uso de bibliotecas. Desta maneira, livros que tratam da linguagem C, como Backes (2012) [9], servem como boas fontes para a programação da rotina para o Arduino. O Arduino já possui diversas bibliotecas que permitem o controle de uma série de equipamentos como os servos e motores de passo aqui utilizados. Apesar de a sua biblioteca padrão para controle de servos se adequar bem ao modelo de servo utilizado, o mesmo não acontece para o modelo de motor de passo selecionado. A utilização da biblioteca original para controle do motor de passo 28BYJ-48 acaba por provocar aquecimento excessivo, indesejável em longas operações contínuas. Outro ponto negativo da biblioteca original para motores de passo é que ela se limita ao controle de um motor de passo por vez, o que inviabiliza movimentos em diagonal do marcador e, conseqüentemente, aumenta consideravelmente o tempo de execução de rotas deste tipo. A biblioteca “Accelstepper” utilizada, desenvolvida por Mike McCauley e distribuída gratuitamente pela Airspayce Pty Ltd. sob termos de uma licença GPL V2, permite não só o controle simultâneo de ambos os motores de passo e um menor aquecimento, mas também outras opções como controle de aceleração e desaceleração. Apesar de muito versátil, o Arduino Uno possui uma memória de armazenamento (SRAM) de apenas 2 Kbytes. Isto limita consideravelmente o tamanho das informações que podem ser carregadas em seu microprocessador. Isto também inviabiliza que sejam armazenados, em seu interior, grandes matrizes e vetores, como é o caso dos vetores contendo os incrementos de passo de cada eixo. Para contornar este problema, utilizou-se a capacidade de comunicação serial do Arduino, através da qual é possível tanto enviar pacotes de informações ao Arduino quanto receber respostas do mesmo. Aproveitando-se desta característica, foi elaborado um código em Python 3.5 em conjunto com a extensão para comunicação pySerial. É importante ressaltar que esta extensão é exclusivamente 32 bits, logo também foi utilizada a versão do Python 3.5 32 bits. O código em Python contém os vetores de incrementos de passos para cada posição de ponto a ser marcado e é responsável por coordenar a impressão dos pontos em sequência.

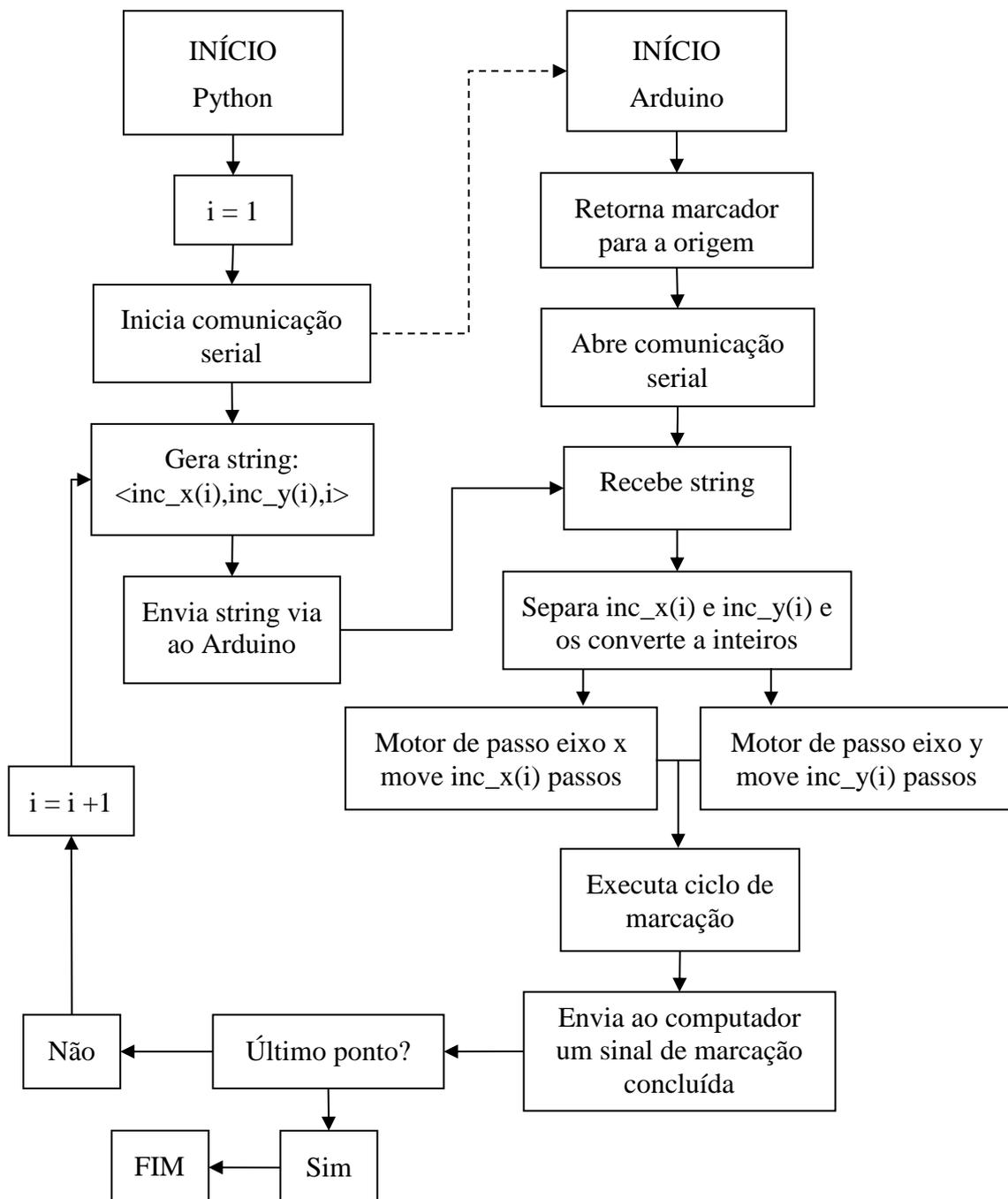
Isto é, estabelecida a comunicação serial, a rotina em Python envia as coordenadas para marcação do primeiro ponto ao Arduino. O Arduino, então, recebe esta informação, ordena o movimento dos motores de passo para que o marcador seja deslocado até as coordenadas recebidas. Executado o ciclo de trabalho do marcador, ilustrado na figura 9, o Arduino envia uma informação sinalizando “ponto marcado” ao computador via USB. O código em Python identifica este pacote de informação recebido e envia as coordenadas do ponto seguinte, dando continuidade à marcação. Este ciclo é repetido até que o padrão de pontos esteja completo. Antes de enviar informações via comunicação serial, tanto o código Python quanto o Arduino, convertem essa informação para a forma de “string” para contornar a limitação de buffer de apenas 64 bits do Arduino. Essas informações são, então, convertidas aos formatos adequados após recebidas. Além disso, para garantir que a informação está sendo enviada e lida por completo, são utilizados marcadores de início e fim da “string”. A figura 14 exibe um exemplo de pacote de informação enviado, na forma de “string”, pelo código em Python ao Arduino.



