

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo, é apresentada a aplicação efetiva da metodologia desenvolvida para medição de campos de deformações. Imagens coletadas durante ensaios de tração são analisadas, e as deformações estimadas são apresentadas e avaliadas. Algumas limitações e fontes de erros são identificadas e discutidas.

Os experimentos envolvem duas etapas, descritas nas seções a seguir. Nelas, campos de deformação uniforme são determinados e comparados com medições fornecidas por extensômetros colados em placas planas ou barras redondas sujeitas a tração uniaxial. Propriedades mecânicas dos materiais testados, como o módulo de Elasticidade e o coeficiente de Poisson, são determinados experimentalmente nos ensaios mecânicos realizados. Estas duas propriedades elásticas são suficientes para descrever as relações tensão-deformação em materiais lineares elásticos isotrópicos e homogêneos.

Os ensaios de tração uniaxial são realizados na máquina para ensaios mecânicos Instron modelo 8501, com velocidade de deslocamento de 1 *mm/min*.

7.1. Determinação do Módulo de Elasticidade

Na primeira etapa, o método implementado é avaliado para medição de pequenos valores de deformação (na região elástica) presentes na superfície de um corpo de prova cilíndrico sujeito a tração uniaxial. Neste experimento, o Módulo de Elasticidade do material testado é a propriedade a ser determinada experimentalmente.

O Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young (E) é um parâmetro que proporciona uma medida da rigidez do material sólido, e é determinado pela razão entre a tensão uniaxial aplicada e a deformação resultante nesta direção, dentro do limite elástico.

Um extensômetro de pinças da marca Instron (Figura 7.1) é montado no corpo de prova para leitura das deformações causadas pela carga axial durante o ensaio mecânico de tração. As forças impostas à placa são medidas por uma célula de carga com capacidade de 100kN instalada na máquina Instron.



Figura 7.1 Extensômetro Instron montado no corpo de prova.

Os corpos de prova cilíndricos testados neste ensaio são feitos de aço e alumínio, e possuem a geometria apresentada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Geometria do corpo de prova circular

Geometria do material	
Comprimento [mm]	L = 170
Diâmetro [mm]	D = 8.7
Seção Circular [mm ²]	S = 59.45

7.1.1. Resultados

No primeiro ensaio, o material testado foi um alumínio 6351T6. A superfície do corpo de prova foi previamente pulverizada com tinta acrílica branca sobre fundo de tinta preta, vide Figura 7.2. Obtiveram-se os valores das deformações que se encontram listados na Tabela 7.2.

No segundo ensaio, o material testado é um aço 1020. O corpo de prova foi lixado aleatoriamente criando riscos e imperfeições na superfície, vide Figura 7.3. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 7.3.



Figura 7.2 Montagem experimental do corpo de prova cilíndrico de alumínio.

Tabela 7.2 Módulo de Elasticidade em diferentes níveis de deformação.

Nº Imagem	Tensão (MPa)	Extensômetro		Programa	
		ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	E_{Young} (GPa)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	E_{Young} (GPa)
1	28.14	381	73.86	351	80.17
2	55.68	762	73.07	753	73.94
3	59.34	948	73.14	988	70.18
4	80.44	1116	72.08	1106	72.73
5	90.82	1252	72.54	1222	74.32
6	103.77	1441	72.01	1463	70.93
7	113.99	1584	71.97	1579	72.19
8	123.85	1716	72.17	1677	73.85
9	134.89	1872	72.05	1815	74.32
10	141.36	1961	72.09	1992	70.97
		72.49 GPa		73.31 GPa	



Figura 7.3 Montagem experimental do corpo de prova cilíndrico de aço, lixado para gerar texturização.

Tabela 7.3 Módulo de Elasticidade em diferentes níveis de deformação.

Nº Imagem	Tensão (MPa)	Extensômetro		Programa	
		ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	E_{Young} (GPa)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	E_{Young} (GPa)
1	101.88	492	207.08	415	245.50
2	113.09	547	206.74	541	209.03
3	147.12	716	205.47	647	227.38
4	177.63	878	202.31	795	223.43
5	198.32	979	202.57	983	201.75
6	231.29	1131	204.50	1057	218.81
7	250.63	1245	201.31	1290	194.29
8	281.58	1445	194.87	1499	187.85
9	309.84	1621	191.14	1638	189.16
10	371.57	1944	191.14	1894	196.18
		200.63		208.58	

Como visto nas Figuras 7.4 e 7.5, as curvas tensão–deformação obtidas das deformações identificadas pelo sistema visual concordam bem com aquelas medidas por extensometria.

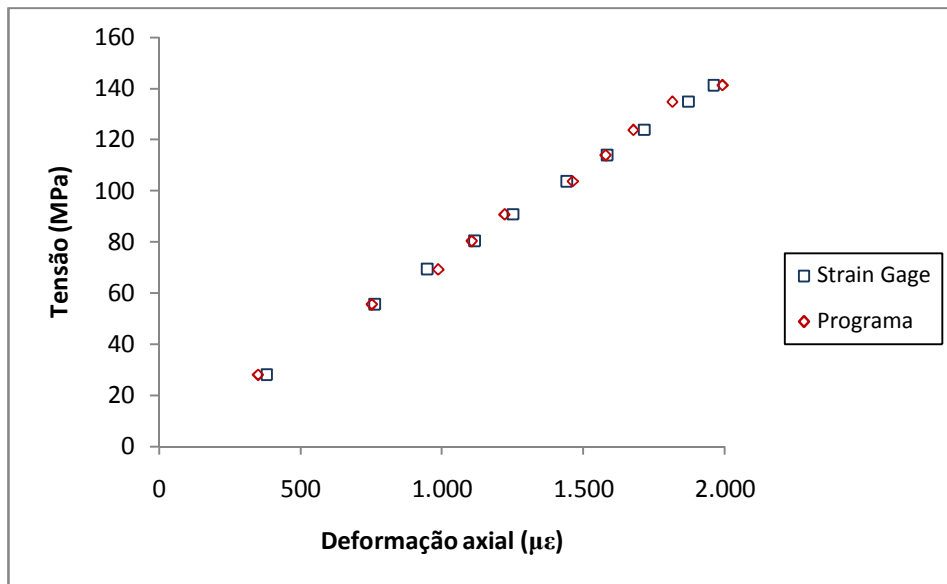


Figura 7.4 Curva tensão–deformação para o corpo de prova de alumínio, com deformações medidas pelo *strain gage* e pelo sistema visual.

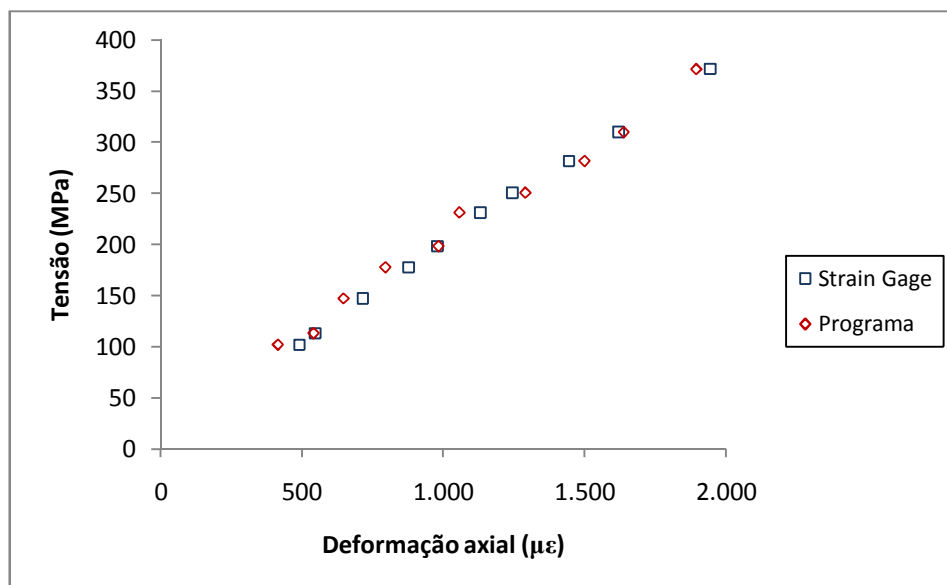


Figura 7.5 Curva tensão–deformação para o corpo de prova de aço, com deformações medidas pelo *strain gage* e pelo sistema visual.