**Figura 14.** Estrutura da string de informação enviada ao arduino.

O numerador de ponto, mostrado na estrutura de um pacote de informação tem por função indicar o andamento da marcação. Caso a caneta permanente utilizada comece a falhar no meio da impressão, o conhecimento do número do ponto é útil para que a impressão possa ser pausada e retomada do mesmo ponto, ou mesmo de algum ponto anterior, remarcando pontos com pouca nitidez. Os códigos de geração dos padrões de ponto, em Matlab, e o código para envio de controle do Arduino, em Python, são integrados. Esta integração se dá de maneira que quando gerados os vetores com os incrementos de passos no primeiro código, estes vetores são automaticamente atualizados no código Python, tornando o processo mais prático.

A figura 15 apresenta um diagrama do funcionamento da rotina de controle da marcação de pontos sobre a superfície a ser medida, destacando o funcionamento em conjunto da rotina em Python, responsável pelo controle, com o código carregado no Arduino, responsável pela execução. Neste esquema,  $inc\_x(i)$  e  $inc\_y(i)$  correspondem aos vetores contendo as informações acerca do incremento de passos a serem dados antes da marcação de cada ponto. O Arduino é, por padrão, programado para reiniciar automaticamente sempre que uma nova comunicação serial é iniciada. Desta forma, o código do Arduino só tem início, de fato, quando o programa de controle em Python inicia a comunicação serial.



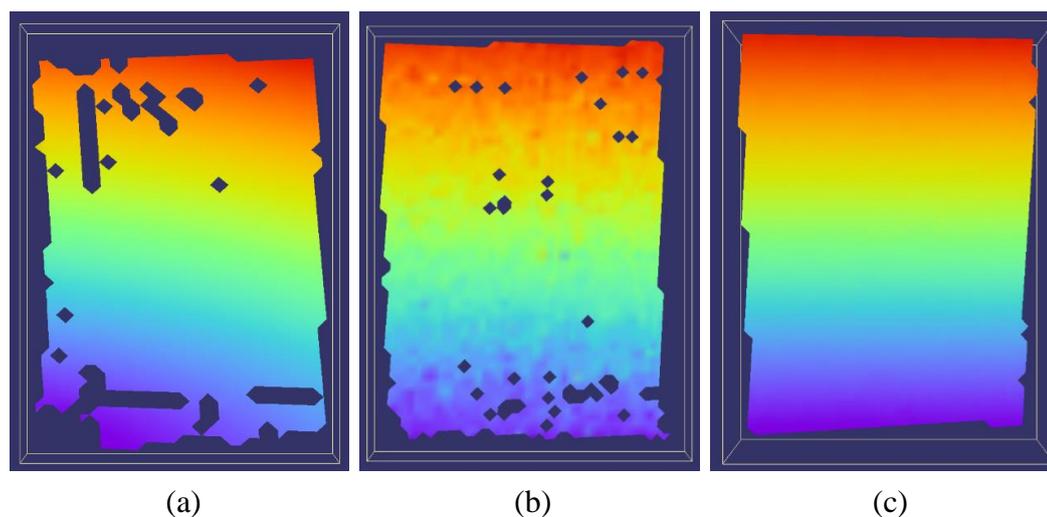
**Figura 15.** Diagrama esquemático da rotina desenvolvida para controle da marcação dos padrões de pontos.