Os resultados dos ensaios são resumidos na Tabela 7.4 e comparados com valores teóricos dos coeficientes elásticos do aço e alumínio (Moura, 1994). Note

que os valores obtidos para o alumínio foram melhores que para o aço, principalmente porque a texturização usando pulverização de tintas tende a gerar melhores resultados do que aquela obtida por lixamento/arranhões. Note também que, ao usar um espécime não-plano, erros adicionais são introduzidos devido a distorções na imagem.

Tabela 7.4 Resultados experimentais do Modulo de Elasticidade para o aço e alumínio.

Modulo de Elasticidade	Teórico	Extensômetro	Programa
$E_{\text{alumínio}}$ (GPa)	69.3 – 79.8	72.49	73.31
$E_{\text{aço}}$ (GPa)	196 – 224	200.63	208.58

7.2. Determinação do Coeficiente de Poisson

Nesta segunda etapa, os experimentos possuem o objetivo de testar o desempenho do sistema visual para a identificação de deformações bidimensionais. Para identificar corretamente as deformações em x e y , sem sofrer com distorções indesejadas nas imagens, é necessário utilizar um espécime plano (ao invés de cilíndrico). Os resultados são avaliados com a determinação experimental do coeficiente de Poisson do material a partir das deformações calculadas pelo sistema visual desenvolvido, comparadas com aquelas medidas com a utilização de *strain gages* colados na superfície do corpo de prova.

O coeficiente de Poisson (ν) está relacionado com a magnitude de deformação gerada em uma direção perpendicular à aplicação de uma tensão. E.g., um corpo de prova tracionado em sua direção longitudinal sofre não só um alongamento no seu sentido longitudinal, mas também uma contração no sentido transversal, relacionadas por (Meyers & Chawla, 1982)

$$\nu = -\frac{\epsilon_{\text{axial}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (7.1)$$

Na confecção dos corpos de prova, foram utilizadas barras chatas de alumínio 6351T6. Primeiramente, foram cortadas amostras de seções transversais nas dimensões mostradas na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 Geometria do corpo de prova plano.

Geometria do material	
Comprimento [mm]	L = 150.0
Largura [mm]	d = 14.0
Espessura [mm]	e = 3.1

Foram colados extensômetros de resistência elétrica de modelo roseta dupla a 90° (da Excel Sensores) na superfície do corpo de prova, vide Figura 7.6, que permitem registrar os valores de ambas as deformações, transversal e axial, para o cálculo do coeficiente de Poisson.

A execução da instrumentação seguiu as seguintes etapas:

1. Preparo das superfícies de colagem, incluindo polimento, acabamento manual com lixa e limpeza;
2. Colagem dos *strain gages* na superfície do corpo de prova (Cola Loctite 496);
3. Colagem dos terminais e soldagem dos fios e cabeamento;
4. Verificação do funcionamento dos *strain gages*;
5. Isolamento e proteção dos *strain gages* e ligações.

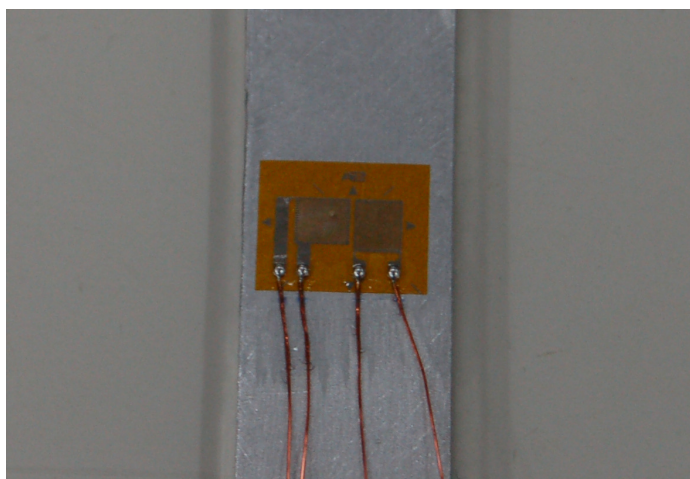
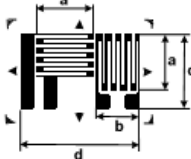


Figura 7.6 Extensômetro colável da Excel Sensores Ltda de resistência elétrica, modelo roseta dupla a 90°.

O modelo de extensômetro escolhido é constituído por uma base de poliimida com filme metálico com autocompensação de temperatura para alumínio, resistência elétrica de 350 Ohms e encapsulado com fio de cobre. O valor do Fator de Sensibilidade destes extensômetros elétricos, estabelecido pelo fornecedor, é de $K = 2,1$. As dimensões deste tipo de extensômetro encontram-se resumidas na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 Dimensões do extensômetro elétrico utilizado.

			
Cada Grelha		Total	
A (Comprim.)	B (Largura)	C (Comprim.)	D (Largura)
3.18mm	3.18mm	5.72mm	8.71mm

7.2.1. Resultados

No primeiro experimento, foi utilizada tinta branca pulverizada sobre a superfície do corpo de prova, vide Figura 7.7. Obtiveram-se os valores das deformações e coeficiente de Poisson que se encontram listados na Tabela 7.7.

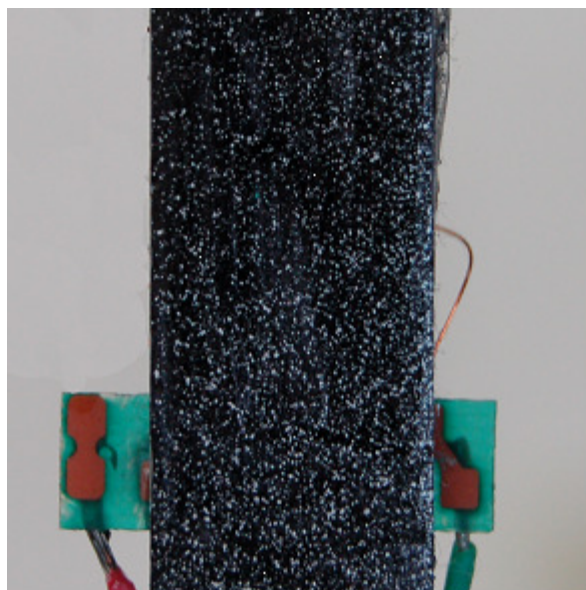


Figura 7.7 Montagem experimental do corpo de prova.

Tabela 7.7 Coeficiente de Poisson para diferentes níveis de deformação

Nº Imagem	Strain Gage			Programa		
	$\epsilon_{longitudinal}$ ($\mu\epsilon$)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	Poisson (ν)	$\epsilon_{longitudinal}$ ($\mu\epsilon$)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	Poisson (ν)
1	-196	563	0.3481	-187	545	0.3431
2	-625	1778	0.3515	-543	1552	0.3499
3	-856	2428	0.3526	-809	2292	0.3517
4	-1382	3788	0.3648	-1275	3563	0.3579
5	-1494	3967	0.3766	-1422	3719	0.3824
6	-1769	4450	0.3975	-1746	4381	0.3986
7	-2231	5548	0.4021	-2476	5094	0.4015
8	-2750	6750	0.4074	-2476	6141	0.4032
9	-3318	7830	0.4238	-3413	8029	0.4251
10	-4409	9978	0.4419	-4355	10051	0.4333

No segundo experimento, a texturização gerada por riscos na superfície do material, vide figura 7.8, forneceram os valores apresentados na Tabela 7.8.

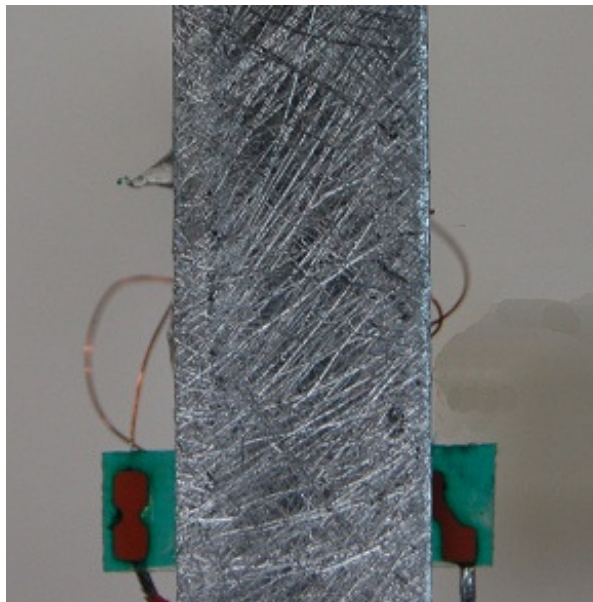


Figura 7.8 Montagem experimental do corpo de prova.