#### **2.4 – Avaliação do desempenho dos padrões gerados.**

A fim de avaliar o desempenho do padrão de pontos produzido pela metodologia proposta foi realizada uma análise de utilizando o sistema de CDI Q-400 fabricado pela Dantec Dynamics. As medições foram realizadas sobre uma das faces de maior área de placas retangulares fabricadas em alumínio ASTM 6351 com dimensões de 140 x 102,6 x 9,6 mm.

Para efeitos comparativos, além do padrão de pontos gerado por meio da metodologia proposta, foram também analisados corpos de provas com padrões produzidos pelas técnicas de aspersão com tinta spray e marcação à mão com um marcador permanente. Para o caso da pintura com spray considerou-se o melhor resultado obtido dentre diversas tentativas. Devido ao seu elevado tempo de produção, o padrão marcado à mão acaba contando com uma densidade menor de pontos e um menor controle da dimensão dos pontos produzidos em relação ao padrão gerado com auxílio do equipamento proposto.

Feito isso, cada uma destas placas foi submetida a um simples procedimento experimental na qual a sua base era aquecida uniformemente com o auxílio de resistência de cartucho enquanto as demais faces foram deixadas livres. O deslocamento sofrido pelas superfícies sobre as quais os padrões de pontos foram marcados é, por fim, avaliado via CDI. A figura 16 exibe um comparativo dos resultados obtidos para os três casos.



**Figura 16.** Comparação entre os resultados de deslocamentos obtidos por CDI: (a) Aspersão de tinta spray; (b) Marcação à mão; (c) Metodologia proposta.

A comparação da continuidade dos resultados exibidos na figura 16 evidencia o melhor desempenho da metodologia proposta em relação às outras duas possibilidades testadas.

### **3 – Conclusão**

Este trabalho propõe uma metodologia alternativa para geração computacional e aplicação de padrões de pontos em superfícies para análises por CDI. Esta metodologia é composta de duas etapas principais: a geração numérica dos padrões de pontos e a aplicação dos padrões gerados sobre as superfícies a serem analisadas. Para cumprir a primeira etapa foi elaborada uma rotina numérica de posicionamento de pontos que garantisse uma distribuição homogênea de pontos sem comprometer o critério de aleatoriedade, essencial para o sucesso da análise de correlação.

Estabelecida a primeira parte, a segunda etapa consistiu no desenvolvimento de um equipamento capaz de reproduzir o padrão de pontos gerado numericamente sobre uma superfície a ser analisada. Neste sentido foi desenvolvido um equipamento de marcação por controle numérico computacional que utiliza um marcador permanente comercial como ferramenta de marcação, sendo assim, capaz de reproduzir com precisão padrões de pontos gerados por computador. A sua construção, de relativa simplicidade e baixo custo, conta com peças reconduzidas de impressoras jato de tinta e utiliza um par de motores de passo e um micro servo motor cujos movimentos são controlados por uma placa Arduino Uno R3 conectada a um computador. A boa qualidade dos padrões produzidos foi verificada a partir da comparação entre resultados de análises de CDI obtidos em superfícies cujos padrões foram produzidos via metodologia proposta e em superfícies preparadas com base em técnicas comumente utilizadas.

### **5 – Agradecimentos**

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

### **4 – Referências bibliográficas**

- [1] Pan B, Qian Kemao, Xie H, Asundi A. On errors of digital image correlation due to speckle patterns. Proceedings of ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics; 2008 Nov 8; Nanjing, China. SPIE; 2009.
- [2] Lecompte D, Sol H, Vantomme J. Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation. Proceedings of SPIE vol. 6341, Speckle06, From Grains to Flowers; 2006 Sep 13; Nimmès, France.
- [3] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, Sol H, Vantomme J, Van Hemelrijck D, Habraken AM. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering. 2006 Nov; 44(11): 1132-1145.
- [4] Lecompte D, Bossuyt S, Cooreman S, Sol H, Vantomme J. Study and generation of optimal speckle patterns for DIC. Proceedings of SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics; 2007 Feb 19-22; Orlando, United States.
- [5] Crammond G, Boyd SW, Dulieu-Barton JM. Speckle pattern assessment for digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering. 2013 Dec; 51(12): 1368-1378.
- [6] Ghorbani R, Matta F, Sutton MA. Full-field deformation measurement and crack mapping on confined masonry walls using digital image correlation. Experimental Mechanics. 2015 Jan; 55(1):227-243.
- [7] Mazzoleni P, Zappa E, Matta F, Sutton MA. Thermo-mechanical toner transfer for high quality digital image correlation speckle patterns. Optics and Lasers in Engineering. 2015 Dec; 75: 72-80.
- [8] McRoberts M. Arduino Básico. 2ª edição. São Paulo. Novatec; 2015.
- [9] Backes A. Linguagem C: Completa e descomplicada. Elsevier Brasil: 2012.