Tabela 7.8 Relação de Poisson para diferentes níveis de deformação.

Nº Imagem	Strain Gage			Programa		
	$\epsilon_{longitudinal}$ ($\mu\epsilon$)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	Poisson (ν)	$\epsilon_{longitudinal}$ ($\mu\epsilon$)	ϵ_{axial} ($\mu\epsilon$)	Poisson (ν)
1	-272	812	0.3350	-303	894	0.3389
2	-538	1560	0.3449	-558	1612	0.3462
3	-714	2068	0.3453	-735	2112	0.3480
4	-1069	2976	0.3592	-1121	3077	0.3643
5	-1544	4067	0.3796	-1609	4267	0.3771
6	-1769	4450	0.3975	-1867	4767	0.3917
7	-2826	6702	0.4217	-2569	6147	0.4179
8	-3224	7525	0.4284	-3420	7795	0.4387
9	-4171	9481	0.4399	-4334	9847	0.4401
10	-4476	10161	0.4405	-4848	10933	0.4434

Os valores dos coeficientes de Poisson mostrados nas Figuras 7.9 e 7.10 mostram que os valores identificados pelo sistema visual são coerentes com os dados extensométricos.

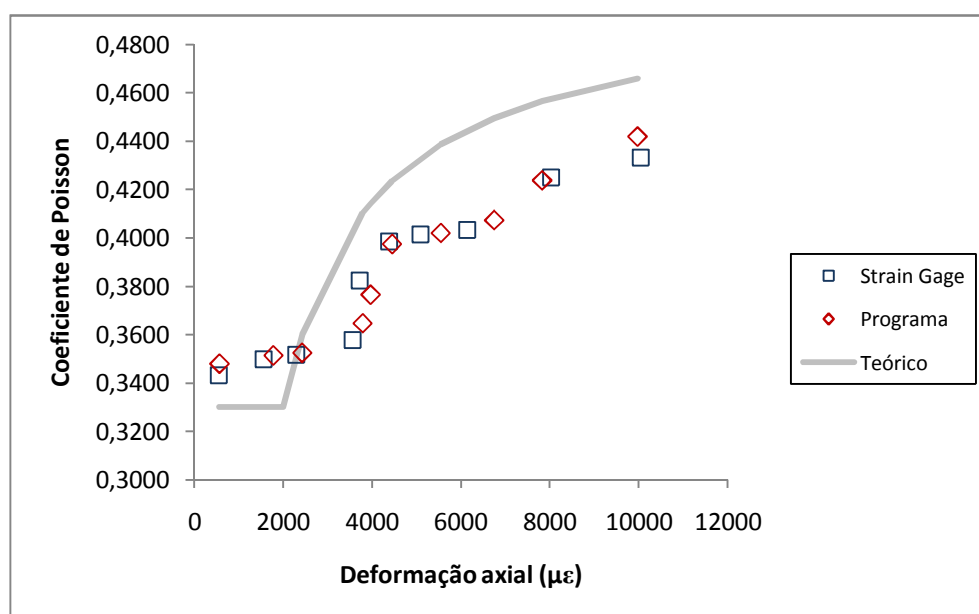


Figura 7.9 Valores do coeficiente de Poisson, com deformações medidas pela roseta extensométrica (*strain gage*) e pelo sistema visual.

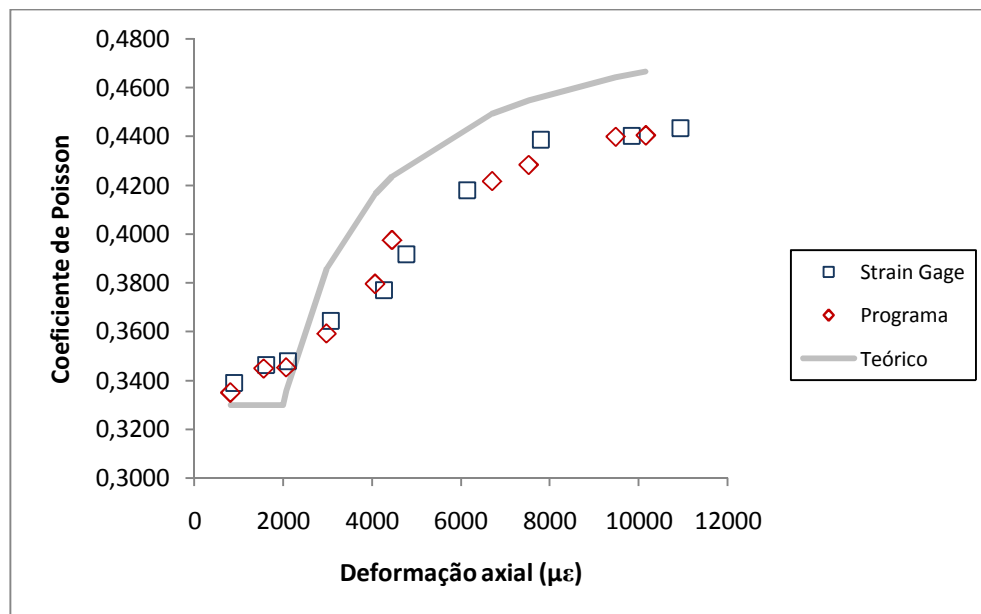


Figura 7.10 Valores do coeficiente de Poisson, com deformações medidas pela roseta extensométrica (*strain gage*) e pelo sistema visual.

Note que para baixas deformações o coeficiente de Poisson se aproxima ao valor elástico para esta liga de alumínio $\nu \cong 0.334$. Sob maiores deformações, ν aumenta, como esperado, devido à plastificação na direção de aplicação da carga. O valor do coeficiente de Poisson elastoplástico a 1% de deformação (10.000 $\mu\epsilon$) para este alumínio é 0.45, que é coerente com os valores medidos tanto pelo sistema visual quanto pelas rosetas para esse nível de deformação. Note que, a partir do escoamento, o coeficiente de Poisson aumenta até se estabilizar em seu valor plástico $\nu = 0.5$.

7.3. Considerações Gerais

Algumas considerações de ordem geral são resumidas a seguir.

À semelhança de um extensômetro modelo roseta, o modelo proposto permite avaliar as componentes do estado de deformações axial e longitudinal na região de medição.

Os experimentos, apesar de serem realizados sob condições controladas no ambiente do Laboratório, mostram a adequação do modelo matemático proposto.

O escorregamento do corpo de prova durante o ensaio mecânico foi um efeito expressivo presente, normalmente como resultado da própria deformação

dos corpos de prova e devido às garras de ação mecânica da máquina de testes. Este tipo de translação origina mudanças de escala significativas, afetando a confiabilidade das medições visuais quando comparado ao extensômetro de resistência, o qual está mecanicamente acoplado à superfície da peça e, portanto não sofre com estes problemas. Além disso, o aparecimento de flexões indesejadas deve ser controlado com a utilização de *strain gages* em ambas as faces do corpo de prova durante o ensaio.

A estimação do tempo de execução do programa depende essencialmente do tamanho da imagem a ser analisada e da quantidade de pontos-chaves detectados pelo algoritmo SIFT. As informações sobre os tempos médios de execução no processamento de uma imagem são mostradas na tabela 7.9 para o caso de uma imagem de dimensões 370x480 *pixels*.

Tabela 7.9 Tempos de execução do programa desenvolvido.

Processo	Linguagem de programação	Pontos-chaves	Tempo de execução ¹
<i>SIFT Template image</i>	C	2751	3,0367 seg
<i>SIFT Matching image</i>	C	2649	2,7908 seg
<i>Matching</i> entre imagens	Matlab	1161	4,8869 seg

¹Processador Intel® Pentium® Dual-Core 2.16 GHz.